

**EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN CONCRETO REFORZADO POR MÉTODOS  
ELECTROQUÍMICOS**

**LUIS EFRAIN BASTIDAS BASTIDAS**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE  
INGENIERA MECÁNICA**

**DIRECTOR:**

**Ph.D. JOSÉ LUIS TRISTANCHO REYES**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PEREIRA**

**2018**

Pereira, Septiembre de 2018

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director de proyecto

## **DEDICATORIA**

Luis Efrain Bastidas Bastidas

A mi padre Franco Luis y a mi madre Ana Lucia ya que fueron mi guía, mi motivación para siempre seguir adelante y cumplir con mis metas a cabalidad. A mis hermanas Johanna y Carolina por ser mis compañeras y ejemplo a seguir. A mi novia Ana Sofía por ser mi apoyo y guía en este proceso y a mis amigos Cesar Augusto, Julián y Max por compartir conmigo este camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al P.hd José Luis Trisancho Reyes por su apoyo y sus enseñanzas brindadas durante esta investigación y en la carrera.

Al grupo CECEND por el acompañamiento brindado en el laboratorio.

A los docentes y demás personas que fueron parte integral de este camino.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	9
1. MARCO TEÓRICO .....	12
1.1 CORROSION.....	12
1.1.1 CORROSIÓN EN METALES .....	12
1.1.2 CORROSIÓN DEL ACERO REFORZADO .....	13
1.2 CONCRETO REFORZADO .....	14
1.3 ACERO DE REFUERZO .....	14
1.4 ACERO NTC 2289 (ASTM A706/A706M).....	15
1.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS .....	15
1.5.1 CURVAS DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL .....	15
1.5.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL .....	16
2. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS .....	18
2.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS Y EL MEDIO ELECTROLÍTICO (MEDIO O AMBIENTE CORROSIVO) .....	18
2.1.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS .....	18
2.1.2 EL MEDIO ELECTROLÍTICO .....	21
2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL - MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS .....	23
2.2.1 SOFTWARE PARA TOMA DE DATOS .....	25
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	27
3.1 RESULTADO DEL ESTADO DE LAS PROBETAS .....	27
3.2 RESULTADOS OBTENIDOS.....	28
3.3 ANALISIS DE RESULTADOS.....	29
3.3.1 PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA COMO MEDIO DE CORROSION .....	30
3.3.2. PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA CON SALMUERA COMO MEDIO DE CORROSION.....	34
4. CONCLUSIONES.....	40
5. RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA .....	42

## LISTA FIGURAS

Figura 1 Mercado del cemento en Colombia .....	9
Figura 2 Representación de una celda electroquímica .....	13
Figura 3 Diagrama de Tafel .....	16
Figura 4 Diagrama de la Resistencia a la polarización .....	17
Figura 5 Dimensiones acero de refuerzo suministrado. ....	19
Figura 6 Acero de refuerzo suministrado .....	19
Figura 7 Varillas de acero cortadas a una longitud de 6 pulgadas .....	20
Figura 8 Preparación de la mezcla de concreto .....	20
Figura 9 Moldes para la elaboración de los especímenes .....	21
Figura 10 Vaciado de probetas.....	21
Figura 11 Adecuación de los diferentes medios de corrosión: Tanque izquierda: agua como medio de corrosión. Tanque derecha: agua con 3,5% de salmuera como medio de corrosión .....	22
Figura 12 Probeta señalando el electrodo de trabajo.....	22
Figura 13 Probeta señalando el electrodo de referencia.....	22
Figura 14 Contraelectrodo (barra de grafito) .....	22
Figura 15 Celda electroquímica .....	23
Figura 16 Equipo un potencióstato - galvanostato PG-TEKCORR 4.2 USB .....	24
Figura 17 Fotografía tomada al montaje realizado para la toma de datos en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Tecnológica de Pereira .....	24
Figura 18 Pantalla de inicio del programa: Fotografía tomada en el computador donde se encuentra el programa en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Tecnológica de Pereira. ....	25
Figura 19 Fotografía tomada a la pantalla del computador donde se muestran los datos utilizados en el programa “PG 01X18E1CE6” .....	26
Figura 20 Resultado final de probetas sumergidas en agua .....	27
Figura 21 Resultado final de probetas sumergidas en agua con salmuera .....	27
Figura 22 Resultado curvas Tafel con información de las pendientes anódicas y catódicas (Periodo 1- probeta 1 sumergida en agua) .....	28

Figura 23 Resultado de curvas de resistencia a la polarización con información de las pendientes anódicas y catódicas dada por el resultado de curvas de Tafel (Periodo 1- probeta 1 sumergida en agua)..... 29

**LISTA TABLAS**

Tabla 1 Características dimensionales y propiedades mecánicas acero de refuerzo implementado . 19

Tabla 2 datos suministrados a el programa computacional “PG 01X18E1CE6”..... 25

Tabla 3 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 1 sumergida en agua31

Tabla 4 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 2 sumergida en agua32

Tabla 5 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 3 sumergida en agua34

Tabla 6 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 1 sumergida en agua con salmuera..... 35

Tabla 7Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 2 sumergida en agua con salmuera..... 37

Tabla 8 Tabla 7Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 3 sumergida en agua con salmuera ..... 38

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1 Curvas de extrapolación Tafel probeta 1 sumergida en agua.....	30
Grafica 2 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 1 sumergida en agua.....	30
Grafica 3 Curvas de extrapolación Tafel probeta 2 sumergida en agua.....	31
Grafica 4 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 2 sumergida en agua.....	32
Grafica 5 Curvas de extrapolación Tafel probeta 3 sumergida en agua.....	33
Grafica 6 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 3 sumergida en agua.....	33
Grafica 7 Curvas de extrapolación Tafel probeta 1 sumergida en agua con salmuera.....	34
Grafica 8 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 1 sumergida en agua con salmuera.....	35
Grafica 9 Curvas de extrapolación Tafel probeta 2 sumergida en agua con salmuera.....	36
Grafica 10 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 2 sumergida en agua con salmuera .....	36
Grafica 11 Curvas de extrapolación Tafel probeta 3 sumergida en agua con salmuera.....	37
Grafica 12 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 3 sumergida en agua con salmuera .....	38

## INTRODUCCIÓN

Edificar y construir ha sido una constante a lo largo de la historia del hombre, puesto que siempre ha sido necesario crear condiciones óptimas de habitabilidad; el concreto es uno de los materiales omnipresentes y prioritarios en la construcción de viviendas, edificios, puentes y todo tipo de edificaciones.

El concreto es una mezcla de arena, cemento y grava que al unirse con agua se endurece en formaletas con la forma y dimensiones deseadas. La importancia de este en los proyectos de infraestructura radica en su versatilidad y desarrollo de tecnologías que lo han llevado a límites insospechados en su desempeño, usos y aplicaciones (ARANA, 2016). En la actualidad, es el material de construcción más utilizado en el mundo puesto que su consumo supera al resto de los materiales, así mismo en la industria colombiana de cemento, como menciona Latorre, esta ha presentado comportamientos volátiles e inesperados: registrando crecimientos considerables a finales de los noventa, después fluctuando hacia una crisis en 2005, y en adelante un crecimiento persistente (CAÑÓN, 2008). Analistas locales e internacionales estiman que para el 2020 la industria del cemento experimentará un crecimiento cercano al 50% con respecto al consumo del 2012. (HERNANDEZ, 2017).



Figura 1 Mercado del cemento en Colombia

<https://www.larepublica.co/infraestructura/cemento-local-una-competencia-mas-roja-que-gris-2510991>

El concreto es un material muy resistente a esfuerzos de compresión, pero débil a los de tracción y corte; por esto debe combinarse con el acero, el cual es resistente a los esfuerzos mencionados (CAÑÓN, 2008), cuando se unen debidamente estos dos materiales, mediante un diseño estructural, se da lugar al concreto reforzado, este es usado por su simplicidad de fabricación, diseño, durabilidad, bajo costo de mantenimiento y mínimo consumo de energía.

A pesar de las buenas características mencionadas anteriormente, se observa un deterioro de las estructuras debido a la corrosión; definida como la destrucción lenta y progresiva de un metal por la acción de un agente exterior, uno de los factores que limitan la vida de las piezas metálicas es el ataque químico o físico-químico que sufren en el medio que les rodea (CUESTA, 2001) afectando significativamente las características funcionales del concreto armado, tales como la adherencia, la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete la integridad estructural. (DEL VALLE MORENO, PÉREZ López, & MARTINEZ Madrid, 2001)

Entre los factores que desencadenan la oxidación del acero de refuerzo se encuentra: la dosificación del concreto, espesor del recubrimiento, existencia de fisuras además de la humedad ambiental, efecto del oxígeno, efecto de la temperatura, estado superficial del acero, los esfuerzos de tensión en el acero, las corrientes de interferencia, el contacto galvánico entre dos metales, iones despasivantes, cloruros, sulfatos, carbonatación y lixiviación (ROJAS, 2008)

Debido a la problemática que genera la corrosión en las estructuras de concreto reforzado surge como proyecto evaluar el comportamiento del acero de refuerzo en diferentes ambientes corrosivos mediante técnicas electroquímicas (resistencia a la polarización lineal RpL y curvas de polarización CP).

