

# **INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE BONIFICADO EN LAS PROPIEDADES CORROSIVAS DE LA ALEACIÓN AISI/SAE 4140**

**PRESENTADO POR:**

**Andrea Saavedra Moncada**

**Código: 1.094.943.761**

**David Mejía Rincón**

**Código: 1.094.931.489**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA- RISARALDA  
2019**

**INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE BONIFICADO EN LAS  
PROPIEDADES CORROSIVAS DE LA ALEACIÓN AISI/SAE 4140**

**PRESENTADO POR:**

**Andrea Saavedra Moncada  
Código: 1.094.943.761**

**David Mejía Rincón  
Código: 1.094.931.489**

**DIRIGIDO POR:**

**José Luis Tristancho Reyes**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FORMATIVA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA- RISARALDA  
2019**

**Pereira, julio 2019**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

**Firma del Presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Pereira, julio 2019**

## **DEDICATORIA**

### **Andrea Saavedra Moncada**

A mis padres y mi esposo que siempre me apoyaron, fueron mis guías en este proceso y mi motivación para siempre seguir adelante y cumplir con mis metas, a mi hermana Alejandra Saavedra por toda la colaboración y apoyo brindado durante toda mi carrera universitaria.

### **David Mejía Rincón**

A mis padres ya que gracias a ellos en estos momentos soy la persona que soy, por apóyame en todo momento incondicionalmente no dejando que perdiera mi rumbo ni mis metas, dándome aliento en los momentos que fueron difíciles durante mi etapa de aprendizaje, les agradezco por esto y muchas cosas más.

## **AGRADECIMIENTOS**

El trabajo no habría culminado con éxito de no haber sido por la influencia de nuestros padres a quienes les agradecemos de todo corazón por estar presentes para ayudarnos a superar nuestras adversidades y compartir nuestras satisfacciones.

A dos personas que siempre estuvieron brindando sus conocimientos y su apoyo para que el proyecto se desarrollara de una manera correcta.

Primero a nuestro director José Luis Trisancho que se encargó de la supervisión del proceso y depositar toda su confianza y disposición para resolver todas nuestras inquietudes en las distintas etapas de elaboración y quien fue nuestra mano derecha en el campo de desarrollo del proyecto de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO.....	3
1.2 FORMULACIÓN.....	3
1.3 SISTEMATIZACIÓN.....	3
2. JUSTIFICACIÓN .....	3
3. OBJETIVOS .....	4
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
4. MARCO TEÓRICO .....	5
4.1 CORROSIÓN .....	5
4.1.1 IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN .....	5
4.1.2 LA CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA Y SUS PROCESOS.....	6
4.1.3 TIPOS DE CORROSIÓN .....	7
4.2 ACEROS.....	10
4.2.1 DENOMINACIÓN DE LOS ACEROS.....	11
4.2.2 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS EN EL ACERO .....	12
4.2.3 CLASIFICACION DE LOS ACEROS.....	12
4.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	14
4.3.1 TEMPLE DEL ACERO .....	15
4.3.2 REVENIDO DEL ACERO .....	17
4.4 TRANSFORMACIONES DE FASE .....	17
4.4.1 TEMPLE DEL ACERO.....	17
4.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS.....	18
4.5.1 CURVAS DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL .....	18
4.5.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL).....	19
5. MARCO CONCEPTUAL.....	21
6. METODOLOGÍA.....	22
6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO METODOLÓGICO Y EQUIPOS .....	22
6.1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	22
6.1.2 ADQUISICIÓN DE MATERIAL DE TRABAJO .....	22
6.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE TRABAJO .....	22
6.3 ADQUISICIÓN DE EQUIPOS.....	23

6.3.1 CELDA ELECTROQUÍMICA .....	23
6.3.2 PUESTA A PUNTO DE EQUIPOS .....	23
6.4 APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS .....	24
6.5 MEDIOS ELECTROLÍTICOS .....	26
6.5.1 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	26
6.6 DATOS DE PROCEDIMIENTO .....	26
6.7 MONTAJE DE PROBETAS EN CELDAS ELECTROQUÍMICAS.....	28
6.7.1 PROBETAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO Y SIN TRATAMIENTO .....	29
6.8 DESARROLLO DE LA PRUEBA .....	29
7. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	30
7.1 RESULTADOS OBTENIDOS.....	31
7.1.1 PRUEBAS SIN TRATAMIENTO TERMICO EN SALMUERA.....	31
7.1.2 PRUEBAS CON TRATAMIENTO TERMICO EN SALMUERA.....	33
7.1.3 PRUEBAS SIN TRATAMIENTO TERMICO EN ACIDO ACETICO .....	34
7.1.4 PRUEBAS CON TRATAMIENTO TERMICO EN ÁCIDO ACÉTICO.....	35
7.2 ANALISIS DE RESULTADOS .....	36
7.2.1 ANALISIS DE LAS PROBETAS DE ACERO AISI SAE 4140 ATACADO EN SALMUERA .....	36
7.2.2 ANALISIS DE LAS PROBETAS DE ACERO AISI SAE 4140 ATACANDO EN ÁCIDO ACÉTICO .....	39
8. CONCLUSIONES.....	42
9. RECOMENDACIONES.....	43
10. BIBLIOGRAFÍA .....	44

## INTRODUCCIÓN

La evolución humana a lo largo de los años ha dependido notablemente no solo en el aprovechamiento de los recursos naturales, sino también en la transformación y generación de valor de los bienes disponibles en el planeta. Nuestra civilización ha sido testigo de importantes avances en distintos sectores económicos, los cuales la construcción y producción se han convertido en pilares fundamentales para el desarrollo de proyectos e innovaciones ingenieriles para beneficio de la sociedad.

Las aplicaciones en diseños de ingeniería como obras civiles, maquinaria y herramientas han servido como base fundamental para el uso de metales y aceros, especialmente los aceros al carbono, destacando su importancia y aprovechamiento de sus propiedades mecánicas en la industria. Este tipo de aceros se han convertido en un pilar relevante en la actualidad, debido a sus componentes químicos, que favorecen su durabilidad en el tiempo y uso. Sin embargo, estos aceros son susceptibles a la corrosión, específicamente a la atmosférica. Los aceros al carbono se desempeñan muy bien en ambientes secos y rurales, pero la velocidad de corrosión aumenta dramáticamente en ambientes de alta humedad o en ambientes salinos industriales, lo que conduce a una falla por corrosión del metal.[1]

Para determinar las fallas por corrosión del acero, se han determinado ciertas estrategias que pueden minimizar las consecuencias, entre ellas están: un diseño apropiado, una selección adecuada del material, un control de la estructura metalúrgica mediante un tratamiento térmico y por último el uso de inhibidores. De todas estas estrategias de control, el tratamiento térmico es el más utilizado debido a su rentabilidad. El recocido, la normalización, el temple y el revenido son los tratamientos térmicos más utilizados en los aceros al carbono. El recocido se aplica con mayor frecuencia para ablandar los materiales de acero al carbono y refina sus granos debido a la microestructura de ferrita y perlita. En la normalización, el material se calienta al rango de temperatura austenítico y esto es seguido por enfriamiento por aire para obtener una matriz principalmente de perlita, lo que resulta en un aumento de la resistencia y la dureza. En el endurecimiento o temple, el material se calienta a una temperatura lo suficientemente alta para promover la formación de austenita, se mantiene a esa temperatura hasta que la cantidad deseada de carbono se disuelve y luego se enfría en aceite o agua a una velocidad adecuada para obtener un 100% de martensita con un máximo de resistencia a la fluencia. Al temprar, las propiedades del acero se modifican para disminuir la dureza, aumentar la ductilidad y la resistencia al impacto.

Muchos investigadores han informado sobre los efectos del tratamiento térmico en el comportamiento de corrosión de diferentes materiales de acero al carbono.[2]



Debido a estos comportamientos, en los últimos treinta años, el uso de métodos electroquímicos para sondear procesos de corrosión ha aumentado hasta el punto en que representan un conjunto indispensable de herramientas, en donde han proporcionado ciertas fuentes de información que se relacionan con el comportamiento en potencial, corriente y carga eléctrica de un electrodo corrosivo, para así determinar la velocidad de corrosión de un material.

El presente proyecto tiene como objetivo principal evaluar la velocidad de corrosión en los aceros 4140, por medio de técnicas electroquímicas, en las que se estudiarán a distintos tiempos de exposición, con el fin de obtener, comparar y analizar los resultados para determinar las fallas y daños que sufrieron las probetas al ser sometidos a medios agresivos, y si los tratamientos térmicos aplicados fueron relevantes para determinar su beneficio o no de las probetas afectadas por la corrosión.

## **1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.1 PLANTEAMIENTO**

Dada la necesidad de conocer las propiedades corrosivas del acero al carbono AISI/SAE 4140, se realiza un tratamiento térmico de bonificado, el cual consta de temple en aceite y recocido a una temperatura determinada, con el fin de conocer cuál será la influencia de estos tratamientos en el material y a qué velocidad se verán reflejados los efectos de corrosión. La importancia de conocer cómo afecta las propiedades del material cuando es sometido al tratamiento térmico es relevante, debido a que se puede determinar si el acero presenta mejoras ante un ataque corrosivo, esto con el fin de semejar los ambientes de trabajo en que se encuentra expuesto, y poder mejorar la vida del material y así ahorrar costos en mantenimiento y cambios.

### **1.2 FORMULACIÓN**

¿Será posible que, al aplicar un Tratamiento Térmico de Bonificado, se pueden mejorar las propiedades del material ante la corrosión?

### **1.3 SISTEMATIZACIÓN**

- ¿Cómo se van a determinar las temperaturas que se aplicarán al tratamiento térmico?
- ¿Cómo seleccionar la o las tecnologías disponibles para identificar las velocidades de corrosión?
- ¿Cómo determinar los cambios en el potencial corrosivo, mediante técnicas electroquímicas?

## **2. JUSTIFICACIÓN**

El acero AISI/SAE 4140 es reconocido por ser uno de los materiales más utilizados gracias a sus propiedades mecánicas, ya que se caracterizan por tener una resistencia al desgaste y a los altos esfuerzos por un bajo costo. Sus aplicaciones en la industria son de un espectro amplio, dado que se emplean en cigüeñales, engranajes, ejes, mesas rotatorias, válvulas, ruedas dentadas, entre otras.

Debido a estas aplicaciones, dicho material estará expuesto a ambientes de trabajo agresivos, como aguas salinas, ácidos industriales, y otros ambientes corrosivos. Es por esto que se pretende analizar por medio de tratamientos térmicos, si este material puede mejorar sus propiedades ante la corrosión, empleando técnicas electroquímicas para conocer el potencial corrosivo y así determinar la velocidad en la que el material sufrirá los efectos de corrosión.

Una vez obtenido los resultados, se podrían definir los factores positivos o negativos del material al ser sometidos a dichos tratamientos térmicos, y de tal manera, poder concluir los tiempos de mantenimiento lo cual se vería reflejado en factores económicos.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Establecer la Influencia del tratamiento térmico de bonificado en las propiedades corrosivas de la aleación AISI/SAE 4140.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**3.2.1** Seleccionar la temperatura adecuada para la aplicación del tratamiento térmico de temple en aceite al material.

**3.2.2** Someter la aleación AISI/SAE 4140 templada a tratamiento térmico de revenido.

**3.2.3** Aplicar técnicas electroquímicas de corriente directa (curvas de polarización, y resistencia a la polarización lineal) para determinar la velocidad de corrosión.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 CORROSIÓN

Se denomina corrosión al ataque destructivo que sufre el material, generalmente metálico, por reacción química o electroquímica con su medio ambiente (atmósfera, suelo, agua, etc.).

El término corrosión suele referirse normalmente al ataque de los metales, aunque otros materiales no metálicos, como los cerámicos y los polímeros, también pueden ser deteriorados por ataques químicos directos, pero en estos casos suele ser utilizado el término degradación.

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

Este deterioro en los materiales obedece a la tendencia que tienen de buscar su estado de mayor estabilidad o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión.

Como se mencionó anteriormente, la corrosión es producto de una interacción oxidoreductiva entre el metal, el ambiente o el agua en donde se encuentre sumergido, de acuerdo a esto se dice que las causas más conocidas de corrosión, son las alteraciones producidas en la estructura química de un metal debido a la exposición al aire, ejemplo de este serían: la formación de una sustancia de color marrón que se forma en el hierro y el acero, degradando de tal forma a dichos materiales que pueden romperse o quebrantarse, popularmente se le conoce como "óxido o herrumbre".[3]

#### 4.1.1 IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN

En términos económicos se estima que aproximadamente el 3% del producto interno bruto (PIB) de un país industrializado se gasta directa o indirectamente en corregir y prevenir problemas relacionados con la corrosión metálica.[4]

Las pérdidas económicas derivadas de la corrosión pueden dividirse en pérdidas directas y pérdidas indirectas:

Entre las primeras pueden destacarse:

- Costos de mantenimiento
- Costos de reposición (material, transporte y mano de obra).
- Costos por averías imprevistas.
- Costos directos por daños accidentales

El alcance de las pérdidas indirectas por causa de la corrosión es más difícil de evaluar, sin embargo, algunas de las circunstancias más frecuentes que pueden acarrear este tipo de pérdidas pueden ser:

- Interrupciones en la producción.
- Pérdidas de producto.
- Pérdidas de rendimiento.
- Contaminación de los productos.
- Sobredimensionado.
- Costos indirectos por daños accidentales.

Cuando el factor principal a considerar es la seguridad, los daños que pueden ocasionar la corrosión sobrepasan a cualquier predicción.[3], [5]

#### **4.1.2 LA CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA Y SUS PROCESOS**

Como se mencionó en un principio, la mayor problemática de la corrosión es la destrucción del metal al que afecta. Desde el punto de vista de la industria, el sector más afectado por la corrosión, los ataques que este proceso causa pueden ser; desde fracturas hasta fugas en tanques, disminución de la resistencia mecánica de las piezas, entre otros. Aun así, una de las principales consecuencias es que, si no son prevenidas estas clases de ataques por corrosión, la seguridad de las personas es algo que se ve permanentemente afectado.

Existen dos clases de pérdidas desde el punto de vista económico.