Estas técnicas buscan introducir una señal eléctrica en el sistema que se estudia y obtener información del mismo, analizando la respuesta eléctrica que genera a dicha señal, gracias a esto se pueden realizar estudios del material como son: determinación del potencial de corrosión, análisis de Tafel, curvas de polarización, impedancia electroquímica, análisis de

corrosión localizada, además de poder determinar parámetros tan importantes como la velocidad de corrosión, potencial de protección, resistencia de polarización, potencial de ruptura, etc. (LOPEZ)

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, el proyecto a realizar tiene como finalidad estudiar, observar y evaluar la corrosión por la humedad ambiental y los cloruros en el concreto reforzado mediante técnicas electroquímicas.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 CORROSION

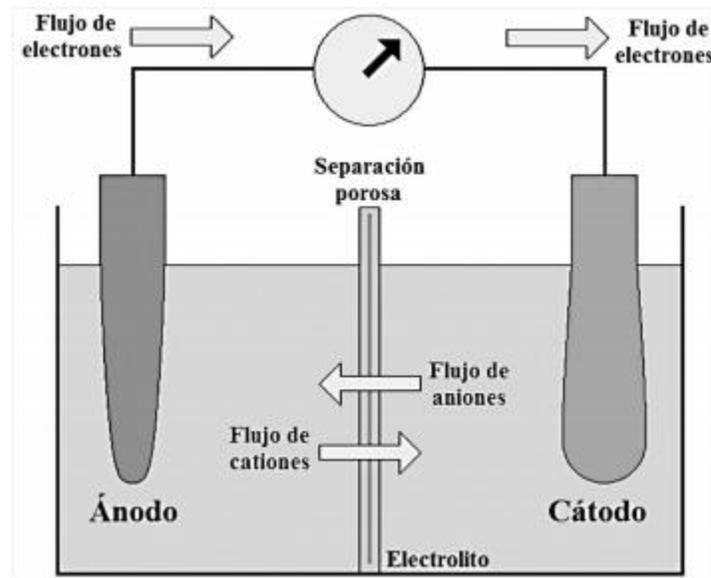
### 1.1.1 CORROSIÓN EN METALES

La corrosión, en general, se define como la destrucción lenta y progresiva de un metal, dada por la acción de un agente exterior o por el medio ambiente en el que se encuentre. (CUESTA, 2001) En este proceso de deterioro se pueden dar dos tipos de corrosión: la corrosión química que ocurre por el ataque de sistemas no electrolíticos como gases y vapores a temperaturas que impiden su condensación sobre la superficie metálica, así como por líquidos no conductores de la corriente eléctrica; y la corrosión electroquímica es una reacción química que ocurre en un medio acuoso y en el que hay transferencia de electrones y/o iones. (ARGOS, 2014)

El proceso de corrosión puede darse en dos procesos individuales: el proceso anódico y el proceso catódico. El proceso anódico (donde ocurre la oxidación del hierro) es cuando se presenta la disolución del acero. En el proceso catódico, los electrones en exceso presentes en el acero se combinan en el cátodo con el agua y el oxígeno para formar iones oxidrilo, los cuales se combinan con los iones de hierro y forman óxido. (ARGOS, 2014)

La mayoría de procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas), donde para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes: (1) unos electrodos (un ánodo y un cátodo), (2) un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de casos corresponde de una solución acuosa, y (3) una conexión eléctrica entre los electrodos. La figura 2 muestra de forma representativa un esquema de estos elementos, formando lo que se conoce como una celda electroquímica. Las ecuaciones de las reacciones que ocurren en los electrodos son las siguientes:

- En el ánodo:  $M_0 \rightarrow M_n + ne^-$  (Oxidación)
- En el cátodo:  $M_n + ne^- \rightarrow M_0$  (Reducción)



**Figura 2 Representación de una celda electroquímica**

Ambas reacciones ocurren de forma simultánea. Como se observa en las ecuaciones, el ánodo cede electrones al sistema cuando reacciona, aumentando su número de oxidación, cambiando de su estado metálico base a cationes que se disuelven en el electrolito, siendo este el material que sufre el fenómeno de corrosión; mientras que, en el cátodo, los aniones metálicos absorben electrones, disminuyendo su número de oxidación, por lo que cambian a su estado base. (SALAZAR, 2015)

Los efectos de la corrosión se manifiestan de cinco formas diferentes que pueden ser o no simultáneas: Expansión del acero de refuerzo, fisura interna del concreto, disminución de la capacidad mecánica del concreto, baja adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, reducción de la sección transversal del acero de refuerzo decreciendo su capacidad mecánica (ARGOS, 2014). Estos efectos de la corrosión generan fallas estructurales que ponen en riesgo a los usuarios de toda construcción, (GUZMÁN GONZÁLEZ, 2008)

### **1.1.2 CORROSIÓN DEL ACERO REFORZADO**

La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras se da por la destrucción de la capa pasivadora que se forma naturalmente sobre el acero embebido dentro del concreto, esta genera un aumento de volumen en el refuerzo produciendo fisuras, grietas y daños que pueden llevar a la estructura inclusive a su colapso, Este fenómeno se debe a la alcalinidad

del concreto cuando reacciona con sustancias ácidas o la presencia de una cantidad suficiente de cloruros (EUCLID GROUP TOXEMENT, 2017)

## **1.2 CONCRETO REFORZADO**

Se le denomina concreto a la mezcla de grava, arena, agua, cemento y otros aditivos utilizados para modificar características de durabilidad, tiempo de fraguado y ductilidad. El concreto tiene alta resistencia a la compresión y una muy baja resistencia a la tensión. (VALLE, 2013)

Se llama concreto reforzado a la combinación de concreto y acero en la que el refuerzo de acero le proporciona la resistencia a la tensión de la que carece el concreto, este aprovecha de forma eficiente las características de resistencia a la compresión, durabilidad, resistencia al fuego y moldeabilidad del concreto, junto con las de alta resistencia en tensión y ductilidad del acero, para formar un material compuesto que reúne muchas de las ventajas, para ser utilizado en estructuras para construcción (ARQHYS, 2012)

## **1.3 ACERO DE REFUERZO**

El acero de refuerzo es un elemento importante en la construcción de estructuras de concreto reforzado; las varillas de refuerzo normalmente son de acero al carbono y de baja aleación, laminadas en caliente, con y sin termo tratamientos, soldables o no a temperaturas ambiente, con resaltes características para ser utilizadas como refuerzo estructural. Las varillas deben cumplir las especificaciones dadas por las normas ASTM A615 o ASTM A706. Las varillas utilizadas como acero de refuerzo debe tener la ductilidad adecuada para los movimientos sísmicos. (MINISTERIO DE TRANSPORTE E INFRAESTRUCTURA, 2007)

## **1.4 ACERO NTC 2289 (ASTM A706/A706M)**

La norma NTC 2289 cubre las barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, rectas o en rollos, para refuerzo de concreto usado en aplicaciones donde las restricciones en las propiedades mecánicas y de composición química son compatibles para la aplicación de propiedades de tracción controlada o requerida que sirvan para mejorar la soldabilidad. (ICONTEC, 2007)

Las barras corrugadas disponen de un alto límite de fluencia con una muy buena ductilidad (altos valores de alargamiento), alta soldabilidad y excelente adherencia al concreto; estas barras son usadas como refuerzo en construcciones de concreto y en construcciones relacionadas. (GERDAU DIACO)

## **1.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS**

Con las técnicas electroquímicas se introduce una señal eléctrica en el sistema que se estudia y se obtiene información del mismo analizando la respuesta eléctrica que genera a dicha señal (LOPEZ). 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 y proveer información sobre: (TRISTANCHO, 2011)

- Velocidad de corrosión
- Mecanismos de corrosión
- Tipo de corrosión

### **1.5.1 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, lo anterior se muestra en la figura 3 (TRISTANCHO, 2011)

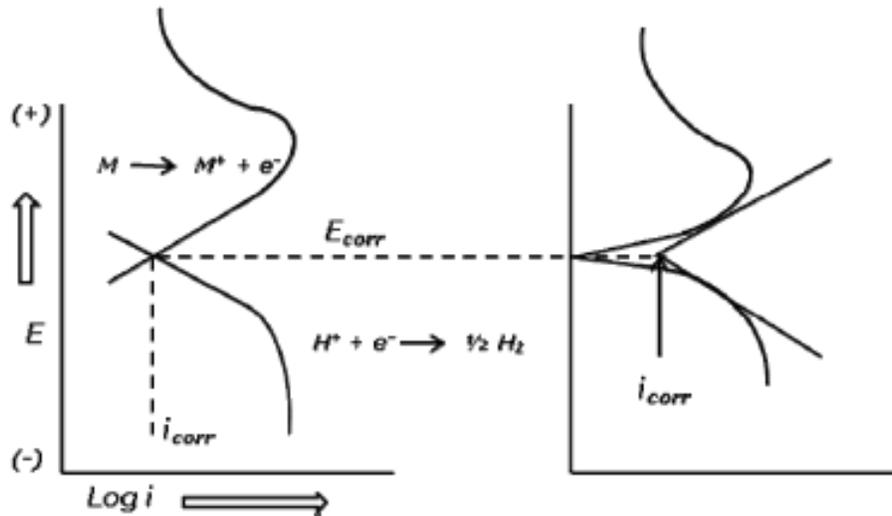


Figura 3 Diagrama de Tafel  
(TRISTANCHO, 2011)

### 1.5.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL

Es una técnica de monitoreo continuo usada en la determinación de la velocidad de corrosión y puede definirse 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, como puede observarse en la figura 4.

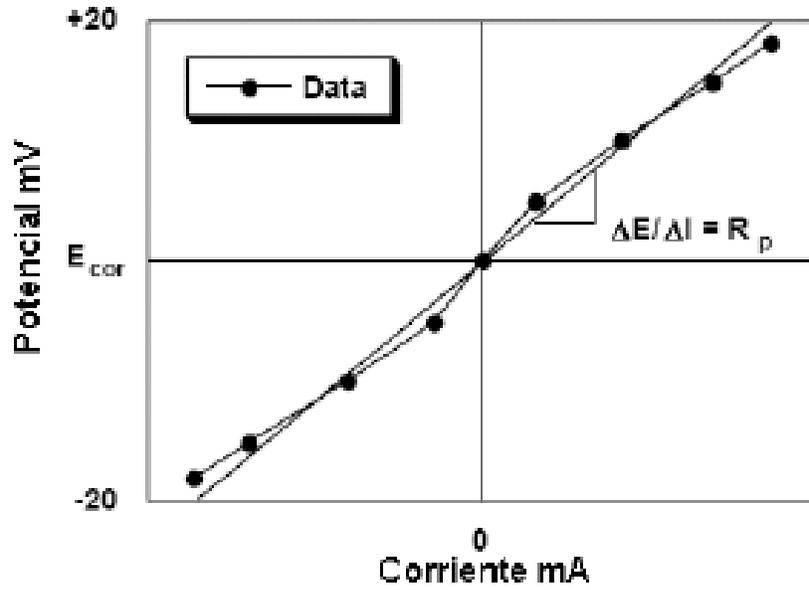


Figura 4 Diagrama de la Resistencia a la polarización  
(TRISTANCHO, 2011)

En este ensayo se debe contar con un potencial de  $\pm 20$  mV, para esto se hace mediante un potenciostaro, con una velocidad de barrido de 0.1 mV/seg y se obtiene una respuesta con el voltaje de corriente lineal.

Con las pendientes obtenidas de las curvas de Tafel y con la resistencia a la polarización se puede determinar la densidad de corriente de corrosión mediante el uso de la ecuación de Stern-Geary.

$$I_{corr} = \frac{\beta}{R_p} \quad \text{ec. 1}$$

Dónde:

$$\beta = \frac{ba \cdot bc}{(2.303)(ba + bc)} \quad \text{ec. 2}$$

Dónde:

$I_{corr}$  = 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 formula:

$$V_{corr} = 3,27 * 10^{-3} \left( \frac{I_{corr} \cdot P.E}{\rho} \right) \text{ ec. 3}$$

Dónde:

V<sub>corr</sub> = Velocidad de corrosión (mpy)

PE = Peso equivalente del material (g)

$\rho$  = Densidad del material ( $g/cm^3$ )

## **2. METODOLOGIA Y EXPERIMENTOS**

### **2.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS Y EL MEDIO ELECTROLÍTICO (MEDIO O AMBIENTE CORROSIVO)**

#### **2.1.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS**

- **Paso 1:** Investigar acerca del acero de refuerzo indicado, para la elaboración de las probetas, identificando sus características físicas y químicas:

Para la realización de estas probetas se hizo uso de la norma NTC 550, (concretos. elaboración y curado de especímenes de concreto en obra) usada para identificar el paso a paso de la elaboración de los especímenes, el acero de refuerzo que se utilizó para este fue el NTC 2289 (ASTM A706/A706M) empleado en el sector de la construcción, las medidas de este fueron: diámetro de 3/8 de pulgada y una longitud de 6 metros. (ver figura 5 - 6 )

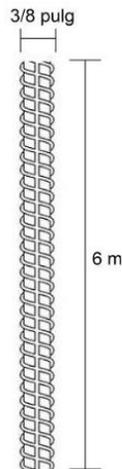


Figura 5 Dimensiones acero de refuerzo suministrado.



Figura 6 Acero de refuerzo suministrado

Algunas de las características dimensionales y propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado se observan en la siguiente tabla:

Características Dimensionales			Características Dimensionales	
Número de designación (d)	Pulgadas (")	Masa Nominal kg/m	Número de designación (d)	Masa nominal kg/m
2	1/4"	0,249	8,5M	0,446
3	3/8"	0,560	9,0M	0,500
4	1/2"	0,994	11,0M	0,747
5	5/8"	1,552	12,0M	0,888
6	3/4"	2,235	15,0M	1,387
7	7/8"	3,042		
8	1"	3,973		
9	1 1/8"	5,050		
10	1 1/4"	6,404		
11	1 3/8"	7,907		

Propiedades Mecánicas					
Resistencia a la fluencia (Fy)		Resistencia a la tracción (Fu)	Relación Fu/Fy	Alargamiento Mínimo (en 200mm)	
Min	Max	Min		d ≤ 6	7 ≤ d ≤ 11
420 Mpa	540 Mpa	550 Mpa	≤ 1,25	14%	12%
42 Kgf/mm <sup>2</sup>	55 Kgf/mm <sup>2</sup>	56 Kgf/mm <sup>2</sup>			
60.000 psi	78.000 psi	80.000 psi			

Tabla 1 Características dimensionales y propiedades mecánicas acero de refuerzo implementado <https://www.gerdau.com.co/PRODUCTOSYSERVICIOS/Productos/Lineas/BarrasCorrugadas.aspx>

- **Paso 2:** Las varillas de acero de 3/8 fueron cortadas a una longitud de 6 pulgadas.



**Figura 7** Varillas de acero cortadas a una longitud de 6 pulgadas

- **Paso 3:** Para la preparación de la mezcla de concreto, se utilizó grava, arena y cemento (Cemex), bajo la norma NTC 121 (ICONTEC) se dio la proporción 3; 2; 1 que es (3 de grava, 2 de arena y 1 de cemento).



**Figura 8** Preparación de la mezcla de concreto

- **Paso 4:** Para la elaboración de los especímenes se utilizaron 6 tubos de PVC con las siguientes dimensiones: Diámetro de 3 pulgadas y una longitud de 6 pulgadas.



**Figura 9** Moldes para la elaboración de los especímenes

Posteriormente se realizó el vaciado del concreto en cada uno de los tubos, después se sumergieron en cada uno dos varillas a solo  $2/3$  partes de la longitud de la varilla con una separación entre varillas de 1 pulgada, para el secado de los especímenes se dio una espera de 8 días y se procedió a la marcación de cada uno de ellos.



**Figura 10** Vaciado de probetas

### 2.1.2 EL MEDIO ELECTROLÍTICO

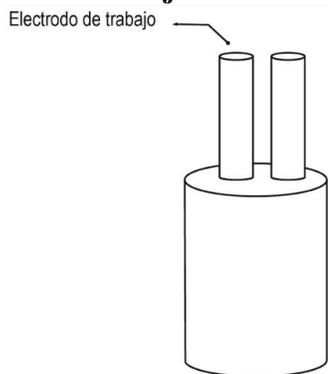
- **Paso 5:** Para la adecuación de los dos diferentes medios de corrosión se utilizaron dos cubetas con agua, cada cubeta con 3 especímenes; la primera cubeta tenía únicamente agua y la segunda cubeta se vertió agua y salmuera, por cada litro de agua se adiciono 35g de sal.



**Figura 11** Adecuación de los diferentes medios de corrosión: Tanque izquierda: agua como medio de corrosión. Tanque derecha: agua con 3,5% de salmuera como medio de corrosión

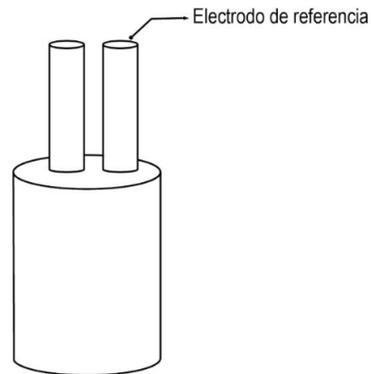
- **Paso 6:** Se forman las celdas electroquímicas, compuestas por un electrodo de trabajo (ver figura 12), un electrodo de referencia (ver figura 13) y un contraelectrodo (ver figura 14), para continuar con la toma de datos:

**Electrodo de trabajo:**



**Figura 12** Probeta señalando el electrodo de trabajo

**Electrodo de referencia:**



**Figura 13** Probeta señalando el electrodo de referencia

**Contra-electrodo**



**Figura 14** Contraelectrodo (barra de grafito)

## Montaje completo de celda electroquímica

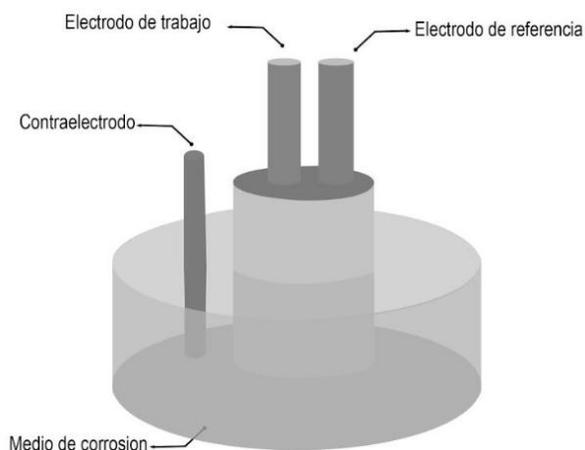


Figura 15 Celda electroquímica

## 2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL - MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS

Para la toma de datos se hizo uso del equipo POTENCIOSTATO - GALVANOSTATO PG-TEKCORR 4.2 USB (ver figura 16), equipo suministrado por el grupo de investigación en materiales avanzados GIMAV UTP, todo bajo la supervisión del docente encargado y siguiendo las instrucciones pactadas en el manual de funcionamiento.

Primero se realizó la prueba electroquímica de resistencia a la polarización lineal (RPL), después se hizo la extrapolación de las pendientes de Tafel, estas pruebas se realizaron en 6 periodos distribuidos así: cero (0) horas (PERIODO 1), trescientos ochenta y cuatro (384) horas (PERIODO 2), mil ciento cincuenta y dos (1152) horas (PERIODO 3), mil seiscientos cincuenta y seis (1656) horas (PERIODO 4), dos mil ciento sesenta (2160) horas (PERIODO 5) y dos mil quinientos noventa y dos (2592) horas (PERIODO 6).



**Figura 16** Equipo un potenciostato - galvanostato PG-TEKCORR 4.2 USB

Para todos los procedimientos se realizó una investigación previa de la normatividad que se debe seguir para la toma de datos de cada una de las pruebas realizadas.

Se implementó la norma ASTM G106 para la toma de datos en la extrapolación de curvas Tafel y la norma ASTM G 59-91 para la resistencia a la polarización lineal.

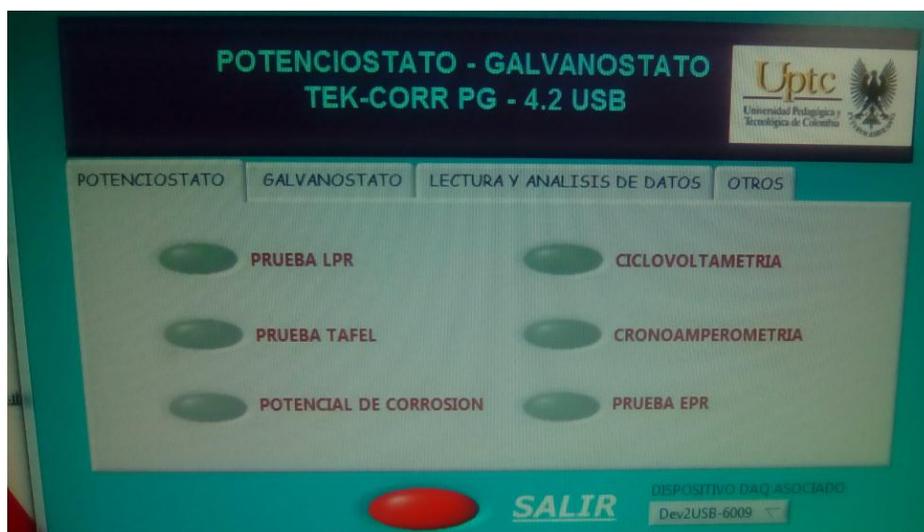
Teniendo claro las normas a usar, los especímenes y el medio corrosivo listo, se realizó el montaje para la toma de datos.