- **Directas:** las pérdidas directas son las que afectan de manera inmediata cuando se produce el ataque. Estas se pueden clasificar en varios tipos, de las cuales las más importantes son el costo de las reparaciones, las sustituciones de los equipos deteriorados y costos por medidas preventivas.
- **Indirectas:** se consideran todas las derivadas de los fallos debidos a los ataques de corrosión. Las principales son la detención de la producción debida a las fallas y las responsabilidades por posibles accidentes.

En general, los costos producidos por la corrosión oscilan cerca del 3% del P.I.B. de los países industrializados. Muchos de estos gastos podrían evitarse con un mayor y mejor uso de los conocimientos y técnicas que hoy en día están disponibles.[4]

### 4.1.3 TIPOS DE CORROSIÓN

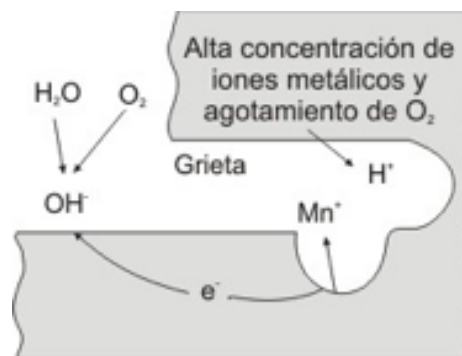
Antes de analizar los efectos que tiene la corrosión en los metales, se deben ver los diversos tipos de corrosión que existen. Estos tipos de corrosión se pueden clasificar de la siguiente manera.

#### 4.1.3.1 LOCALIZADA

La corrosión localizada se da cuando la pérdida de metal ocurre en áreas discretas o localizadas. Este tipo de corrosión se subdivide en otros tipos de corrosión. Los más destacados son:

##### 4.1.3.1.1 Corrosión por fisura o “Crevice”

La corrosión por crevice o por fisuras es la que se produce en pequeñas cavidades o huecos formados por el contacto entre una pieza de metal igual o diferente a la primera, o más comúnmente con un elemento no- metálico. En las fisuras de ambos metales, que también pueden ser espacios en la forma del objeto, se deposita la solución que facilita la corrosión de la pieza. Se dice, en estos casos, que es una corrosión con ánodo estancado, ya que esa solución, a menos que sea removida, nunca podrá salir de la fisura. Además, esta cavidad se puede generar de forma natural producto de la interacción iónica entre las partes que constituyen la pieza.[3], [6]



**Figura 1.** Corrosión por fisura. Fuente:[5]

##### 4.1.3.1.2 Corrosión por picadura o “Pitting”

Este tipo de corrosión es altamente localizada, se produce en zonas de baja corrosión generalizada y el proceso (reacción) anódico produce unas pequeñas “picaduras” en el cuerpo que afecta. Puede observarse generalmente en superficies con poca corrosión o con

una corrosión generalizada casi nula. Ocurre como un proceso de disolución anódica local donde la pérdida de metal es acelerada por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo mucho mayor.[3]

Esta clase de corrosión posee algunas otras formas derivadas:

- **Corrosión por Fricción o Fretting:** es la que se produce por el movimiento relativamente pequeño (como una vibración) de dos sustancias en contacto, de las que una o ambas son metales. Este movimiento genera una serie de picaduras en la superficie del metal, las que son ocultadas por los productos de la corrosión y sólo son visibles cuando ésta es removida.
- **Corrosión por Cavitación:** es la producida por la formación y colapso de burbujas en la superficie del metal (en contacto con un líquido). Es un fenómeno semejante al que le ocurre a las caras posteriores de las hélices de los barcos. Genera una serie de picaduras en forma de panal.
- **Corrosión Selectiva:** es semejante a la llamada Corrosión por Descincado, en donde piezas de zinc se corroen y dejan una capa similar a la aleación primitiva. En este caso, es selectiva porque actúa sólo sobre metales nobles como al Plata-Cobre o Cobre-Oro. Quizá la parte más nociva de esta clase de ataques está en que la corrosión del metal involucrado genera una capa que recubre las picaduras y hace parecer al metal corroído como si no lo estuviera, por lo que es muy fácil que se produzcan daños en el metal al someterlo a una fuerza mecánica.[3], [6]

#### 4.1.3.2 GENERAL O UNIFORME

Es aquella corrosión que se produce con el adelgazamiento uniforme, producto de la pérdida regular del metal superficial. Y al igual que la corrosión localizada, esta clase de corrosión se subdivide en otras:

##### 4.1.3.2.1 Atmosférica

De todas las formas de corrosión, la Atmosférica es la que produce mayor cantidad de daños en el material y en mayor proporción. Grandes cantidades de metal de automóviles, puentes o edificios están expuestos a la atmósfera y por esta razón se ven atacados por oxígeno y agua. La severidad de esta clase de corrosión se incrementa cuando la sal, los compuestos de sulfuro y otros contaminantes atmosféricos están presentes. Para hablar de esta clase de corrosión es mejor dividirla según los ambientes en los cuales se presenta.

- **Industriales:** Son los que contienen compuestos sulfurosos, nitrosos y otros agentes ácidos que pueden promover la corrosión de los metales. En adición, los ambientes

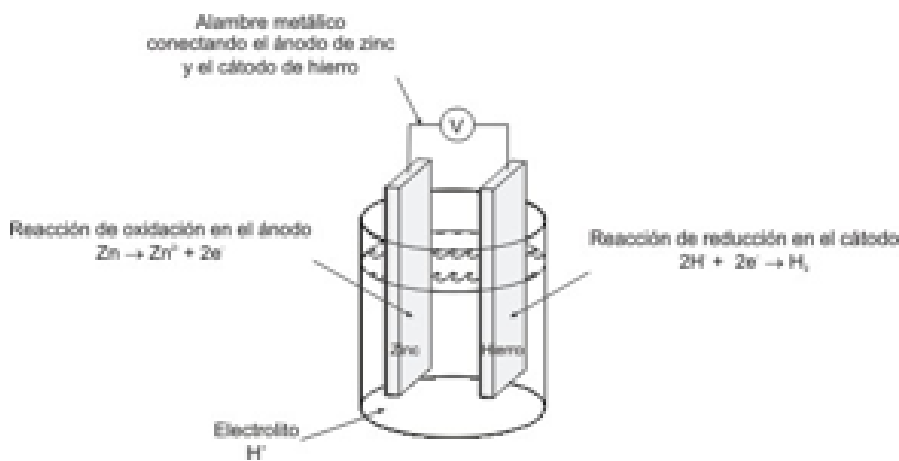
industriales contienen una gran cantidad de partículas aerotransportadas, lo que produce un aumento en la corrosión.

- **Marinos:** Esta clase de ambientes se caracterizan por la presencia de ácido clorhídrico, un ion particularmente perjudicial que favorece la corrosión de muchos sistemas metálicos.
- **Rurales:** En estos ambientes se produce la menor clase de corrosión atmosférica, caracterizada por bajos niveles de compuestos ácidos y otras especies agresivas.

Existen factores que influyen la corrosión atmosférica. Ellos son la temperatura, la presencia de contaminantes en el ambiente y la humedad.

#### 4.1.3.2.2 Galvánica

Esta corrosión es la más común de todas y es una forma de corrosión acelerada que ocurre cuando dos metales distintos entre sí actúan como ánodo uno de ellos y el otro como cátodo. Aquel que tenga el potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación y viceversa aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción. Este par de metales constituye la llamada pila galvánica. En donde la especie que se oxida (ánodo) cede sus electrones y la especie que se reduce (cátodo) acepta los electrones.



**Figura 2.** Corrosión galvánica. Fuente:[5]

El ataque galvánico puede ser uniforme o localizado en la unión entre aleaciones, dependiendo de las condiciones. Este tipo de corrosión puede ser particularmente severa cuando las películas protectoras de corrosión no se forman o son eliminadas por erosión.



Esta forma de corrosión es la que producen las Celdas Galvánicas. Sucede que cuando la reacción de oxidación del ánodo se va produciendo se desprenden electrones de la superficie del metal que actúa como el polo negativo de la pila (el ánodo), y así se va produciendo el desprendimiento paulatino de material desde la superficie del metal. Este caso ilustra la corrosión en una de sus formas más simples.

Quizá la mayor problemática sobre corrosión esté en que al ser este caso bastante común se presente en variadas formas y muy seguido.

#### **4.1.3.2.3 Altas temperaturas**

Algunos metales expuestos a gases oxidantes en condiciones de muy altas temperaturas pueden reaccionar directamente con ellos sin la necesaria presencia de un electrolito. Este tipo de corrosión es conocida como Empañamiento, Encamamiento o Corrosión por Altas Temperaturas.

Generalmente esta clase de corrosión depende directamente de la temperatura. Actúa de la siguiente manera: al estar expuesto el metal al gas oxidante, se forma una pequeña capa sobre el metal, producto de la combinación entre el metal y el gas en esas condiciones de temperatura. Esta capa o “empañamiento” actúa como un electrolito “sólido”, el que permite que se produzca la corrosión de la pieza metálica mediante el movimiento iónico en la superficie.

Algunas maneras de evitar esta clase de corrosión son las siguientes:

- Alta estabilidad termodinámica, para generar en lo posible otros productos para reacciones distintas.
- Baja Presión de Vapor, de forma tal que los productos generados sean sólidos y no gases que se mezclen con el ambiente.

La corrosión por altas temperaturas puede incluir otros tipos de corrosión, como la Oxidación, la Sulfatación, la Carburización, los Efectos del Hidrógeno, etc. [7]

## **4.2 ACEROS**

La palabra acero se conoce comúnmente para denominar la unión típica de un metal (hierro) con una pequeña cantidad de carbono, que puede variar normalmente entre el 0,02% y el 2,14%, aunque existen además de otros metales que se pueden añadir en pequeñísima proporción como níquel, titanio, cromo, wolframio o vanadio entre otros, estos aceros especiales se conocen como aceros aleados y la adición de otro metal se realiza para modificar alguna propiedad específica del material.

El acero se caracteriza por su gran resistencia, contrariamente a lo que ocurre con el hierro, que resiste muy poco a la deformación plástica por su composición total con cristales de ferrita; pero cuando se alea con carbono forman estructuras cristalinas diferentes que originan gran incremento en su resistencia.[8]

#### **4.2.1 DENOMINACIÓN DE LOS ACEROS.**

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), fue la primera en crear un sistema para clasificar los aceros guiados por números. Tiempo después el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) adoptaron un sistema similar. Los números de especificación para el acero son iguales para SAE y AISI diferenciando a AISI en que utiliza los prefijos B, C, D y E para indicar la obtención del acero de la siguiente forma:

B: Acero Bessemer Ácido al Carbono

C: Acero Martin – Siemens Básico al Carbono D: Acero Martin – Siemens Ácido al Carbono

E: Acero de Horno Eléctrico

Esta clasificación consta también de 4 números, que nos indica el tipo de acero.

- Primer número: Este número indica el (los) elementos (s) principal (es) de la aleación de acuerdo con lo siguiente:
  1. Acero al Carbono
  2. Acero al Níquel
  3. Acero al Níquel –Cromo
  4. Acero al Molibdeno – Cromo
  5. Acero al Cromo
  6. Acero Cromo Vanadio
  7. Acero al Tungsteno
  8. Acero Cromo Níquel Molibdeno
  9. Acero Silicio Manganeso
- Segundo número: Indica el porcentaje aproximado de él o los elementos predominantes de la aleación.
- Tercer y Cuarto número: Juntos indican la cantidad aproximada de carbono en el acero.

## 4.2.2 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS EN EL ACERO

Los aceros contienen elementos de aleación que mejoran algunas de sus características fundamentales, y en el caso de los aceros al carbono, llamados también aceros aleados, se componen de carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre.

- **Silicio:** Funciona como un elemento desoxidante en aceros al carbono. Debido a que en aplicaciones como soldadura genera formaciones de sílice se recomienda que su contenido en un acero no supere el 0,2%.
- **Azufre:** Normalmente es perjudicial debido a que es un elemento insoluble en el hierro, normalmente es una impureza por lo que se mantiene en bajos niveles ya que es responsable de la fragilidad del acero. En algunas condiciones se agrega en mayor cantidad a la habitual con el fin de mejorar la maquinabilidad, aunque esto es, en condiciones especiales.
- **Manganeso:** Es un desoxidante y también desulfurante. Apto para disminuir el contenido de azufre. Facilita la laminación, moldeo y aplicaciones del acero en caliente, además de esto contribuye en propiedades como la resistencia y dureza.
- **Fósforo:** Aumenta la fragilidad de los aceros sobre todo en la ferrita, la martensita y constituyentes del revenido en aceros.

## 4.2.3 CLASIFICACION DE LOS ACEROS

Los aceros se pueden clasificar según su contenido de carbono y otros elementos.

### 4.2.3.1 SEGÚN SU CONTENIDO DE CARBONO

#### 4.2.3.1.1 Acero de bajo carbono

Se caracterizan por poseer su contenido de carbono entre 0,10 y 0,30% de carbono, tienen gran capacidad de deformación por lo general contiene entre 0,10% de C y un máximo de 0,40% de Mn, entre sus aplicaciones están partes de carrocerías, alambres y hojalatas.[9]

#### 4.2.3.1.2 Acero de medio carbono

Su contenido de carbono se encuentra entre 0,30% y 0,60%, siendo muy usados el AISI-SAE 1045 y 1050, el que tengan un porcentaje más alto de Mn los hace idóneos para modificar sus propiedades a través de los diversos tratamientos térmicos, entre sus aplicaciones se encuentran, ejes, cigüeñales y engranajes.[9]

#### 4.2.3.1.3 Acero de alto carbono

Su contenido varía entre 0,60% y 1,00%, se aplican a piezas con aplicaciones elásticas y alambres de alta resistencia. Aceros de mayor contenido de carbono cuya composición varía entre 1.00% y 2,00% son utilizados en aplicaciones que demandan mayor capacidad elástica.[9]

#### 4.2.3.2 ACERO 4140

El acero 4140 es un acero de medio carbono aleado con Cr y Mo. Posee mediana templabilidad, buena maquinabilidad, alta resistencia, buena tenacidad y baja soldabilidad. Este acero es susceptible al endurecimiento por tratamiento térmico. Es comúnmente utilizado para la fabricación de piezas que requieran alta tenacidad y resistencia.[10]

Por sus características de temple, composición química, **Tabla 1**, propiedades mecánicas, **Tabla 2**, y tratamientos térmicos, **Tabla 3**, es utilizado en una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general de resistencia media, tales como: ejes, semiejes, cigüeñales, engranajes, piñones, cuñas, tornillos, pernos, martillos, pasadores, remaches, partes de maquinaria y herramientas agrícolas.