**Figura 17** Fotografía tomada al montaje realizado para la toma de datos en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Tecnológica de Pereira

## 2.2.1 SOFTWARE PARA TOMA DE DATOS

El software utilizado para la toma de datos fue “PG 01X18E1CE6” como se muestra a continuación:

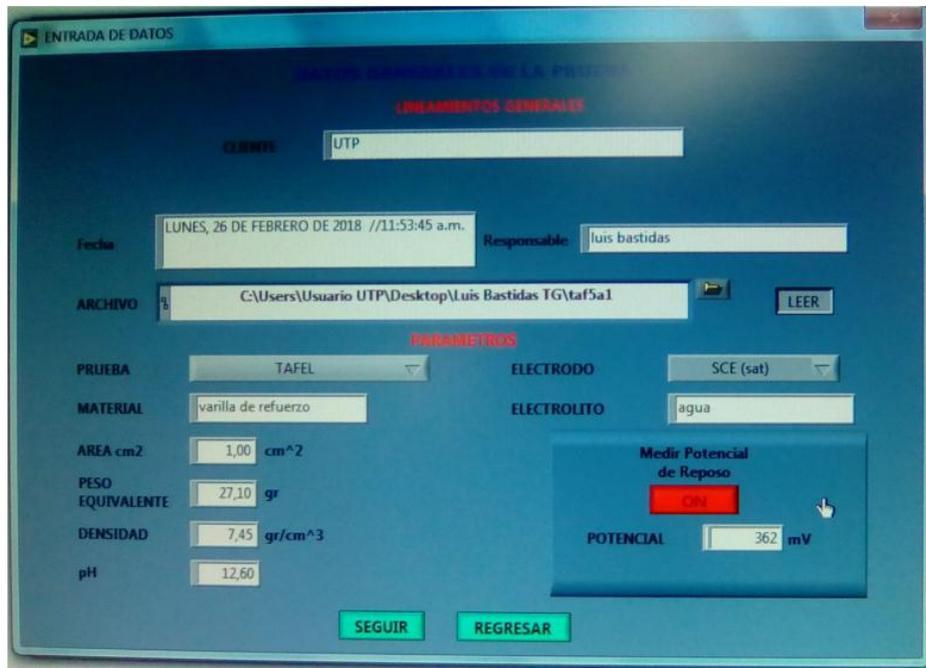


**Figura 18** Pantalla de inicio del programa: Fotografía tomada en el computador donde se encuentra el programa en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Para hallar la primera curva de extrapolación de Tafel, se selecciona esta y se registran los datos requeridos por el software los cuales fueron: el área sumergida, el peso equivalente, la densidad y los electrolitos, consignados en la siguiente tabla:

NOMBRE DEL PARÁMETRO	VALOR
MATERIAL	Acero de Refuerzo NTC 2289
ÁREA [cm <sup>2</sup> ]	1
PESO EQUIVALENTE [geq]	27,1
DENSIDAD [g/cm <sup>3</sup> ]	7,45

**Tabla 2** datos suministrados a el programa computacional “PG 01X18E1CE6”



**Figura 19 Fotografía tomada a la pantalla del computador donde se muestran los datos utilizados en el programa “PG 01X18E1CE6”.**

Después de registrar los datos requeridos, se procede a consignar los parámetros tanto para las curvas de extrapolación de Tafel como para las curvas de resistencia a la polarización lineal:

Los parámetros de operación utilizados para la curva de extrapolación Tafel fueron:

- Barrido de potencial de  $\pm 20$  mV . A partir del potencial de corrosión
- Velocidad de barrido de 1 mV/s
- Rango de 1  $\mu$ A

Los parámetros de operación utilizados para la Resistencia a la Polarización Lineal

- Barrido de potencial de  $\pm 20$  mV . a partir del potencial de corrosión
- Velocidad de barrido de 10 mV/s
- Rango de 100 nA

Este proceso fue realizado en cada uno de los periodos con cada una de las probetas para la toma de datos.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 RESULTADOS FINALES DEL ESTADO DE LAS PROBETAS

##### - PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA



Figura 20 Resultado final de probetas sumergidas en agua

##### - PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA CON SALMUERA



Figura 21 Resultado final de probetas sumergidas en agua con salmuera

### 3.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Para hallar la velocidad de corrosión en cada toma, después de ingresar los datos pedidos por el software, volvemos a la pantalla de inicio del programa (figura 18) donde posteriormente se abre la pestaña de lectura y análisis de datos. Primero se cargan los resultados obtenidos en las curvas tafel para obtener las pendientes anódicas y catódicas, siguiente a eso, estos datos se registran en la curva de resistencia a la polarización lineal para encontrar la velocidad de corrosión de cada espécimen en cada periodo de tiempo, a continuación podemos observar las gráficas arrojadas por el software en una de las tomas realizadas (ver figura 20)

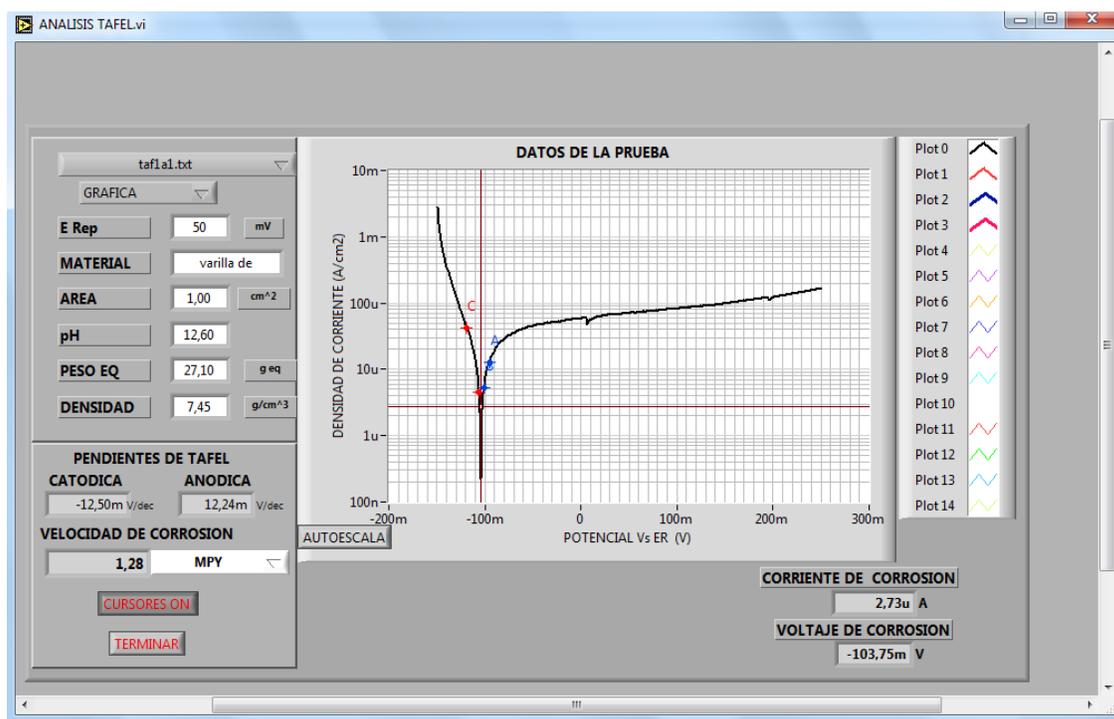
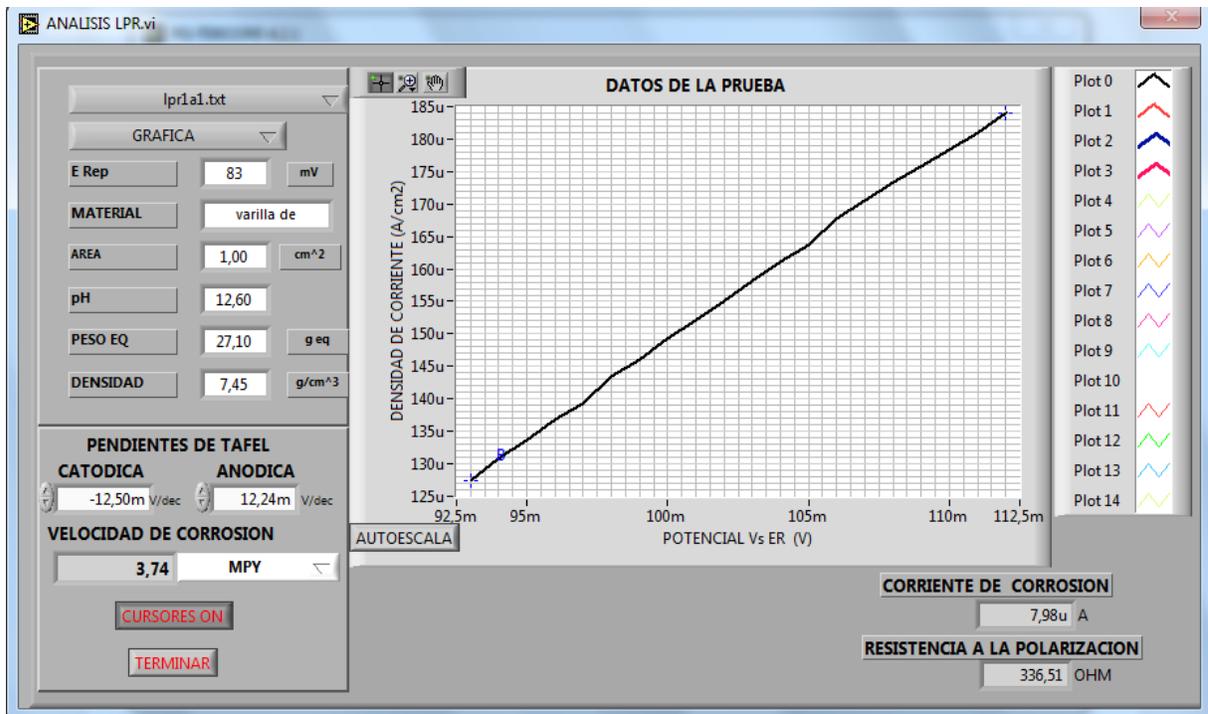


Figura 22 Resultado curvas Tafel con información de las pendientes anódicas y catódicas (Periodo 1- probeta 1 sumergida en agua)



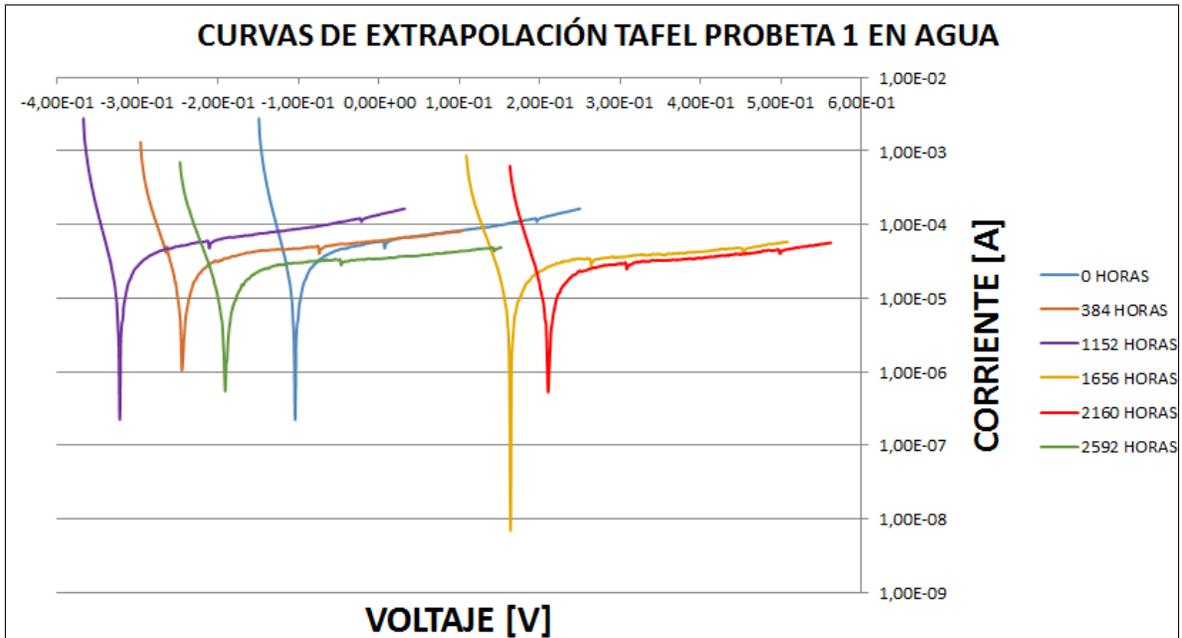
**Figura 23 Resultado de curvas de resistencia a la polarización con información de las pendientes anódicas y catódicas dada por el resultado de curvas de Tafel (Periodo 1- probeta 1 sumergida en agua)**

### 3.3 ANALISIS DE RESULTADOS

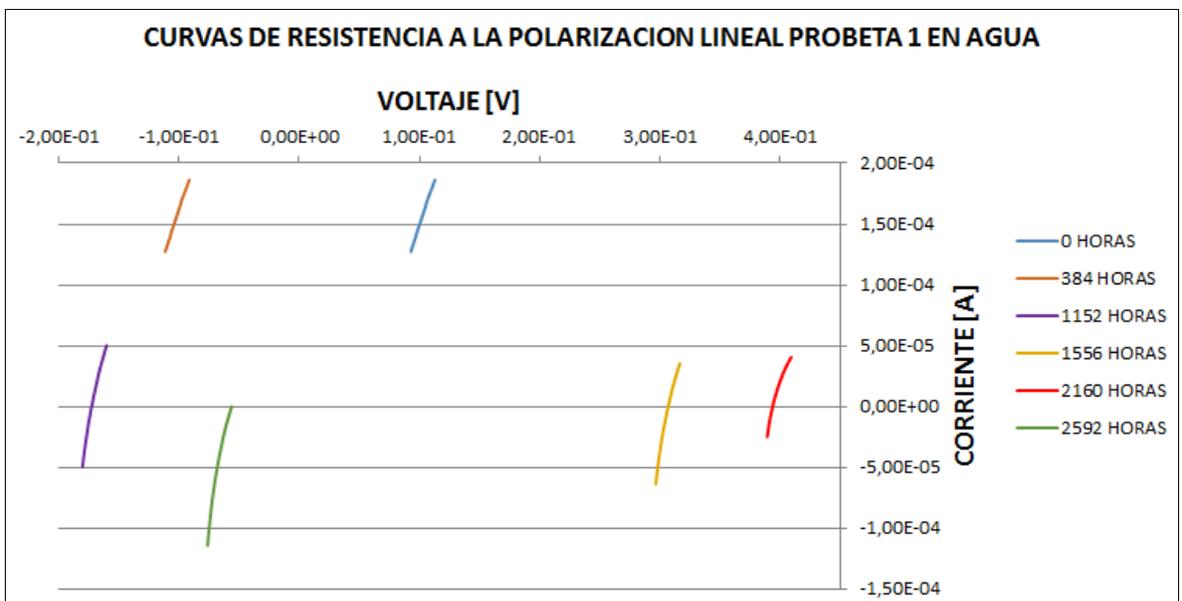
Para el análisis de resultados se condensa la información obtenida por el software de cada probeta en cada periodo de tiempo (3 probetas en agua y 3 probetas en agua y salmuera), se realizaron 2 graficas por probeta mostrando en una la curva de extrapolación Tafel y la otra las curvas de resistencia a la polarización lineal, y una tabla con la información de la velocidad de corrosión en cada periodo de tiempo.

### 3.3.1 PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA COMO MEDIO DE CORROSIÓN

- Probeta 1:



Grafica 1 Curvas de extrapolación Tafel probeta 1 sumergida en agua



Grafica 2 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 1 sumergida en agua

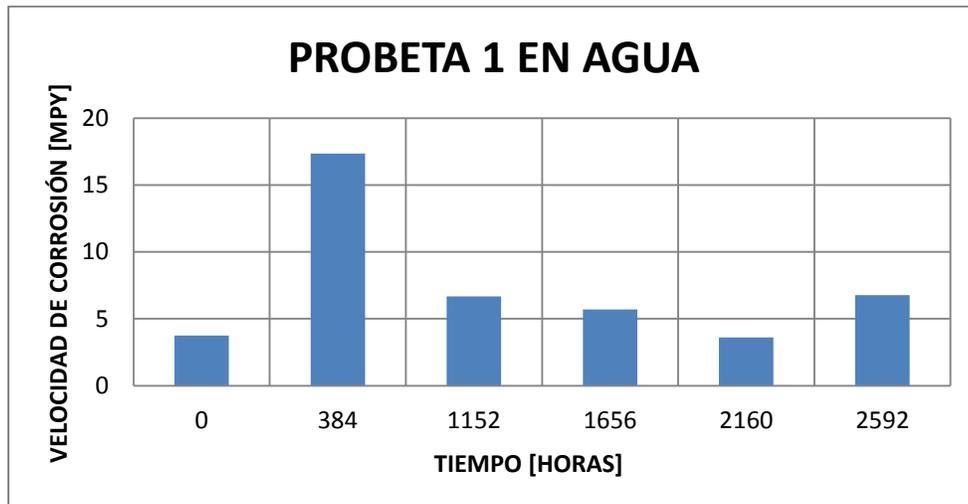
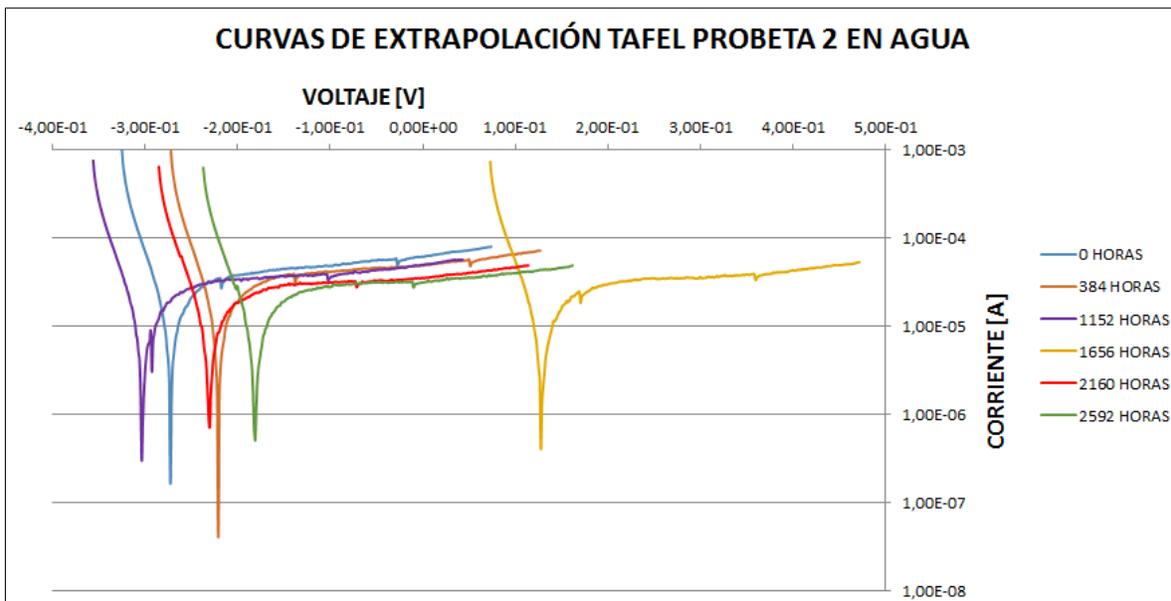
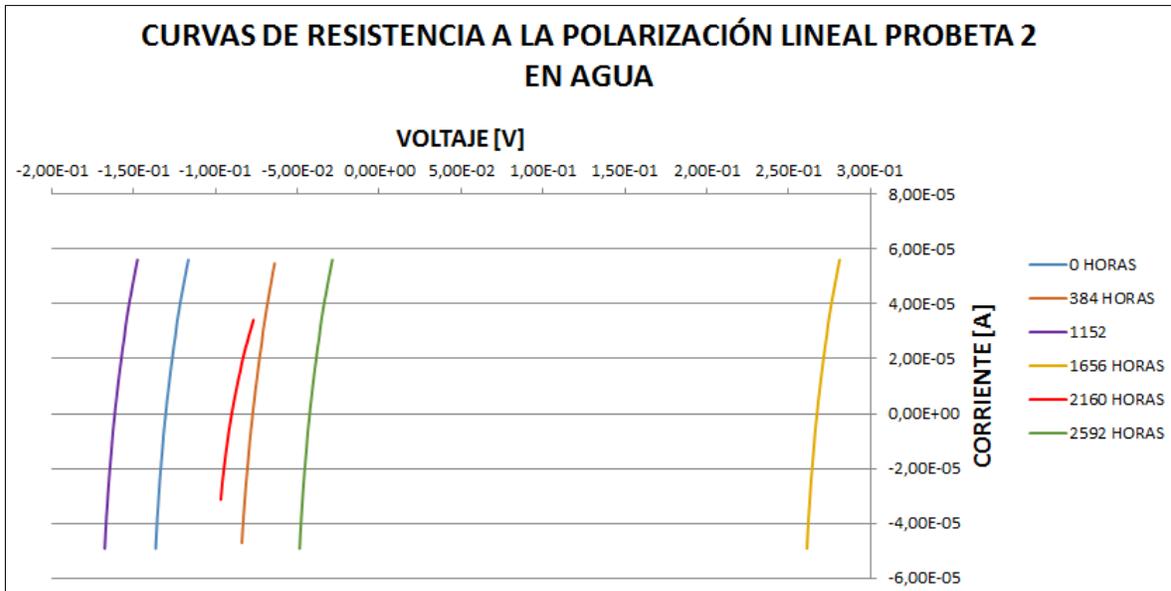


Tabla 3 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 1 sumergida en agua

- Probeta 2:



Grafica 3 Curvas de extrapolación Tafel probeta 2 sumergida en agua



Grafica 4 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 2 sumergida en agua