**Tabla 1.** Composición química acero 4140.[10]

Composición Química	
C	0,38 - 0,43
Mn	0,75 - 1,00
Si	0,15 - 0,35
P	0,035 Máx
S	0,040 Máx
Cr	0,80 - 1,10
Mo	0,15 - 0,25

**Tabla 2.** Propiedades Mecánicas Acero 4140.[10]

Propiedades Mecánicas	
Bonificado	
Resistencia a la Corrosión	95 - 105 $\frac{kgf}{mm^2}$
Límite de Fluencia	60 - 74 $\frac{kgf}{mm^2}$
Reducción de área	50%
Maquinabilidad	-
Dureza (HB)	270 - 321
Elongación	10 - 18%

**Tabla 3.** Tratamientos Térmicos Acero 4140.[10]

Tratamiento Térmico		
Valores en °C		
Forjado	850 - 1050	
Normalizado	870 - 900	
Revenido	540 - 680	
Recocido	750 - 850	
Templado	Aceite	830 - 850

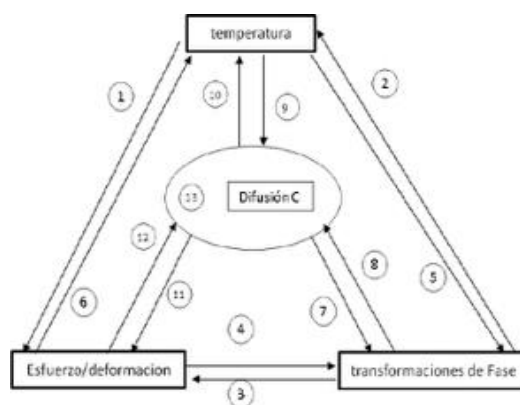
### 4.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Una de las características del acero, además de sus propiedades mecánicas, es la posibilidad de transformar estas propiedades en un gran campo de atributos que cuando se someten a un tratamiento térmico se modifican. Dependiendo de sus requerimientos, mejoran o reducen bruscamente según se desee, aunque paralelamente en el proceso surgen efectos secundarios como la aparición de tensiones y cambios en el tamaño y forma de su microestructura, lo que genera grietas y tensiones. Por lo tanto, el control del proceso es primordial en el tratamiento.

Es un paso fundamental en el procesado de acero, metales y fundiciones para alcanzar diferentes combinaciones de propiedades mecánicas, el cual consiste en calentar y enfriar el material con tiempos en los que se sostiene la temperatura y así modificar la microestructura.

En este proceso se varía el estado del carbono y del hierro, el tamaño del grano y la distribución de los constituyentes y cambios dentro del material, como la formación de tensiones generadas durante el proceso. Estas últimas dependen en gran parte del medio y temperatura de enfriamiento al que el material es sometido.

A continuación, se muestra la relación entre diferentes aspectos que intervienen en el proceso del tratamiento térmico:



**Figura 3.** Esquema de interacción de los procesos en los tratamientos térmicos.[11]

Según el esquema, **Figura 3**, el cambio de temperatura durante el enfriamiento induce un esfuerzo causado por el cambio volumétrico de la transformación de fase ①; la influencia de

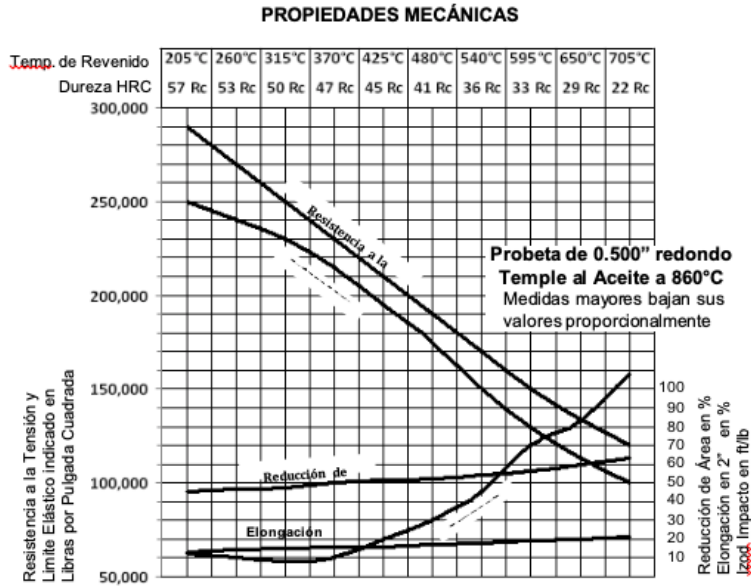
la temperatura en la transformación de fase resulta en el cambio de la microestructura del material ②; y la deformación local producto de este cambio está acompañado de un aumento de los esfuerzos internos ③. La existencia de estos esfuerzos y deformaciones tiene una influencia directa en la cinética de la transformación de fases ④. Además, el calor latente generado debido a la transformación de fase afecta la distribución de temperatura ⑤. Parte del trabajo realizado por la aparición del esfuerzo se convierte en calor que afecta la temperatura ⑥. Luego, los efectos de la difusión de carbono en la transformación de fases ⑦, se reflejan en dos mecanismos: el primero, referido al incremento del porcentaje de C permite realizar la transformación en un rango de temperaturas más bajas; y el segundo, tiene que ver con los carburos que se han formado en la superficie del material tratado cuando se presentan elementos aleantes del acero que exceden los límites de saturación de C en la matriz.[11]

La cinética de la difusión y la velocidad de la reacción de la superficie del carbono dependen de la morfología de la microestructura ⑧ y de los niveles de temperatura ⑨. El contenido de C afecta la conductividad térmica del material ⑩. Además, la absorción de átomos de C desde la atmósfera del tratamiento conduce al cambio de parámetros reticulares (lattice), que deben tenerse en cuenta cuando se establecen las ecuaciones constitutivas de las relaciones esfuerzo- deformación ⑪, lo que significa que los posibles efectos que puede tener el estado de esfuerzos en la cinética de la difusión de carbono ⑫, es una pregunta sin resolver hasta ahora.[11]

#### **4.3.1 TEMPLE DEL ACERO**

Es un tratamiento térmico que consiste en llevar el acero hasta la región de austenita en el diagrama hierro-carbono enfriándose rápidamente, disminuyendo su temperatura en un medio particularmente agua o aceite, generando así un cambio en la estructura de austenita a martensita.

A continuación, se muestra gráficamente la zona de templeado del acero a austenización completa.



**TEMPLE AL ACEITE de 860°C a 845°C - REVENIDO A 595°C**

	Resistencia a la Tensión	Límite Elástico	Elongación en 2"	Reducción de Área	Dureza Brinell	Izod Impacto
Rd 1/2"	157,500	148,750	18.1	59.4	321	66.0
Rd 1"	140,250	135,000	19.5	62.3	285	70.5
Rd 2"	127,500	102,750	21.7	65.0	262	84.0
Rd 4"	116,750	87,000	21.5	62.1	235	82.5

Resistencia a la Tensión y Límite Elástico indicado en Libras por Pulgada Cuadrada

Elongación en 2" en %  
Reducción de Área en %  
Izod Impacto en ft/lb

**Figura 4:** Zona de temple del acero austenización completa.[12]

El enfriamiento de forma acelerada estando en zona de austenización hasta una temperatura ambiente genera una reestructuración de los microconstituyentes denominado martensita. Por lo cual, el objetivo del temple se traduce en la obtención de dicha estructura directamente responsable del aumento de dureza o fuerza de tenacidad. Este cambio está relacionado de forma directamente proporcional al contenido de carbono del acero; contenido que también determina la disminución de la ductilidad.[13]

Las variables involucradas en el procedimiento de temple son las siguientes:

- Temperatura del temple.
- Tiempo de sostenimiento.
- Velocidad de enfriamiento.
- Composición química del acero
- Medio de enfriamiento.

### 4.3.2 REVENIDO DEL ACERO

Es un proceso que se aplica al acero que ha sido previamente endurecido (templado), este tratamiento consiste en calentar nuevamente el material por debajo de la temperatura crítica inferior ( $A_1$ ) y posteriormente se enfría a una velocidad adecuada. Este procedimiento se realiza con el fin de aumentar la ductilidad, rebajar la excesiva dureza aumentando el tamaño de grano de la matriz, obtener valores específicos de propiedades mecánicas aliviando tensiones generadas en el material durante el temple y asegurar estabilidad dimensional.[14]

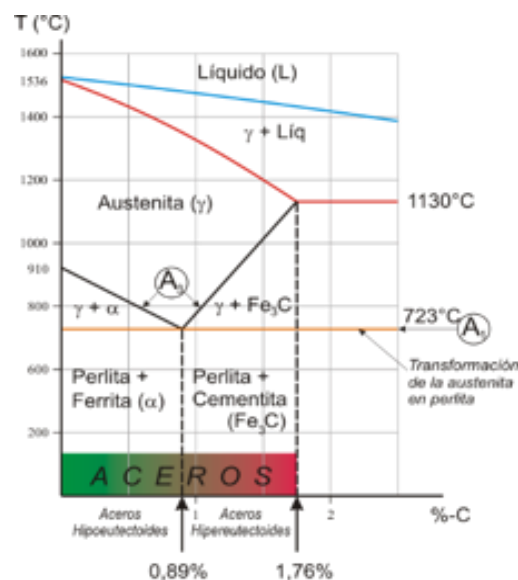
Las variables asociadas con revenido que afectan a la microestructura y las propiedades mecánicas de un acero templado Incluye:

- Temperatura de revenido
- Tiempo de sostenimiento de la temperatura
- Tasa de enfriamiento de la temperatura de revenido
- Composición del acero, incluyendo el contenido de carbono, contenido de la aleación, y elementos residuales.

### 4.4 TRANSFORMACIONES DE FASE

#### 4.4.1 TEMPLE DEL ACERO.

Durante los tratamientos térmicos ocurren transformaciones que sufren los aceros al carbono producidos por procesos de difusión, estos cambios o transformaciones se pueden explicar con el diagrama de fases (Fe- C) o diagrama de hierro-carbono, **Figura 5**. [13]





**Figura 5.** Diagrama de hierro-carbono. Fuente:[14]

Durante el temple del acero, que originalmente presenta una estructura de grano Perlita (Ferrita + Cementita) formada cuando se fabrica acero o hierro fundido y se enfría a una velocidad lenta estable a temperatura ambiente, al subir la temperatura por encima de A3, temperatura a la que normalmente se realiza el temple, se obtiene un reordenamiento de los átomos de hierro y carbono. Aunque este es estable solamente a temperaturas superiores a 900°C conocida como Austenita. Luego, se lleva a cabo un proceso de difusión generado por el enfriamiento rápido para obtener martensita, aunque con contenidos de austenita sin transformar que rodea los cristales de martensita, denominada austenita retenida.

#### **4.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS**

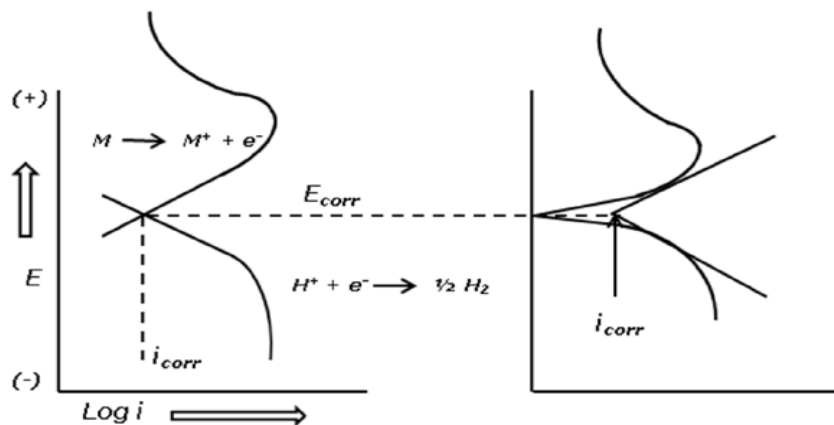
Una de las principales razones por las que se utilizan las técnicas electroquímicas en este tipo de sistemas, es para la obtención de información a partir de la respuesta eléctrica que genera la señal eléctrica introducida en dichos sistemas a estudiar. Entre estas técnicas se incluyen la extrapolación de Tafel, curvas de resistencia a la polarización ( $R_p$ ), espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) y ruido electroquímico que presentan como principal característica el poder ser empleadas en el monitoreo en línea del proceso corrosivo [15] y proveer información sobre:

- **Velocidad de Corrosión** (cinética de corrosión): Se obtiene al determinar el valor de la densidad de corriente de corrosión (ICORR) ya sea por resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ) o por espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE).
- **Mecanismos de Corrosión:** Se definen a partir de los diagramas de Nyquist, obtenidos al aplicar la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), indicando si el mecanismo es controlado por difusión, adsorción o transferencia de carga.
- **Tipo de Corrosión:** Se determina a partir de los registros obtenidos de la aplicación de la técnica de ruido electroquímico, si en el registro se observan fenómenos transitorios anódicos y catódicos se presenta corrosión localizada, pero sí se presentan fluctuaciones erráticas se considera corrosión uniforme.