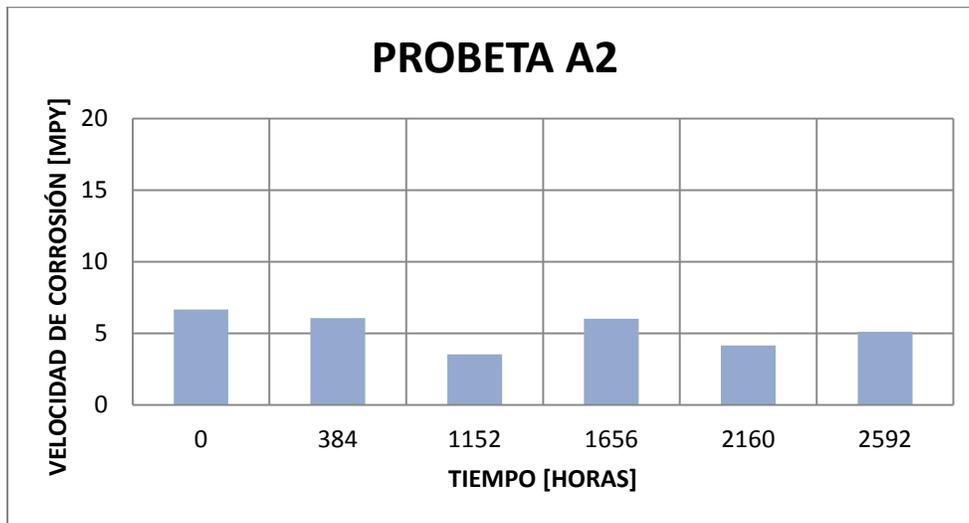
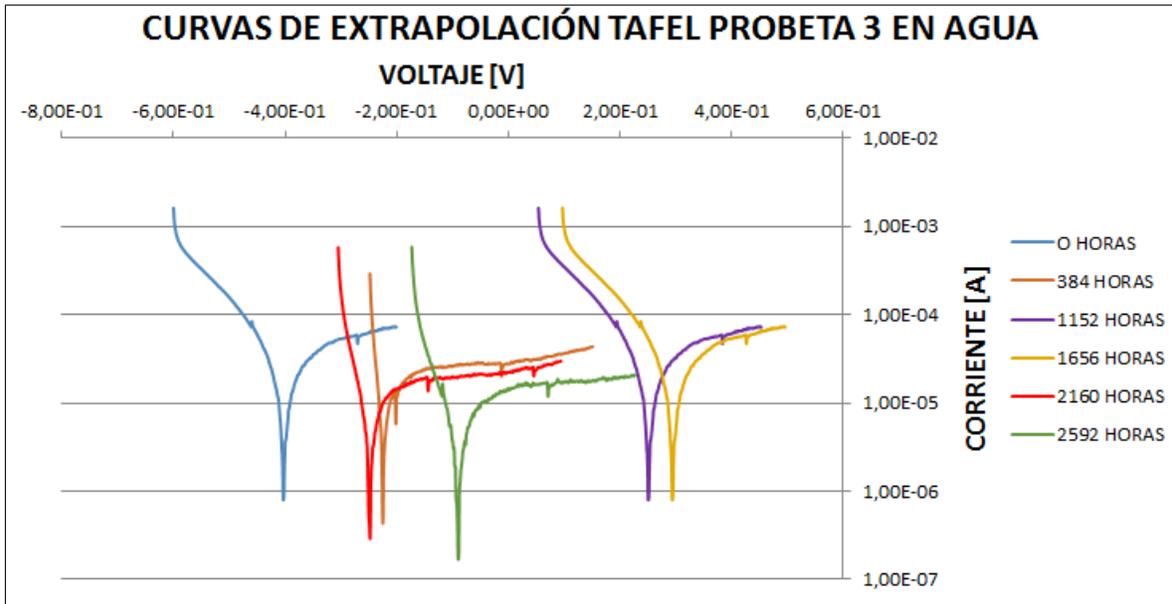
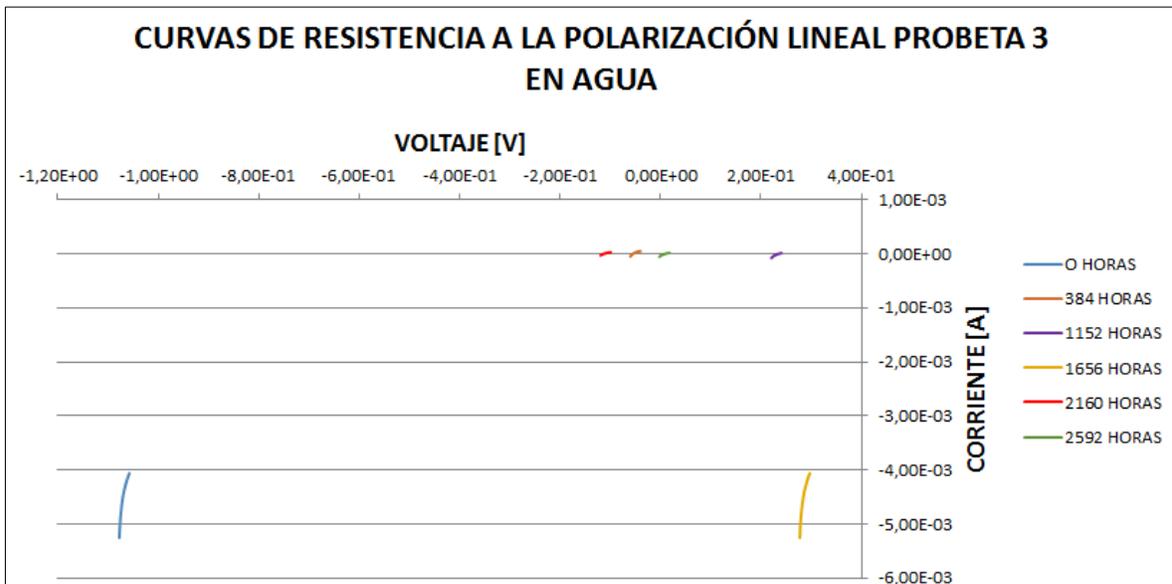


Tabla 4 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 2 sumergida en agua

- **Probeta 3:**



**Grafica 5** Curvas de extrapolación Tafel probeta 3 sumergida en agua



**Grafica 6** Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 3 sumergida en agua

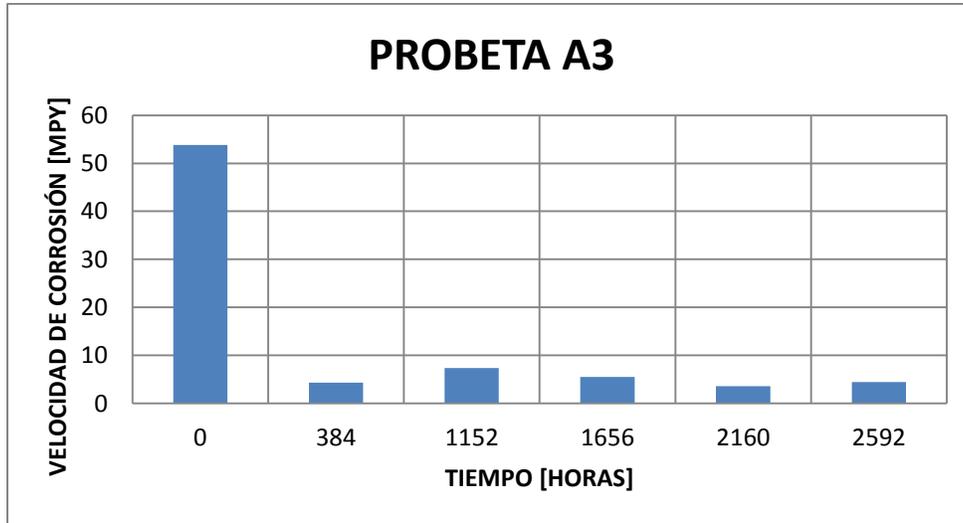
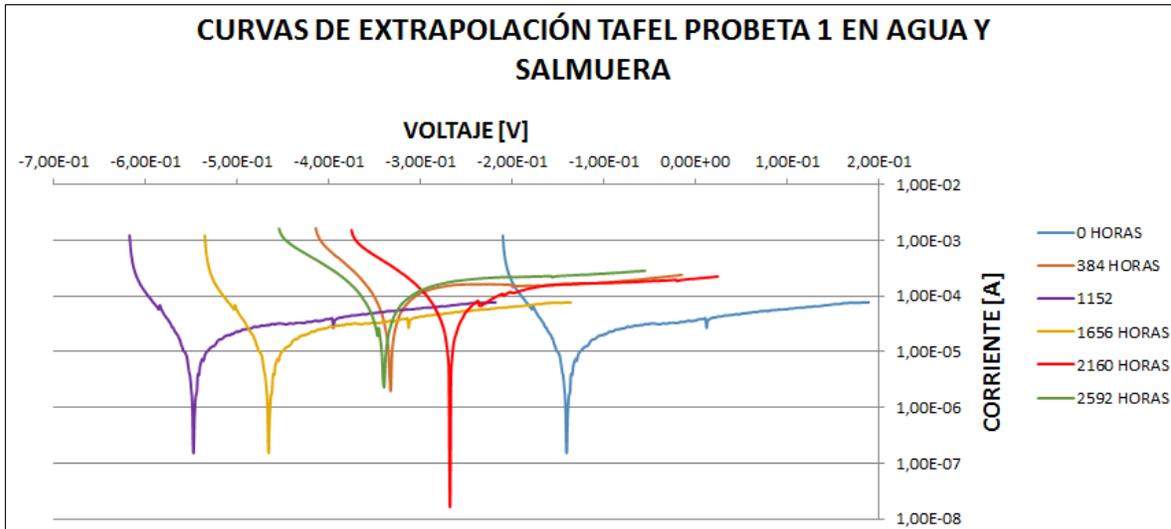