##### **4.5.1 CURVAS DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL**

El potencial de un metal, que se hace actuar como un electrodo en una celda electroquímica, además de poderse modificar en función del tiempo cambia de la misma forma, en función de la densidad de corriente que se le aplique (procedimiento potencioestático). En el procedimiento galvánico se mantiene constante la densidad de corriente aplicada. Para la obtención de las curvas de polarización se aplica un barrido de

potencial de  $\pm 20$  mV respecto al potencial de corrosión y se observan los datos derivados de las polarizaciones tanto anódica como catódica. El barrido del potencial se grafica en función del logaritmo de la densidad de corriente, **Figura 6.** [15]

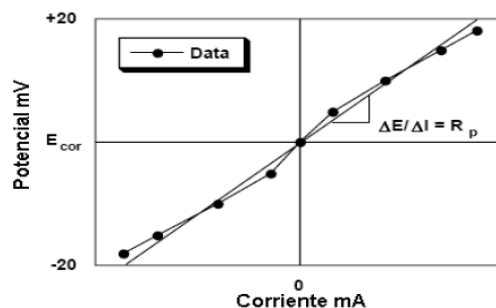


**Figura 6.** Diagrama de Tafel. Fuente:[15]

#### 4.5.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL)

Es una de las técnicas de monitoreo continuo más comúnmente usadas en la determinación de la velocidad de corrosión y se puede definir como la resistencia que ofrece un material a la oxidación durante la aplicación de un potencial externo.

Presenta la ventaja de requerir solo la aplicación de pequeñas polarizaciones que no alteran la superficie del electrodo de trabajo (material de prueba). La resistencia a la polarización ( $R_p$ ) se determina calculando la pendiente de la región lineal de la curva en el diagrama  $E$  vs  $i$ , **Figura 7.**



**Figura 7.** Diagrama de resistencia a la polarización lineal. Fuente:[15]

El ensayo consiste en la aplicación, mediante un potenciostato, de un potencial de  $\pm 20$  mV, alrededor del potencial de reposo con una velocidad de barrido de 0.1 mV/seg. y obtener una respuesta de corriente lineal con el voltaje.[16], [17]

Con la resistencia a la polarización ( $R_p$ ) y las pendientes de Tafel obtenidas de las curvas de polarización, la densidad de corriente de corrosión puede ser determinada mediante el uso de la ecuación de Stern – Geary [18], [19].

$$I_{corr} = \frac{\beta}{R_p}, \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\beta = \frac{ba \times bc}{(2.303)(ba+bc)}, \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

$I_{corr}$ : Densidad de corriente de corrosión ( $\mu A/cm^2$ )

$R_p$ : Resistencia a la polarización ( $\Omega \cdot cm^2$ )

$ba$ : Pendiente anódica de TAFEL (V)

$bc$ : Pendiente catódica de TAFEL (V)

Para llegar a que la corriente de corrosión se determina con la siguiente fórmula:

$$V_{corr} = 3,27 \times 10^{-3} \left( \frac{I_{corr} \cdot PE}{\rho} \right), \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

$V_{corr}$ : Velocidad de corrosión ( $mpy$ )

$PE$ : Peso Equivalente del material ( $g$ )

$\rho$ : Densidad del material ( $g/cm^2$ )

## 5. MARCO CONCEPTUAL

- **Diagrama hierro carbono:** Se conoce como la representación gráfica de la transformación del acero con la temperatura, en él se muestran todos los constituyentes del acero.[20]
- **Ferrita:** Conocido como hierro  $\alpha$ , es el constituyente del acero más blando, dúctil y maleable y propiedades ferromagnéticas hasta los 770°C. [13]
- **Cementita:** Es un constituyente más duro del acero con una dureza de 68 HRC, es frágil, de alargamiento nulo y poca resiliencia.[20]
- **Austenita:** Es un constituyente del acero, se caracteriza por ser dúctil, tenaz y con una elevada resistencia al desgaste.[20]
- **Perlita:** Es una microestructura formada por capas o laminillas de ferrita y Cementita. Sus propiedades mecánicas dependen de la finura de estas laminillas y de la velocidad de enfriamiento del tratamiento térmico.[20]
- **Difusión:** Es un proceso de transformación en la cual los átomos para reordenar se mueven al azar y en forma más o menos desordenada, para poder reagruparse en la distribución de la nueva estructura.[20]
- **Mufla:** Es un horno utilizado generalmente en la fundición de metales y cocción de materiales cerámicos, para lo cual utiliza energía térmica.[21]
- **Bainita:** Es un constituyente del acero que se obtiene de la mezcla de fases de ferrita y Cementita, composición está en función de la temperatura y se caracteriza por ser resistente a la fatiga y al desgaste por rodadura.[20]
- **Metalografía:** Es la ciencia que tiene como fin estudiar la constitución interna de los metales y sus aleaciones, y las relaciona con su composición y propiedades mecánicas.[21]
- **Técnicas Electroquímicas:** Las técnicas electroquímicas son los procesos de señales eléctricas que permiten estimar la velocidad y los mecanismos de corrosión. En estas señales existe, una zona anódica (que sufre la corrosión), una zona catódica (la cual está protegida) y un electrolito; es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar.[22]

## **6. METODOLOGÍA**

Esta investigación busca conocer el comportamiento en la velocidad de corrosión de un acero AISI/SAE 4140 luego de realizarle tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades mecánicas, así se logrará conocer si después de aplicar estos tratamientos este material mejora, se mantienen o se ven afectadas sus propiedades ante la corrosión. Las actividades que se desarrollaron en este trabajo experimental para conseguir los objetivos planteados se describen a continuación:

### **6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO METODOLÓGICO Y EQUIPOS**

A continuación, se describirán los equipos y pasos metodológicos con los que se llevaron a cabo las pruebas en el material anteriormente nombrado.

#### **6.1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En esta etapa se realizó una búsqueda bibliográfica en artículos científicos, tesis, libros y publicaciones sobre corrosión, los diferentes tipos de corrosión, tratamientos térmicos, técnicas electroquímicas, entre otros. Esto con el fin de obtener el conocimiento necesario para poder realizar las pruebas en el laboratorio y determinar así la velocidad de corrosión y el cambio de las propiedades mecánicas de las probetas de acero 4140.

#### **6.1.2 ADQUISICIÓN DE MATERIAL DE TRABAJO**

Los materiales de trabajo utilizados para esta investigación fueron: las probetas de acero 4140, las cuales tuvieron un proceso de mecanizado y refrentando; las celdas electroquímicas, que se diseñaron por medio del software SolidWorks; el horno para realizar los tratamientos térmicos de las probetas y por último los equipos respectivos de electroquímica para realizar las técnicas electroquímicas.

### **6.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE TRABAJO**

Para la realización de este proyecto se ejecutaron diferentes tareas como la preparación de las probetas del acero 4140. El material inicialmente tenía unas medidas estándar, se mecanizaron con el fin de poder tener probetas de 1 cm de espesor, debido a que, al realizar las pruebas, se ubicaran fácilmente en la celda electroquímica para poder analizarlas. Estas mismas probetas, luego de ser cortadas, se sometieron a tratamiento por temple enfriado en aceite y revenido para mejorar las propiedades mecánicas; se lijaron

hasta papel esmeril N°600 para garantizar una superficie adecuada y poder estar en contacto con los diferentes agentes de oxidación para determinar la velocidad de corrosión.

## 6.3 ADQUISICIÓN DE EQUIPOS

### 6.3.1 CELDA ELECTROQUÍMICA

El montaje de la celda electroquímica se realizó de la siguiente manera: primero se diseñó con el software SolidWorks y se envió a fabricar en acrílico, teniendo en cuenta que el principal objetivo de ellas es tener las probetas de acero en contacto con el medio de ataque, y conectar correctamente los electrodos en ella; estos electrodos se ubicaron de la siguiente manera en la celda, **Figura 14 y 15**:

- Electrodo de trabajo: este electrodo se compone de la unión de la probeta de acero 4140 y el alambre que va roscado en ella.
- Electrodo de referencia: este electrodo de nombre Calomel, se fijó en uno de los agujeros de la tapa de la celda.
- Contraelectrodo: se compone de una barra de grafito, y se fijó en el segundo agujero de la tapa de la celda.

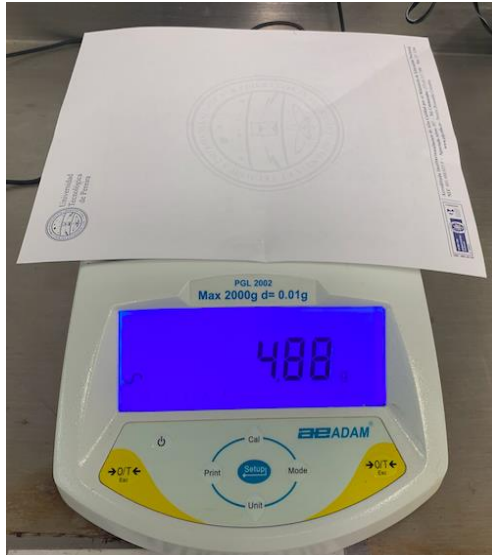
### 6.3.2 PUESTA A PUNTO DE EQUIPOS

Los demás equipos utilizados durante esta investigación fueron; el horno eléctrico para realizar los tratamientos térmicos de las probetas a estudiar, y el equipo Potenciostato - Galvanostato PG-TEKCORR 4.2 USB, **Figura 8**, los cuales fueron suministrados por el laboratorio de electroquímica de la Universidad Tecnológica de Pereira.



**Figura 8.** Potenciostato - Galvanostato. Fuente: [AUTORES]

También fue necesario utilizar una balanza para poder suministrar la masa exacta de sal a la solución de salmuera, **Figura 9**, y un destilador de agua, **Figura 10**, para que nuestra solución de salmuera no tenga agentes externos.



**Figura 9.** Balanza en gramos.

Fuente: [AUTORES]



**Figura 10.** Destilador de agua.

Fuente: [AUTORES]

#### 6.4 APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los valores de temperaturas utilizados para los tratamientos térmicos de temple y revenido se basaron según la **Figura 4**, donde muestran valores de temperaturas intercríticas para el acero AISI SAE 4140.

Las temperaturas y tiempos seleccionadas para dichos tratamientos fueron:

- **Tratamiento Térmico de Temple enfriado en aceite:** Se realizó a una temperatura de 860°C durante un tiempo de 45 minutos, luego se realizó la extracción de las probetas de una manera rápida y se introdujeron en aceite para su enfriamiento, todo este procedimiento se realizó en el horno de marca Terrígeno modelo D-8, serie 305, **Figura 11**.



**Figura 11.** Tratamiento Térmico de Temple en horno. Fuente: [AUTORES]

- **Tratamiento Térmico de Revenido:** Debido a que el tratamiento térmico por revenido se lleva a cabo posterior al tratamiento térmico por temple, se seleccionó una temperatura en el horno de 600°C después de que las probetas pasaran por el proceso de enfriamiento en aceite, durante 30 minutos. Pasado este tiempo, las probetas se sometieron a un enfriamiento gradual a temperatura ambiente dentro del mismo horno.
- **Proceso de Limpieza:** Luego de terminar los tratamientos térmicos por completo, las probetas pasaron por el proceso de lijado en ambas caras, **Figura 12**, iniciando desde la hoja esmerilada N° 80 hasta la N° 600, para así, asegurar las dos superficies limpias y conductoras.



**Figura 12.** Probetas acero 4140. Fuente: [AUTORES]



## 6.5 MEDIOS ELECTROLÍTICOS

Los medios electrolíticos son los agentes que se usaron para dar equivalencia a los medios de ataque, expuestos en las probetas. Los agentes corrosivos utilizados en la práctica fueron el Ácido Acético en porcentajes de 5 % de ácido y 95% de agua destilada, y la Salmuera con 35 gr por un litro de agua destilada, preparados de una manera exacta, garantizando una homogeneidad de las soluciones para tener una mayor precisión a la hora de analizar las pruebas.

### 6.5.1 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN

- **Solución en Salmuera:** Para la preparación de la salmuera se tomó 35 gramos de Sal medidos en la balanza, luego en un recipiente, con un litro de agua destilada, se mezclaron hasta que la solución quedo totalmente homogénea.
- **Solución de ácido acético:** En un envase medible se vertieron 50 ml de ácido acético, luego en otro recipiente con 950 ml de agua destilada, se mezclaron ambas soluciones hasta que quedaron totalmente homogéneas.

## 6.6 DATOS DE PROCEDIMIENTO

Los siguientes datos calculados, fueron relevantes debido a que el equipo Potenciostato - Galvanostato Pg-Tekcorr Pg-Tekcorr 4.2 requiere de estos valores, para realizar el análisis respectivo tanto de Curvas de extrapolación de Tafel como de resistencia a la polarización lineal.

Para el Acero AISI/SAE 4140 se determina su composición química, el peso atómico de cada uno de sus componentes, el porcentaje nominal y el número atómico, **Tabla 4:**

**Tabla 4.** Composición química del Acero 4140. Fuente: [AUTORES]

Composición Química	% Nominal	Peso Atómico	# atómico
Carbono (C)	0.43	12	6
Manganeso (Mn)	1	54.9380	25
Silicio (Si)	0.35	28.08	14
Fosforo (P)	0.035	30.974	15
Azufre (S)	0.04	32.065	16
Hierro (Fe)	Balance	55.847	26
Cromo (Cr)	1.1	52.996	24
Molibdeno (Mo)	0.25	95.94	42

Se realiza su estructura electrónica para conocer el número de intercambio de electrones ( $n_i$ ).

$$C(6) = 1s^2 \cdot \underbrace{2s^2 \cdot 2p^2} = 4$$

$$\begin{aligned} Mn(25) &= 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot 3s^2 \cdot 3p^6 \cdot 4s^2 \cdot 3d^5 \\ &\rightarrow 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot 3s^2 \cdot 3p^6 \cdot 3d^5 \cdot \underbrace{4s^2} = 2 \end{aligned}$$

$$Si(14) = 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot \underbrace{3s^2 \cdot 3p^2} = 4$$

$$F(15) = 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot \underbrace{3s^2 \cdot 3p^3} = 5$$

$$S(16) = 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot \underbrace{3s^2 \cdot 3p^4} = 6$$

$$\begin{aligned} Fe(26) &= 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot 3s^2 \cdot 3p^6 \cdot 4s^2 \cdot 3d^6 \\ &\rightarrow 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot 3s^2 \cdot 3p^6 \cdot 3d^6 \cdot \underbrace{4s^2} = 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cr(24) &= 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot 3s^2 \cdot 3p^6 \cdot 4s^2 \cdot 3d^4 \\ &\rightarrow 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot 3s^2 \cdot 3p^6 \cdot 3d^4 \cdot \underbrace{4s^2} = 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mo(42) &= 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot 3s^2 \cdot 3p^6 \cdot 4s^2 \cdot 3d^{10} \cdot 4p^6 \cdot 5s^2 \cdot 4d^4 \\ &\rightarrow 1s^2 \cdot 2s^2 \cdot 2p^6 \cdot 3s^2 \cdot 3p^6 \cdot 3d^{10} \cdot 4s^2 \cdot 4p^6 \cdot 4d^4 \cdot \underbrace{5s^2} = 2 \end{aligned}$$

Luego de conocer el número de intercambio de electrones y las características químicas del material, se aplica la siguiente ecuación para encontrar el peso equivalente del material.

$$N_{eq} = \sum \left( \frac{f_i \cdot n_i}{a_i} \right), \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

$f_i$  = Fracción de masa (g)

$n_i$  = Intercambio de electrones

$a_i$  = Peso atómico

$$N_{eq} = \left( \frac{0.43 \times 4}{12} \right) + \left( \frac{1 \times 2}{54.9380} \right) + \left( \frac{0.35 \times 4}{28.08} \right) + \left( \frac{0.04 \times 6}{32.065} \right) + \left( \frac{96.795 \times 2}{55.847} \right) + \left( \frac{1.1 \times 2}{52.996} \right) + \left( \frac{0.25 \times 2}{95.94} \right)$$

$$N_{eq} = 3.756$$

Finalmente, el peso equivalente se debe dividir 1 sobre el  $N_{eq}$  como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{eq} = \frac{1}{N_{eq}}, \quad \text{Ecuación 5}$$

$$P_{eq} = \frac{1}{3.756} = 0.2662$$

Otros datos básicos del material necesarios para el análisis en el programa:

- PH= 7 del medio electrolítico salmuera

- PH=6,5 del medio electrolítico ácido acético
- Densidad=  $0,2662 \frac{g}{cm^3}$  del material de trabajo
- Área de contacto con probetas:

$$A_1 = 0.95cm^2 \text{ para la celda electroquímica 1}$$

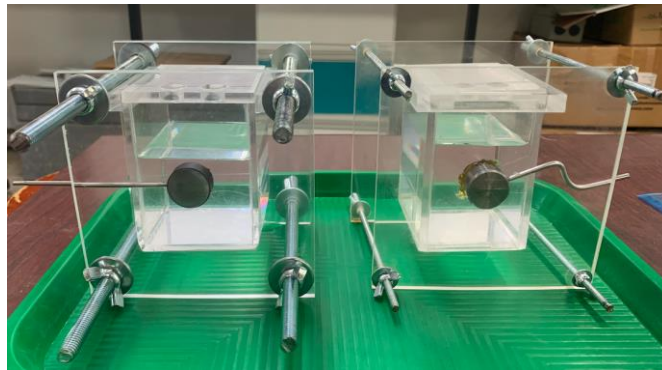
$$A_2 = 0.95cm^2 \text{ para la celda electroquímica 2}$$

$$A_3 = 0.50cm^2 \text{ para la celda electroquímica 3}$$

$$A_4 = 0.70cm^2 \text{ para la celda electroquímica 4}$$

## 6.7 MONTAJE DE PROBETAS EN CELDAS ELECTROQUÍMICAS

Para el montaje de las probetas con las celdas electroquímicas, primero se fijaron las probetas acero AISI/SAE 4140 entre un sello de caucho y la tapa superior de acrílico, **Figura 13**, asegurando que por el orificio quedara expuesta una de las caras de las probetas con el medio electrolítico seleccionado para esa prueba y que no hubiera pérdidas de este. El nivel de la solución debía superar la altura del sello para mantener toda el área de exposición constante.

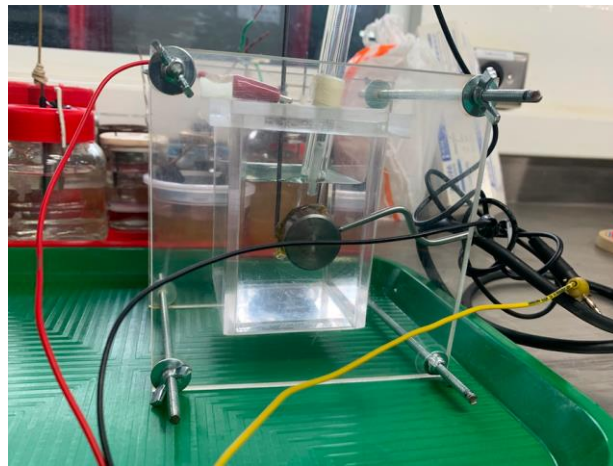


**Figura 13.** Montaje probetas en celda y electrodo de trabajo. Fuente: [AUTORES]

Posterior al montaje de las probetas, se ubicaron los siguientes electrodos: el electrodo de trabajo, **Figura 13**, electrodo de referencia y el contraelectrodo, **Figura 14**.



**Figura 14.** Electrodo de referencia (verde) y contraelectrodo (rojo). Fuente: [AUTORES]



**Figura 15.** Montaje final para la prueba. Fuente: [AUTORES]

### 6.7.1 PROBETAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO Y SIN TRATAMIENTO

Las pruebas para determinar la velocidad de corrosión del acero AISI SAE 4149, se realizaron en intervalos de 24 horas, en exposición al medio electrolítico (ácido acético y salmuera) las cuales iniciaron al momento del montaje en cero horas y finalizando en 96 horas. Se montaron dos probetas: con tratamiento térmico y sin tratamiento térmico en diferentes celdas al mismo tiempo, donde se realizaron las pruebas electroquímicas como la resistencia a la polarización lineal (RPL) y extrapolación de las pendientes de Tafel.

### 6.8 DESARROLLO DE LA PRUEBA

Luego de tener el montaje listo con las probetas, los cálculos respectivos y las conexiones, se procedió a iniciar el programa del equipo Potenciostato – Galvanostato, **Figura 16**, en base a las recomendaciones del docente a cargo. A través de un computador suministrado

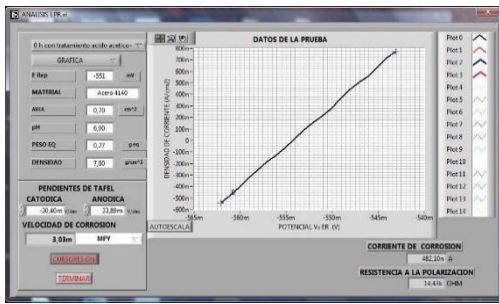
por el laboratorio CECEND se abre el programa controlador el cual está conectado el equipo Potenciostato – Galvanostato. En su página principal muestra las diferentes pruebas que se pueden realizar con el equipo, en este caso se realizaron pruebas de resistencia a la polarización lineal y extrapolación de las pendientes de Tafel.



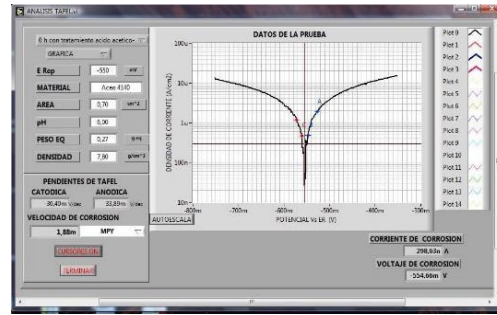
**Figura 16.** Página principal del programa. Fuente: [AUTORES]

## 7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para determinar la velocidad de corrosión de las probetas con tratamiento térmico y sin tratamiento, que estuvieron sometidas a los medios de ataque (ácido acético y salmuera), en diferentes periodos de tiempo (0 horas, 24 horas, 48 horas, 72 horas, 96 horas), el programa arrojó los resultados de las gráficas correspondientes que se fueron a analizar. Primero, las curvas de extrapolación TAFEL dieron como resultado las pendientes anódicas y catódicas, con estos mismos valores se determinaron las curvas de resistencia a la polarización lineal, obteniendo la velocidad de corrosión de cada probeta en los tiempos de exposición determinados, **Figura 17 y 18**.



**Figura 17.** Resistencia a la polarización



**Figura 18.** Curvas de extrapolación TAFEL

Luego de finalizar el análisis de las pruebas en el programa, se recolectaron los datos para generar las gráficas en la hoja de cálculo Excel, según su tipo de agente de exposición corrosivo, si tuvieron un tratamiento térmico o no y por último se clasificaron según el periodo de tiempo, con el fin de determinar y comparar la velocidad de corrosión en cada una de ellas.

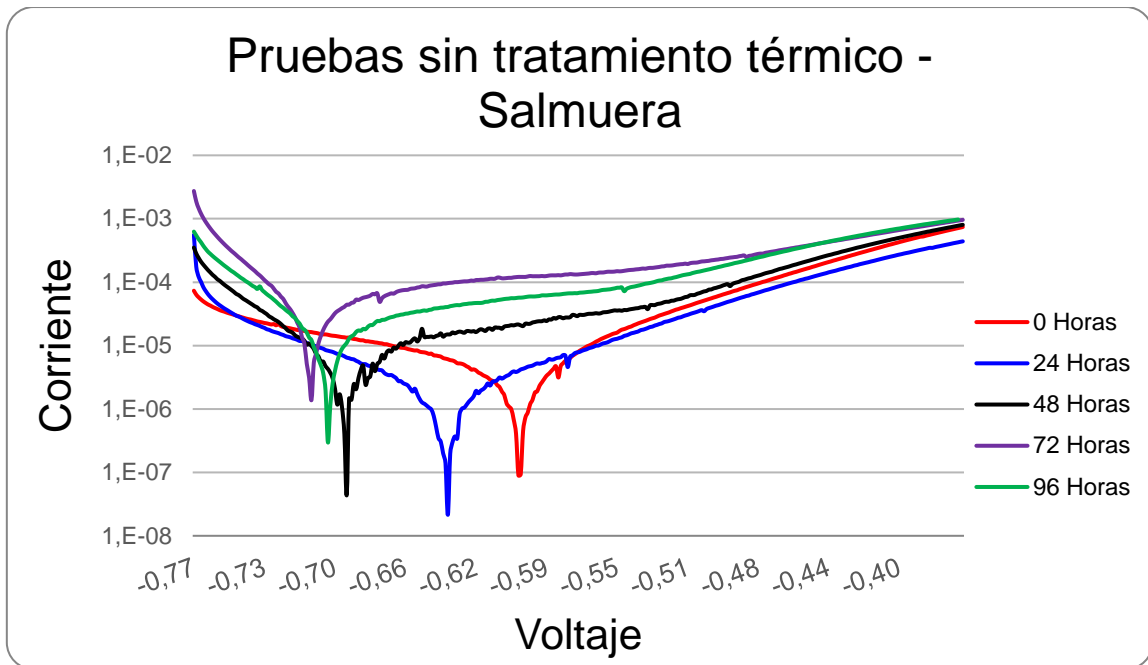
En las siguientes graficas se puede observar los diferentes comportamientos que tiene el material y para resaltar cada periodo de tiempo se le asigno un color respectivo:

- 0 horas color rojo
- 24 horas color azul
- 48 horas color marrón
- 72 horas color violeta
- 96 horas color verde

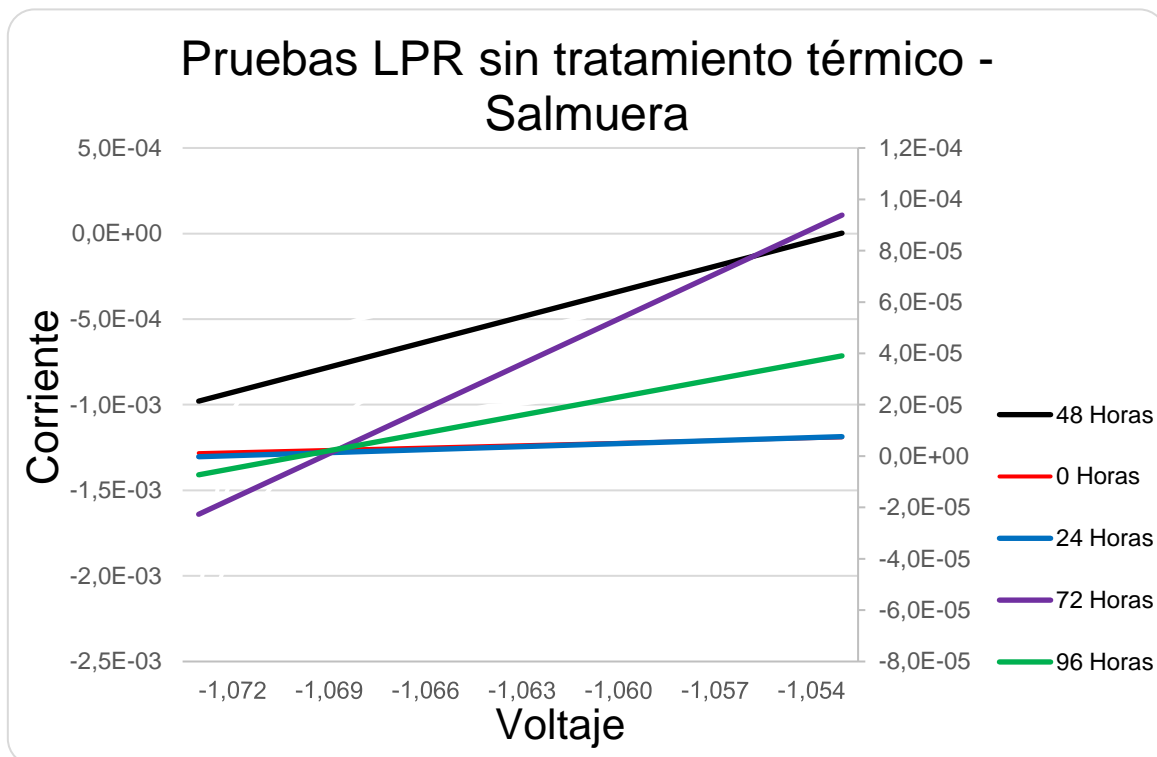
## 7.1 RESULTADOS OBTENIDOS

### 7.1.1 PRUEBAS SIN TRATAMIENTO TERMICO EN SALMUERA

Los resultados obtenidos en las pruebas que se realizaron con las probetas expuestas a salmuera y que no tuvieron un proceso de tratamiento térmico, demuestra que su comportamiento es variable en los diferentes periodos de tiempo; el voltaje y la corriente generalmente no se muestran constantes, a diferencia de las líneas a 0 horas y 24 horas, en la que su tendencia fue similar, debido a que las probetas en esos periodos de tiempo no habían generado su capa de óxido protectora, **Gráfica 2**.