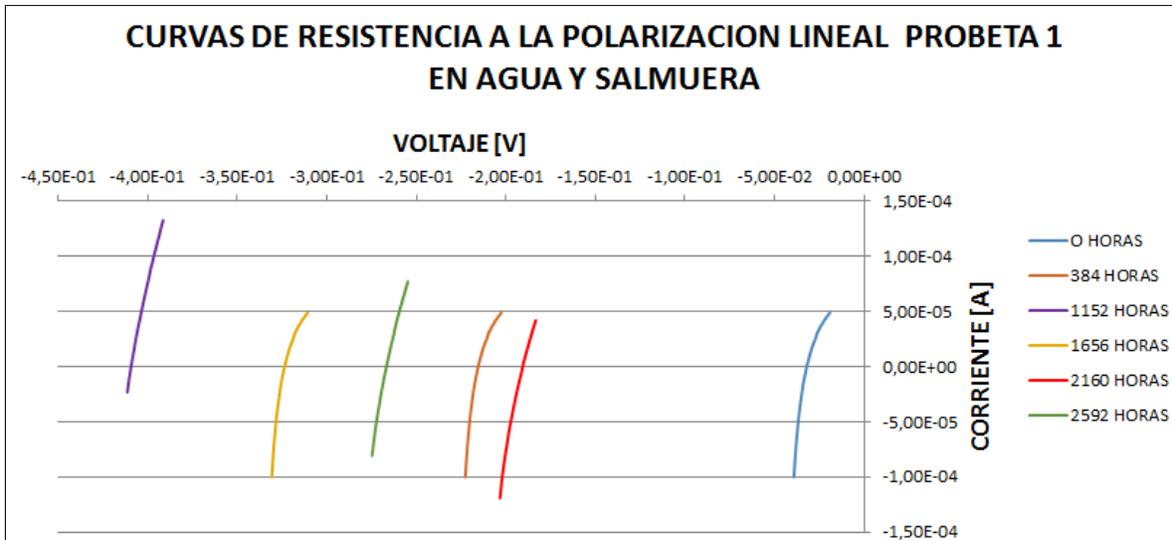
Tabla 5 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 3 sumergida en agua

### 3.2.2. PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA CON SALMUERA COMO MEDIO DE CORROSION

-Probeta 1:



Grafica 7 Curvas de extrapolación Tafel probeta 1 sumergida en agua con salmuera



Grafica 8 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 1 sumergida en agua con salmuera

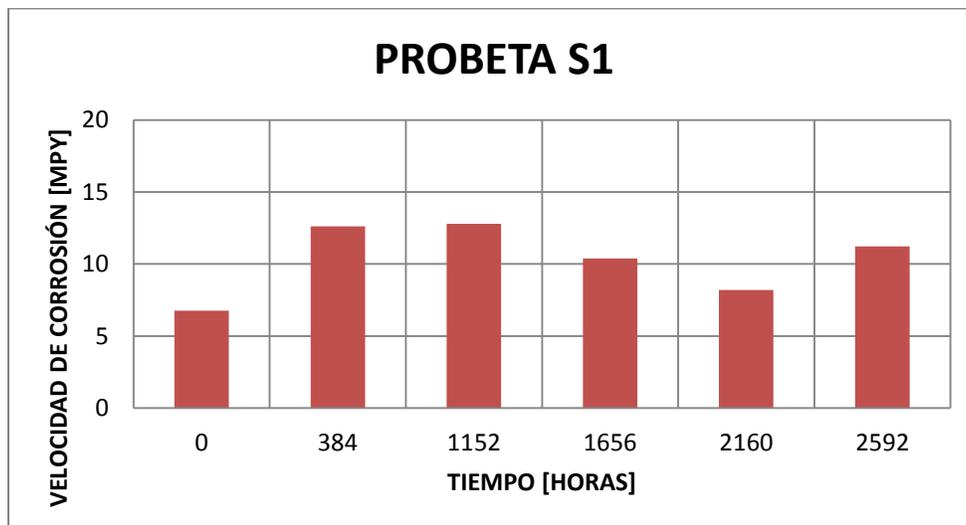
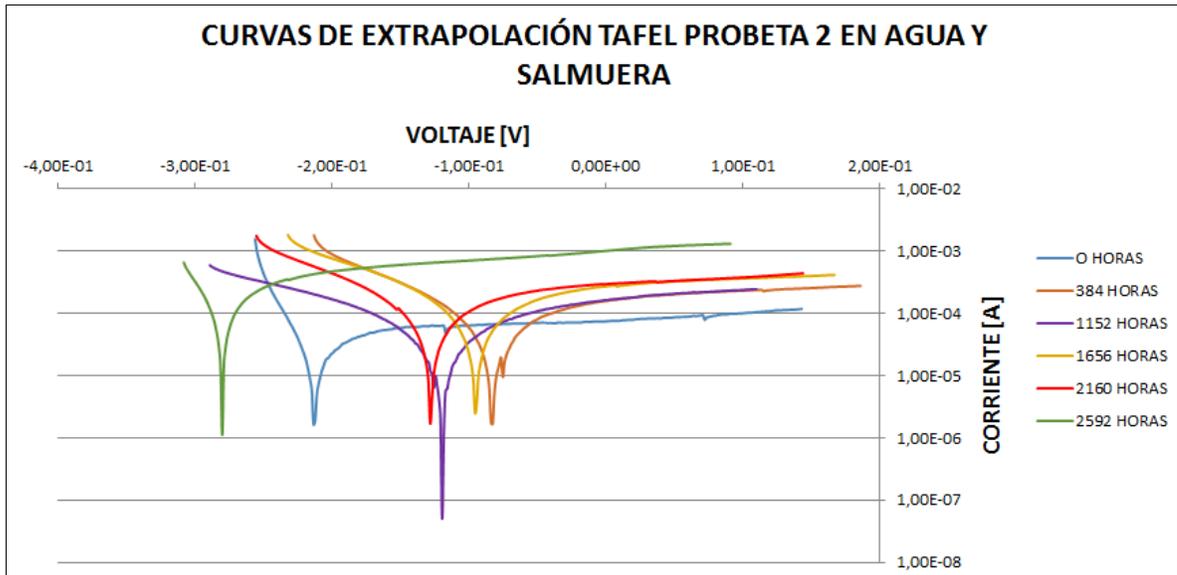
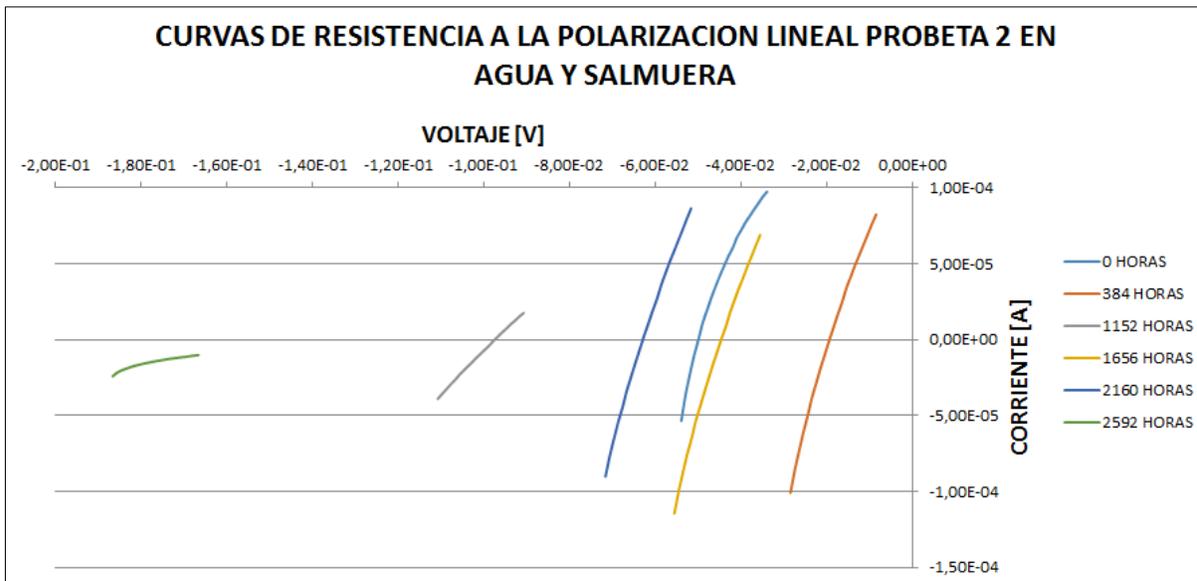


Tabla 6 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 1 sumergida en agua con salmuera