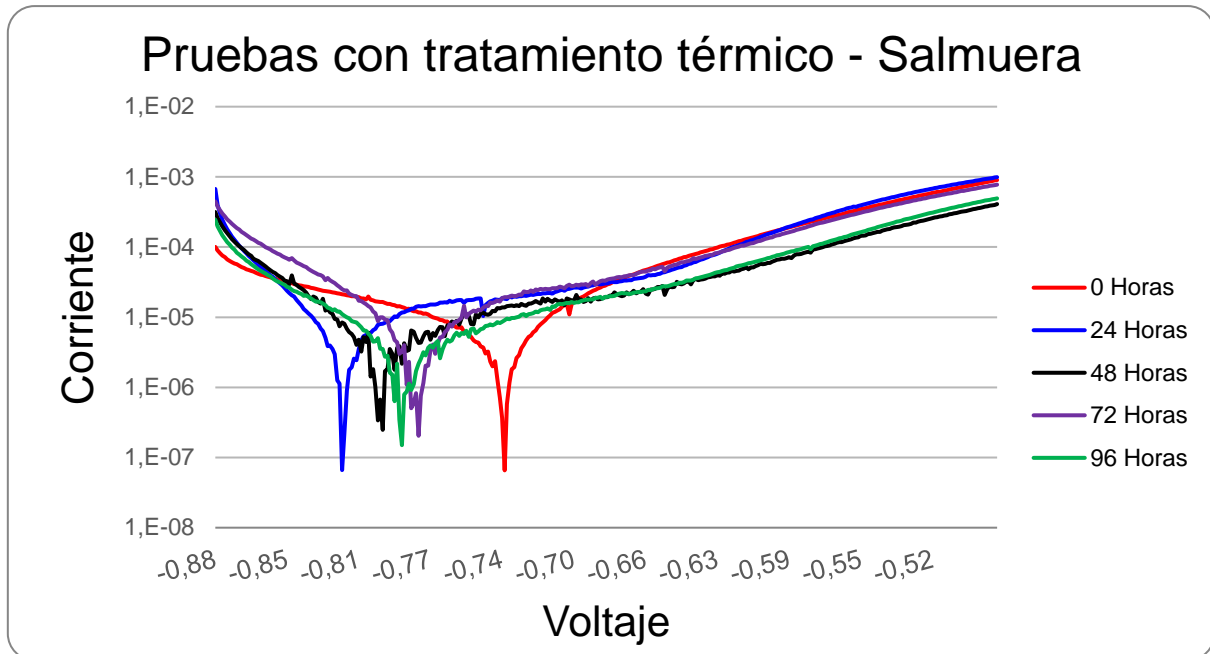
**Gráfica 1.** Curvas de extrapolación TAFEL sin tratamiento térmico expuesto en Salmuera.



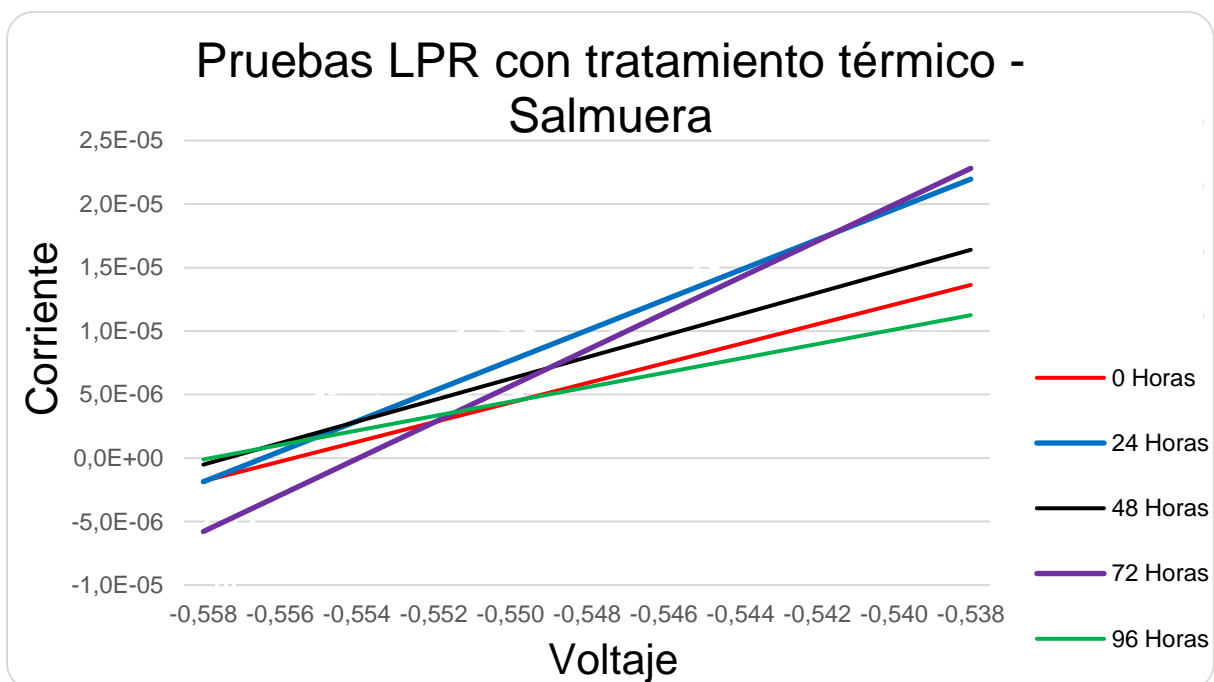
**Gráfica 2.** Curvas de resistencia a la polarización sin tratamiento térmico expuesto en Salmuera

### 7.1.2 PRUEBAS CON TRATAMIENTO TERMICO EN SALMUERA

Se puede observar que los resultados de las pruebas con las probetas expuestas a salmuera y que tuvieron un proceso de tratamiento térmico, variaron durante el tiempo de exposición con el agente corrosivo, indicando notablemente los cambios entre cada periodo de tiempo, **Gráfica 4.**



**Gráfica 3.** Curvas de extrapolación TAFEL con tratamiento térmico expuesto en Salmuera.

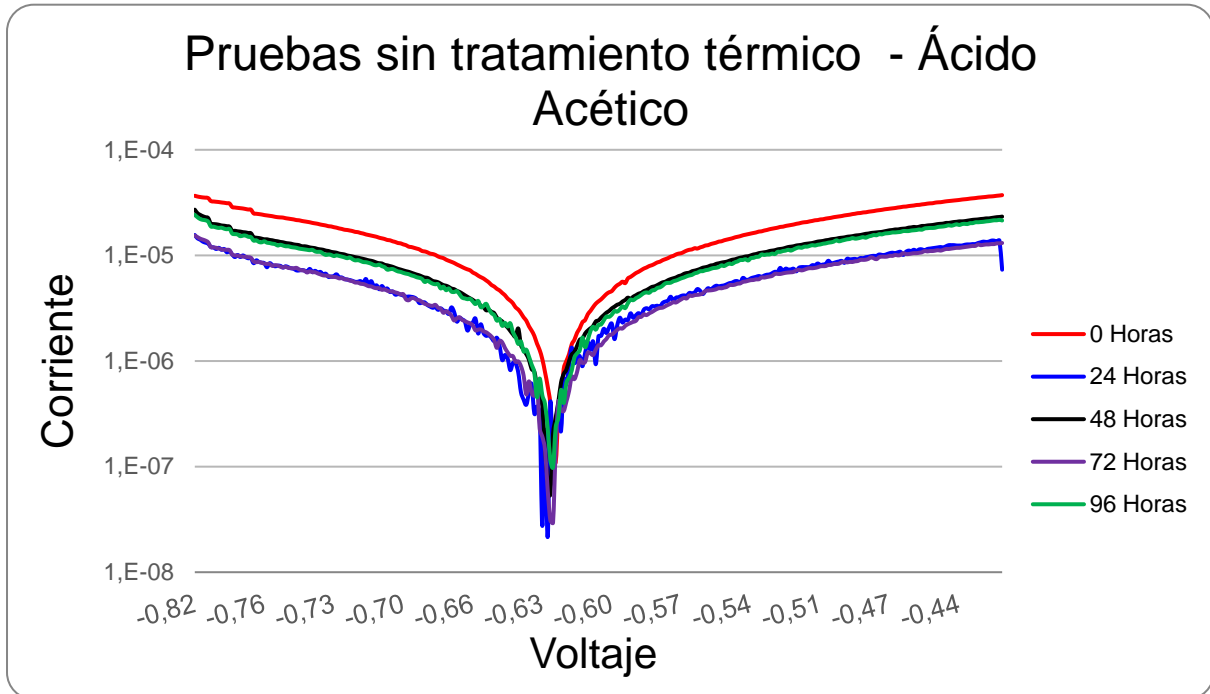


**Gráfica 4.** Curvas de resistencia a la polarización con tratamiento térmico expuesto en Salmuera

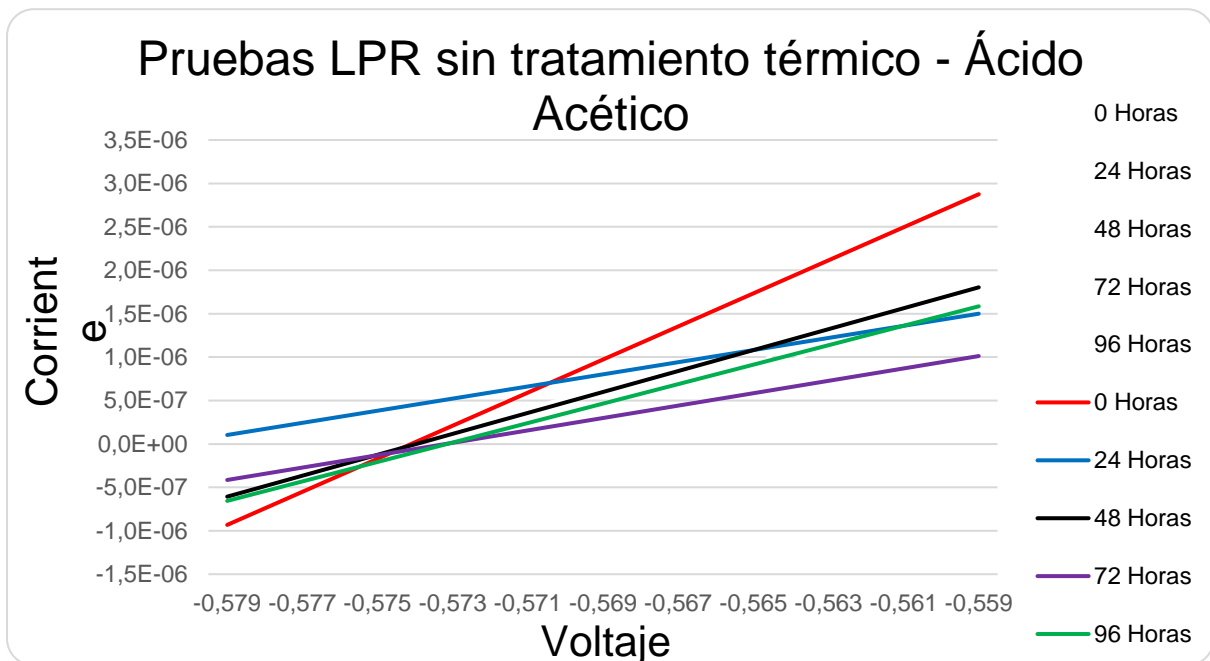


### 7.1.3 PRUEBAS SIN TRATAMIENTO TERMICO EN ACIDO ACETICO

Los resultados de las probetas expuestas en Ácido Acético se diferencian notablemente de las que estuvieron sometidas en salmuera, debido a que el comportamiento de estas fue más uniforme en cuanto a las curvas de extrapolación TAFEL, mientras que el comportamiento de las curvas de resistencia a la polarización lineal varió en los diferentes periodos de tiempo, **Gráficas 5 y 6**.



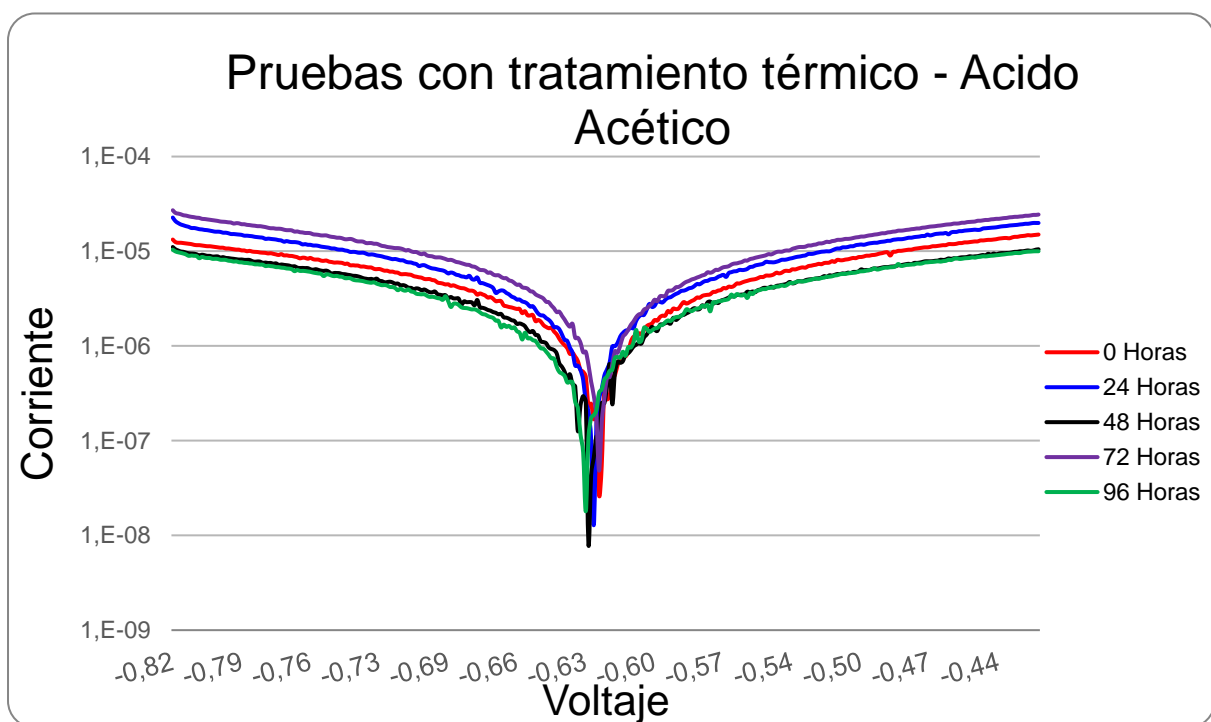
**Gráfica 5.** Curvas de extrapolación TAFEL sin tratamiento térmico expuesto en Ácido Acético.



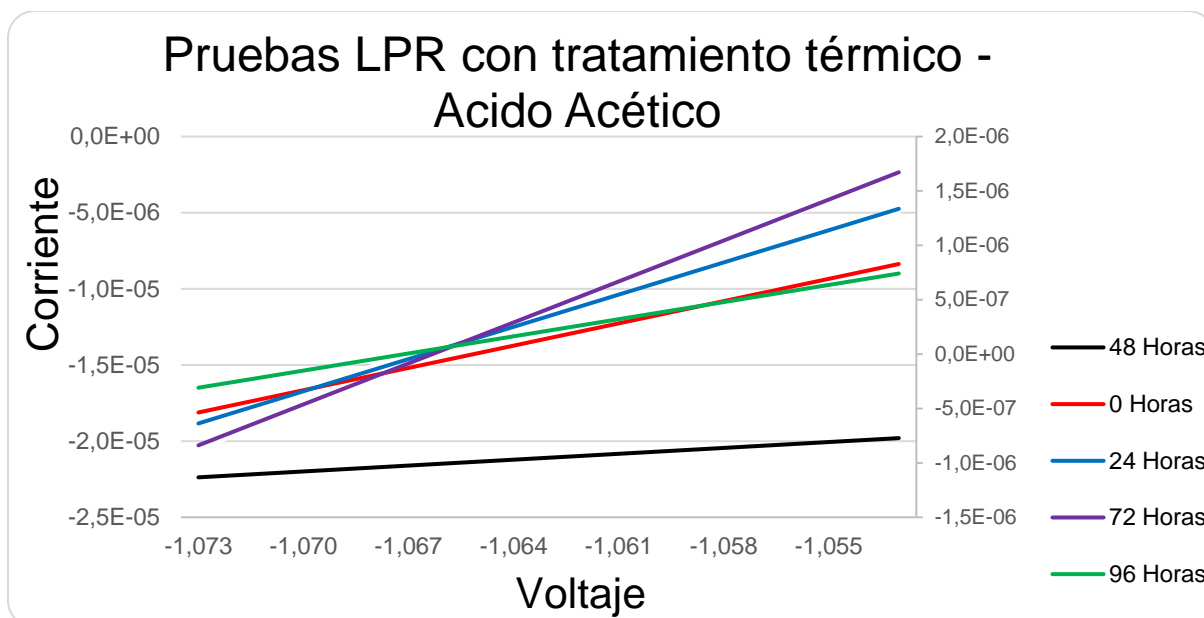
**Gráfica 6.** Curvas de resistencia a la polarización sin tratamiento térmico expuesto en Ácido Acético.

#### 7.1.4 PRUEBAS CON TRATAMIENTO TERMICO EN ÁCIDO ACÉTICO

Al igual que las pruebas sin tratamiento térmico expuestas en ácido acético, los resultados de las que si tuvieron un proceso de tratamiento térmico, su tendencia es muy similar, las curvas de extrapolación TAFEL generadas son similares, **Grafica 7**, y para las curvas de resistencia a la polarización se puede observar que las líneas en los periodos de 0 horas, 24 horas, 72 horas y 96 horas, están dentro de un mismo rango de operación en cuanto a la corriente, a diferencia de la línea de 48 horas, en la que su rango de operación de corriente esta entre  $-2,5 \times 10^{-5} A$  y  $-2,0 \times 10^{-5} A$ , **Grafica 8**.



**Grafica 7.** Curvas de extrapolación TAFEL con tratamiento térmico expuesto en Ácido Acético.



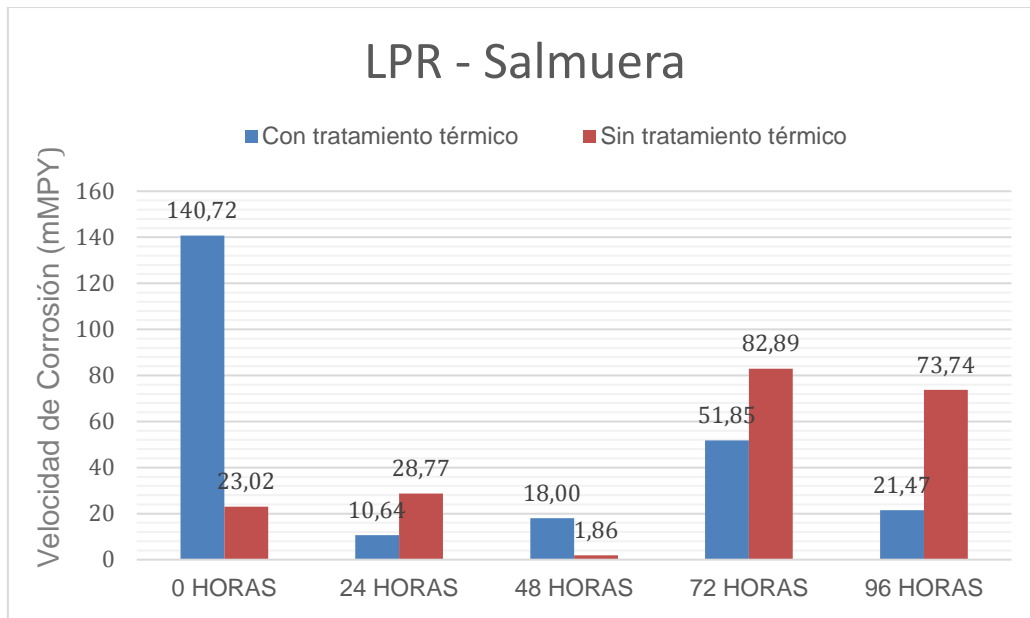
**Gráfica 8.** Curvas de resistencia a la polarización con tratamiento térmico expuesto en Ácido Acético.

## 7.2 ANALISIS DE RESULTADOS

### 7.2.1 ANALISIS DE LAS PROBETAS DE ACERO AISI SAE 4140 ATACADO EN SALMUERA

**Tabla 5:** Resultados de las curvas de resistencia a la polarización lineal pruebas en Salmuera

	ACERO 4140 ATACADO EN SALMUERA				
	Resistencia a la polarización lineal				
CON TRATAMIENTO TERMICO	0 HORAS	24 HORAS	48 HORAS	72 HORAS	96 HORAS
$\beta$ Catódica [mV/dec]	95,66	29,92	39,05	25,51	42,37
$\beta$ Anódica [mV/dec]	91,12	29,14	39,15	26,44	42,7
Corriente ( $i$ corrosión) [ $\mu$ A]	16,01	2,3	3,89	5,9	4,64
Resistencia a la Polarización [OHM]	1270	2790	2060	955,8	1990
Velocidad de Corrosión [mMPY]	140,72	10,64	18,00	51,85	21,47
SIN TRATAMIENTO TERMICO					
$\beta$ Catódica [mV/dec]	85,28	87,13	39,24	21,57	29,6
$\beta$ Anódica [mV/dec]	76,1	87,54	39,03	22,58	29,57
Corriente ( $i$ corrosión) [ $\mu$ A]	4,97	6,22	211,82	17,91	8,39
Resistencia a la Polarización [OHM]	3510	3050	53,97	267,4	765,74
Velocidad de Corrosión [mMPY]	23,02	28,77	1,86	82,89	73,74

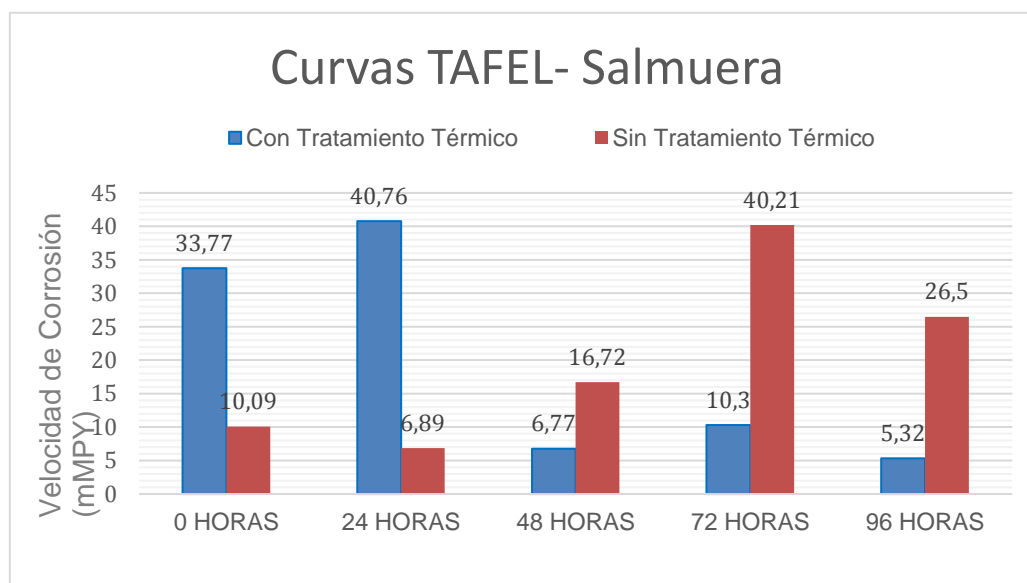


**Gráfica 9.** Comparativo Velocidad De Corrosión Vs Tiempo.

En la **Gráfica 9** se logra evidenciar el comportamiento del material en sus dos estados (con tratamiento térmico y sin tratamiento térmico) expuesto con el agente corrosivo salmuera al 3,5% en peso, a determinados tiempos como se explicó anteriormente. Analizando el grafico se puede determinar que a las 0 horas el material con tratamiento térmico tuvo una velocidad aproximada 7 veces mayor que el material sin tratamiento, debido a que al realizarle el tratamiento térmico y la limpieza, queda expuesto directamente a corrosión, por lo tanto el material no alcanza a generar la capa corrosiva protectora. Mientras que, a las 24 horas el material con tratamiento térmico bajó su velocidad de 140,72 mMPY a 10,64 mMPY reduciendo notablemente su cambio, ya que la probeta tuvo el tiempo para generar una capa protectora que evita que continúe la corrosión en el material. Para la probeta sin tratamiento térmico en los dos primeros periodos de tiempo, sufrió un aumento de velocidad corrosiva a 4,5 mMPY; a las 48 horas el material tuvo un comportamiento diferente al de la probeta con tratamiento térmico, en el que aumentaba su velocidad a diferencia de la probeta sin tratamiento que decaía por la generación de la capa protectora antes nombrada. Para los periodos de tiempo de 72 y 96 horas la velocidad de corrosión aumenta, manteniéndose casi estable entre estas dos fases, a diferencia de las otras probetas que tuvieron un proceso de tratamiento, su comportamiento es variable y finalmente termina por tener una velocidad mucho menor que las que no estuvieron sometidas al tratamiento.

**Tabla 6:** Resultados de las curvas de extrapolación TAFEL, pruebas en Salmuera

CON TRATAMIENTO TERMICO	Curvas de extrapolación TAFEL				
	0 HORAS	24 HORAS	48 HORAS	72 HORAS	96 HORAS
$\beta$ Catódica [mV/dec]	95,66	29,92	39,05	25,51	42,37
$\beta$ Anódica [mV/dec]	91,12	29,14	39,15	26,44	42,7
Corriente ( $i$ corrosión) [ $\mu$ A]	3,84	1,98	1,46	1,17	1,15
Voltaje de Corrosión [mV]	-610,2	-851,08	-797,88	-775,8	-815,83
Velocidad de Corrosión [mMPY]	33,77	40,76	6,77	10,3	5,32
SIN TRATAMIENTO TERMICO					
$\beta$ Catódica [mV/dec]	85,28	87,13	39,24	21,57	29,6
$\beta$ Anódica [mV/dec]	76,1	87,54	39,03	22,58	29,57
Corriente ( $i$ corrosión) [ $\mu$ A]	2,18	1,49	1,9	8,69	3,01
Voltaje de Corrosión [mV]	-600,44	-748,73	-838,94	-828,93	-827,3
Velocidad de Corrosión [mMPY]	10,09	6,89	16,72	40,21	26,5



**Gráfica 10.** Comparativo Velocidad De Corrosión Vs Tiempo.

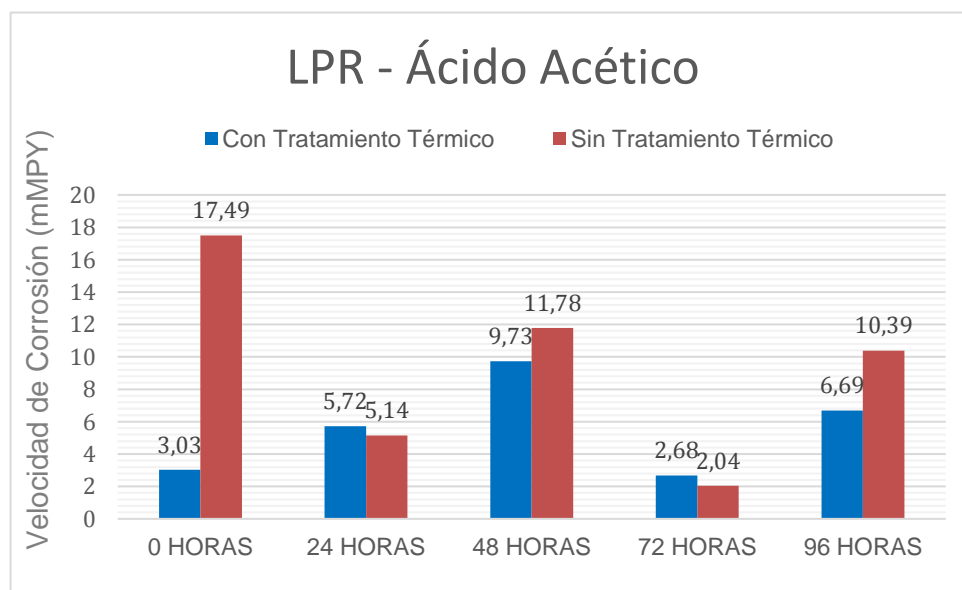
La **Gráfica 10** se realizó con la recolección de datos de las pruebas de curvas de extrapolación TAFEL, utilizando los parámetros adecuados. En esta gráfica se logra observar un comportamiento más estable; en la primera prueba a las 0 horas el material con tratamiento térmico al no tener la capa protectora tuvo una velocidad mayor que la del material en estado de suministro, la diferencia es 3 veces la velocidad de corrosión del material sin tratamiento térmico. A las 24 horas el material con tratamiento térmico tuvo un crecimiento en la velocidad mientras que el material en estado de suministro presentó una caída en la velocidad, la cual está dada gracias a la capa protectora en el material. Luego, se estabilizan las pruebas mostrando que el material con tratamiento térmico baja su velocidad de 40,76 mMPY a 6,77 Mmpy, lo cual sucede gracias a que el material ya generó la capa protectora y se mantiene estable en las siguientes pruebas, mientras que en el

material de suministro la velocidad aumentó y se mantuvo mucho mayor que la de la probeta en estado de suministro, casi 4 veces mayor que la del material con tratamiento térmico, lo cual nos da a entender que la influencia del tratamiento térmico en este material es conveniente.

## 7.2.2 ANALISIS DE LAS PROBETAS DE ACERO AISI SAE 4140 ATACANDO EN ÁCIDO ACÉTICO

**Tabla 7:** Resultados de las curvas de resistencia a la polarización lineal pruebas en Ácido Acético.

ACERO 4140 ATACADO EN ÁCIDO ACÉTICO					
Resistencia a la polarización lineal					
CON TRATAMIENTO TÉRMICO	0 HORAS	24 HORAS	48 HORAS	72 HORAS	96 HORAS
$\beta$ Catódica [mV/dec]	30,4	55,45	86,44	23,48	96,61
$\beta$ Anódica [mV/dec]	33,89	56,26	87,61	18,98	90,17
Corriente ( $i$ corrosión) [ $\mu$ A]	0,4821	1,24	1,55	0,57824	1,06
Resistencia a la Polarización [kOHM]	14,43	9,28	12,19	7,88	19,02
Velocidad de Corrosión [mMPY]	3,03	5,72	9,73	2,68	6,69
SIN TRATAMIENTO TÉRMICO					
$\beta$ Catódica [mV/dec]	48,08	53,15	97,36	20,04	91,21
$\beta$ Anódica [mV/dec]	48,09	52,52	96,01	21,03	91,91
Corriente ( $i$ corrosión) [ $\mu$ A]	1,99	0,8185	2,55	0,32475	2,25
Resistencia a la Polarización [kOHM]	5,25 k	14,01 k	8,24 k	13,72 k	8,85 k
Velocidad de Corrosión [mMPY]	17,49	5,14	11,78	2,04	10,39

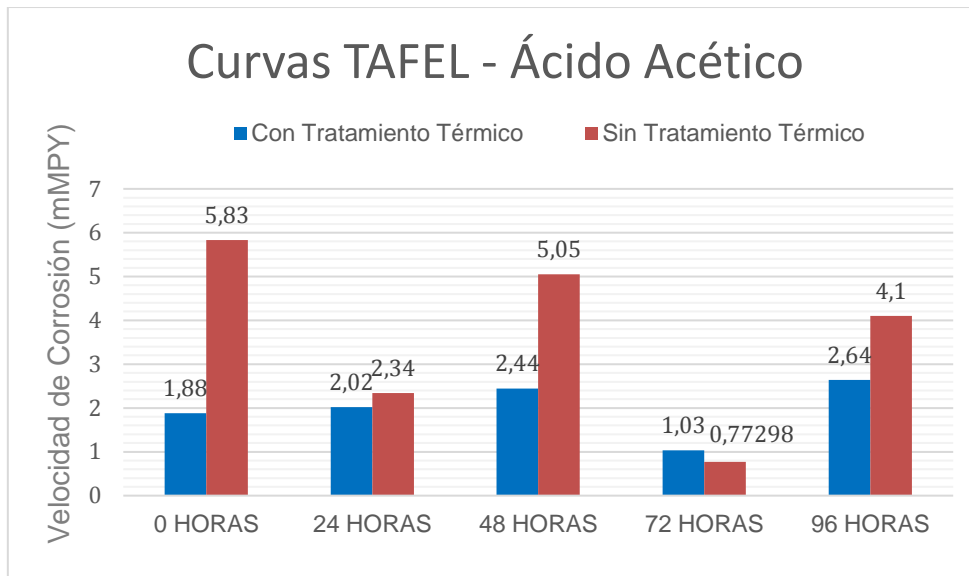


**Gráfica 11.** Comparativo Velocidad De Corrosión Vs Tiempo.

En la **Gráfica 11**, la cual fue realizada para el agente corrosivo ácido acético en el mismo material en sus dos estados (con tratamiento térmico y sin tratamiento térmico), se puede observar que su comportamiento es más estable con respecto a los datos arrojados para la salmuera. A las 0 horas el material con tratamiento térmico tuvo una baja velocidad de 3 mMPY, mientras que el material en suministro tuvo una velocidad de 17,49 mMPY, esto sucede porque el material creó la capa protectora de una manera más rápida que con el otro agente corrosivo. Luego, a las 24 horas el material en suministro baja su velocidad a 5,14 mMPY, mientras que la probeta con tratamiento térmico tiene una pequeña subida en su velocidad, esto puede suceder por que la capa protectora no es lo suficientemente estable para mantener la velocidad. A las 48 horas el material con tratamiento térmico sigue aumentando su velocidad, pero se mantiene debajo de la velocidad de la probeta en suministro, lo que quiere decir que la influencia del tratamiento térmico de bonificado es beneficioso.

**Tabla 8:** Resultados de las curvas de extrapolación TAFEL, pruebas en Salmuera

CON TRATAMIENTO TÉRMICO	Curvas de extrapolación TAFEL				
	0 HORAS	24 HORAS	48 HORAS	72 HORAS	96 HORAS
$\beta$ Catódica [mV/dec]	30,4	55,45	86,44	23,48	90,61
$\beta$ Anódica [mV/dec]	33,89	56,26	87,61	18,98	90,17
Corriente ( $i$ corrosión) [nA]	289,63	435,74	389,03	221,99	420,36
Voltaje de Corrosión [mV]	-554,66	-598,35	-626,52	-595,99	-629,96
Velocidad de Corrosión [mMPY]	1,88	2,02	2,44	1,03	2,64
CON TRATAMIENTO TÉRMICO					
$\beta$ Catódica [mV/dec]	48,08	53,15	97,36	20,04	91,21
$\beta$ Anódica [mV/dec]	48,09	52,52	96,01	21,03	91,91
Corriente ( $i$ corrosión) [nA]	663,56	372,84	1090	123,09	886,99
Voltaje de Corrosión [mV]	-576,21	-620,41	-605,59	-627,4	-584,54
Velocidad de Corrosión [mMPY]	5,83	2,34	5,05	0,77298	4,1



**Gráfica 12.** Comparativo Velocidad De Corrosión Vs Tiempo.

En la **Gráfica 12**, realizada con los datos respectivos de curvas de extrapolación TAFEL, se evidencia que su tendencia es similar a la gráfica anterior. En cuanto a la velocidad de corrosión el material con tratamiento térmico se mantuvo por debajo que la de la probeta sin tratamiento térmico a excepción de la prueba tomada a las 72 horas, en la cual, se puede evidenciar una decaída en la velocidad para ambas probetas. Para la probeta sin tratamiento, bajó un poco más que la del material tratado térmicamente, lo cual reitera el análisis anterior de las gráficas, en el que se comprueba que el tratamiento térmico de bonificado para las probetas de acero AISI/SAE 4140 es de gran relevancia para mantener controlado y/o disminuir su velocidad de corrosión en este.



## 8. CONCLUSIONES

- Se pudo evaluar el comportamiento de las probetas de acero AISI/SAE 4140, expuestas a dos medios corrosivos (salmuera y ácido acético), evidenciando la velocidad de corrosión que sufrían por medio de las técnicas electroquímicas de resistencia la polarización lineal y curvas de extrapolación TAFEL.
- Se determinó que, al realizar las dos técnicas electroquímicas, el tratamiento térmico de bonificado es de gran relevancia y favorece a que las probetas disminuyan su velocidad de corrosión ante un medio.
- Se establecieron las temperaturas y los tiempos adecuados para realizar los tratamientos térmicos de bonificado a las probetas de acero AISI/SAE 4140.
- Se realizó correctamente el proceso de tratamiento térmico a las probetas, asegurando que la técnica aplicada, fuera de tratamiento térmico de bonificado.

## 9. RECOMENDACIONES

- Se debe tener en cuenta que la técnica electroquímica de curvas de polarización no es tan exacta como las de resistencia a la polarización, ya que estas dependen de la manipulación de la persona que esté operando el software para obtener las pendientes catódicas y anódicas.
- A la hora de realizar la conexión del equipo Potenciostato-Galvanostato, se debe asegurar que todo este correctamente conectado con los electrodos y el software, para evitar errores en los valores arrojados.
- Se deben preparar correctamente los agentes de ataque corrosivo, con la cantidad exacta de cada uno de ellos, asegurándose que la preparación quede homogénea, para obtener un mejor análisis en cada probeta expuesta a ellos.
- Para poder obtener un mejor análisis en cuanto a la velocidad de corrosión, se deben realizar las pruebas a las probetas de Acero AISI/SAE 4140 en un período de tiempo mayor, y así evidenciar la estabilidad que se genera debido a que las probetas crean la capa de óxido protectora.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Zarras and J. D. Stenger-Smith, "1. Corrosion processes and strategies for prevention: an introduction," in *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection*, A. S. Hamdy Makhoulouf, Ed. Woodhead Publishing, 2014, pp. 3–28.
- [2] D. A. Fadare and T. G. Fadara, "Corrosion Resistance of Heat-Treated NST 37-2 Steel in Hydrochloric Acid Solution," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 1, pp. 1–7, 2013.
- [3] J. L. Marulanda Arévalo, J. L. Trisancho Reyes, and H. Á. González Betancourt, *Rociado Térmico*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.
- [4] M. V. Moraleta Biezma and J. R. San Cristóbal Mateo, "Análisis económico de la corrosión," *Univ. Cantab.*, vol. 418, pp. 93–96, 2004.
- [5] N. Cinca, R. C. Camello Lima, and M. J. Guilemany, "An overview of intermetallics research and application: Status of thermal spray coatings," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 75–86, 2013.
- [6] R. A. Rapp and Y. S. Zhang, "Hot Corrosion of Materials : Fundamental Studies," *J. Miner. Met. Mater. Soc.*, vol. 46, no. 12, pp. 47–55, 1994.
- [7] D. M. Osorio Alzate, "Estudio de la corrosión sufrida a altas temperaturas por sales fundidas en aceros para caldera tipo ASTM A193 y ASTM A53," Universidad Tecnológica de Pereira, 2017.
- [8] J. F. Ma SanZapata, *Diseño de elementos de Máquinas I*. Piura, Perú: Universidad de Piura, 2013.
- [9] F. Díaz del Castillo Rodríguez, "Los nuevos aceros para la industria automotriz," Cuautitlán, México, 2009.
- [10] A. Bravos, "Aceros aleados." p. 1.
- [11] C. Liu, D. Ju, and T. Inoue, "A Numerical Modeling of Metallo-thermo-mechanical Behavior in Both Carburized and Carbonitrided Quenching Processes," *ISIJ Int.*, vol. 42, no. 10, pp. 1125–1134, 2002.
- [12] S. I. S. . de C.V., "Acero SISA 4140T Tratado y Revenido." México, p. 2.
- [13] W. F. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Cuarta. México: McGraw-Hill Book Education, 2006.
- [14] A. International, *Heat Treating*. United States: ASM International, 1991.
- [15] J. Trisancho, J. Chacon-Nava, C. Gaona-Tiburcio, and J. G. Gonzalez-Rodríguez, "Hot Corrosion Behaviour of NiCrFeNbMoTiAl Coating in Molten Salts at 700 °C by Electrochemical Techniques," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 6, pp. 432–441, 2011.

- [16] J. L. Tristancho Reyes, F. Almeraya, and J. Chacón, "Estudio de la corrosión por sales fundidas en el recubrimiento NiCrFeNbMoTiAl, depositado por plasma spray," *Sci. Tech. Año XVI*, vol. 44, pp. 379–383, 2010.
- [17] "ASTM G102 - 89(2015)e1, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements," in *Annual book of ASTM standards, metals test methods and analytical procedures*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [18] M. Stern and A. L. Geary, "Electrochemical Polarization," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 104, no. 1, pp. 56–63, 1957.
- [19] "ASTM G59-97e1, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements," in *Annual book of ASTM standards, metals test methods and analytical procedures*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 1997.
- [20] P. J. Maroni, *Templabilidad: Un Metodo para seleccionar Aceros*. Buenos Aires: Editorial Librería Mitre, 1976.
- [21] C. A. López Robayo, C. F. Muñoz Buitrago, and J. F. Cuellar Higuera, "Influencia del tratamiento térmico de temple a temperaturas intercríticas en las propiedades mecánicas del acero AISI SAE 1018," Universidad Libre, 2014.
- [22] J. M. Sánchez-Amaya, M. Bethencourt, L. Gonzalez-Rovira, and F. J. Botana, "Medida de ruido electroquímico para el estudio de procesos de corrosión de aleaciones metálicas," *Rev. Metal.*, vol. 45, no. 2, pp. 143–156, 2009.