- **Probeta 2:**



**Grafica 9** Curvas de extrapolación Tafel probeta 2 sumergida en agua con salmuera



**Grafica 10** Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 2 sumergida en agua con salmuera

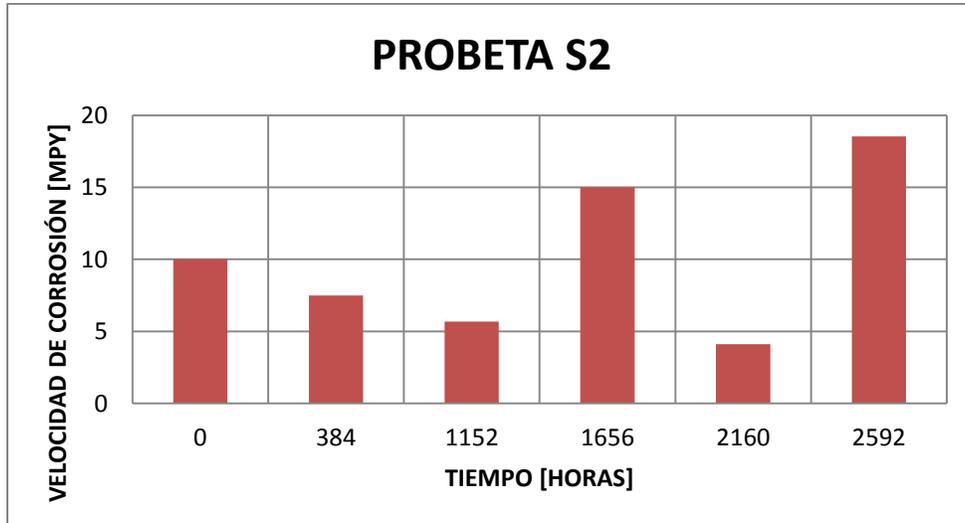
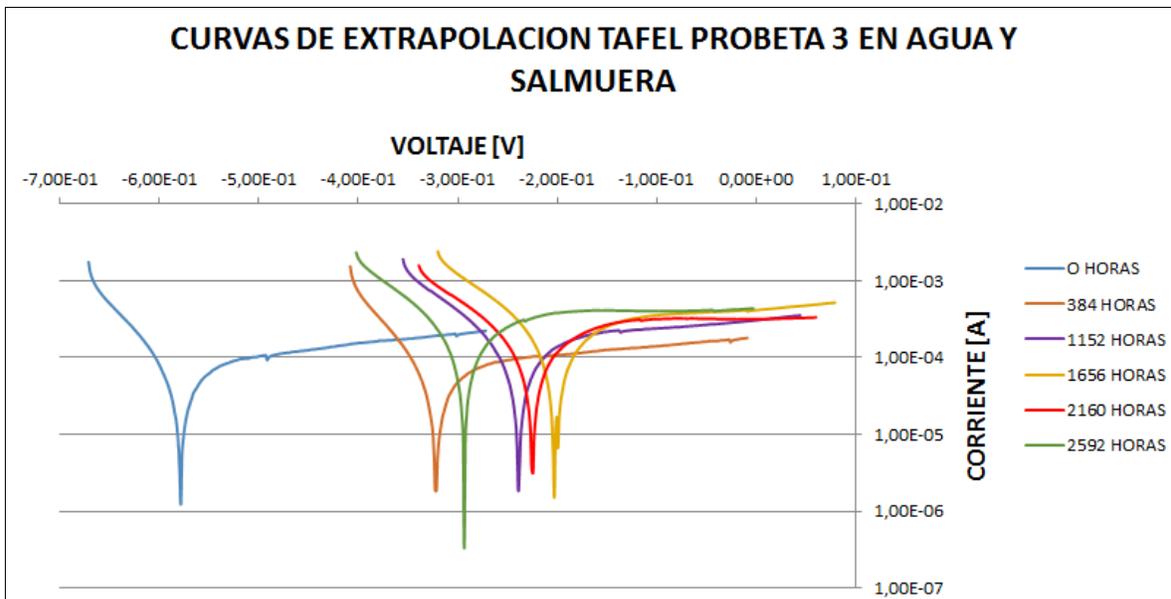
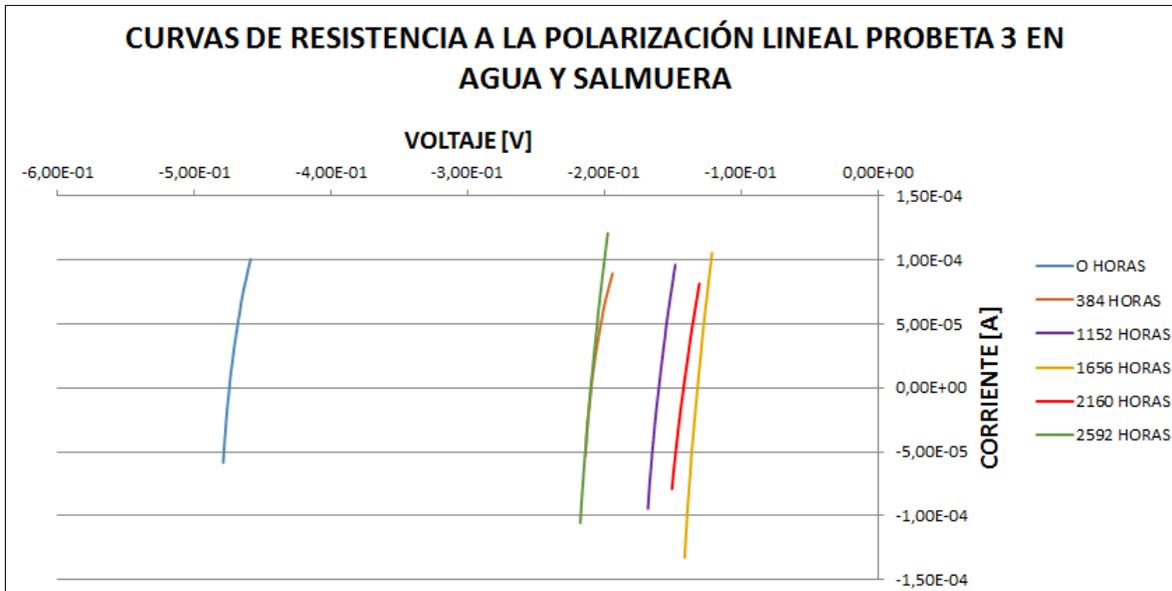


Tabla 7 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 2 sumergida en agua con salmuera

- Probeta 3:



Grafica 11 Curvas de extrapolación Tafel probeta 3 sumergida en agua con salmuera



Grafica 12 Curvas de Resistencia A Polarización Lineal probeta 3 sumergida en agua con salmuera

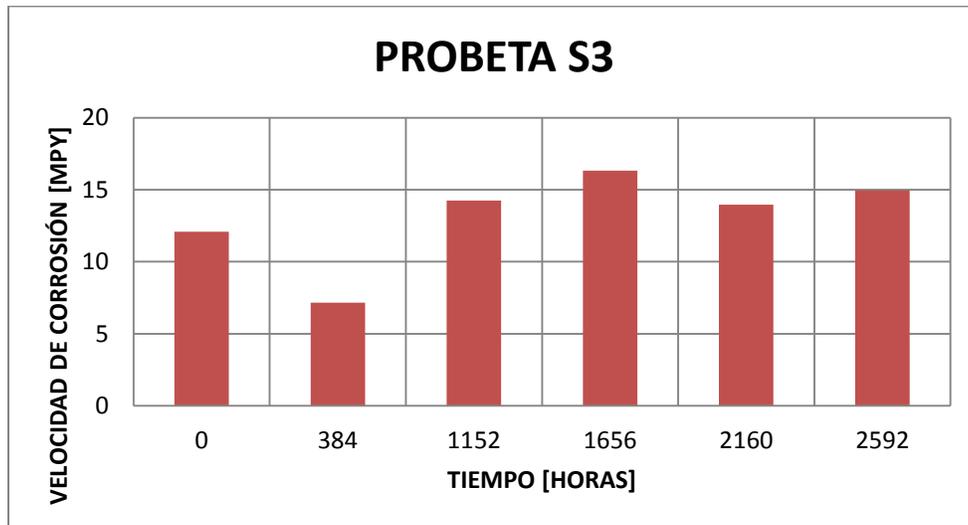


Tabla 8 Tabla 7 Velocidad de corrosión en los diferentes periodos de tiempo Probeta 3 sumergida en agua con salmuera

- Se pudo evidenciar que todas las probetas en los dos ambientes presentaron corrosión, donde las probetas sumergidas en agua con salmuera presentaron mayor velocidad de corrosión, la cual fue creciendo a medida que pasaba el tiempo.

- En el medio de corrosión de agua con salmuera los valores de velocidad de corrosión siempre variaron entre el intervalo 6,76 y 18,54 MPY siendo un comportamiento regular.
- En la probeta 1 sumergida en agua la velocidad de corrosión más alta se presentó en el periodo 2 (384 horas) con un valor de 16,36 MPY, y el valor más bajo de la velocidad de corrosión se presentó en el periodo 5 (2160 horas) con un valor de 3,61 MPY, Como se observa en la tabla 3.
- La probeta 2 sumergida en agua presento el comportamiento más estable de los 3 especímenes, donde su velocidad de corrosión tuvo una fluctuación entre 6,65 MPY Y 3.53 MPY (ver tabla 4).
- En la probeta 3 sumergida en agua se presentó una medida atípica en el periodo de tiempo 1 (0 horas) con un valor de 53,84 MPY (Valor alto) esto pudo ser causado por factores externos a la medición de dicha toma (ver tabla 5).
- En la probeta 1 sumergida en agua con salmuera se evidencio que en los periodos 2 (384 horas) y 3 (1152 horas) se presentaron los valores más altos en la velocidad de corrosión con un promedio de 12,71 MPY, pero en general la velocidad de corrosión tuvo un comportamiento estable con respecto al tiempo de la toma de datos (ver tabla 6).
- En la probeta 2 sumergida en agua con salmuera se presentó un comportamiento irregular comparado a las otras probetas, donde el valor más alto de la velocidad de corrosión fue de 18,54 MPY Y el valor más bajo de 4,12 MPY (ver tabla 7).
- La probeta 3 sumergida en agua con salmuera fue la del comportamiento más regular en los valores de velocidad de corrosión en comparación con las otras probetas sumergidas en este medio (ver tabla 8).

#### 4. CONCLUSIONES

- Se pudo evaluar el comportamiento del concreto reforzado sumergido en los medios de agua y en agua con salmuera al 3,5%W, en el que se evidencio la velocidad de corrosión por medio de los métodos electroquímicos de resistencia a la polarización lineal y curvas de extrapolación Tafel.
- Se hizo la respectiva investigación y seguimiento de las normas, tanto para la elaboración de especímenes en concreto reforzado como para la debida toma de datos de los métodos electroquímicos.
- Mediante las pruebas de extrapolación de curvas Tafel se encontraron las pendientes anódicas y catódicas que se usaron para encontrar los valores de la velocidad de corrosión en las diferentes probetas.
- Se obtuvo un comportamiento esperado en las probetas sumergidas en el medio salino ya que obtuvieron valores más altos de velocidad de corrosión comparados con las probetas sumergidas en solo agua.

## **5. RECOMENDACIONES**

Se recomienda seguir con la evaluación de la corrosión de concreto reforzado de manera más detallada y con lapsos de tiempo más prolongado, ya que por la corrosión se afectan significativamente las características funcionales del concreto y de esta forma llegar a evitar situaciones que comprometan la integridad estructural de las edificaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- MINISTERIO DE TRANSPORTE E INFRAESTRUCTURA. (2007). Obtenido de Reglamento nacional de construcción:  
[https://www.mti.gob.ni/images/stories/Documentos/Norma%20Minima%20Concreto%20Estructural\\_MTI.pdf](https://www.mti.gob.ni/images/stories/Documentos/Norma%20Minima%20Concreto%20Estructural_MTI.pdf)
- ARANA, M. A. (Agosto de 2016). *EL CONCRETO, MATERIAL FUNDAMENTAL*. Recuperado el 2018, de revistacyt: <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/agosto2016/experto.pdf>
- ARGOS. (2014). *Corrosión del acero de refuerzo*. Recuperado el 2018, de <http://mniapscop01.azurewebsites.net/comunidad360/blog/detalle/concreto/corrosion-del-acero-de-refuerzo>
- ARQHYS. (2012). *CONCRETO REFORZADO*. Recuperado el 2018, de <https://www.arqhys.com/construccion/reforzado-concreto.html>
- ASTM INTERNATIONAL . (s.f.). *ASTM A706/A706M Especificación Normalizada para Barras de Acero de Baja Aleación Lisas y Corrugadas para Refuerzo de Concreto*. USA.
- CAÑÓN, A. L. (2008). *LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN COLOMBIA DETERMINANTES Y COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C.
- CUESTA, F. L. (2001). *Análisis del fenómeno de la corrosión en materiales de uso técnico: metales. procedimientos de protección*.
- DEL VALLE MORENO, A., PÉREZ López, T., & MARTINEZ Madrid, M. (2001). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, Mexico.
- EUCLID GROUP TOXEMENT. (2017). *Toxement col*. Recuperado el 2018, de [http://www.toxement.com.co/media/3413/patologi-a\\_corrosio-n.pdf](http://www.toxement.com.co/media/3413/patologi-a_corrosio-n.pdf)
- GERDAU DIACO. (s.f.). Obtenido de <https://www.gerdau.com.co/PRODUCTOSYSERVICIOS/Productos/Lineas/BarrasCorrugadas.aspx>
- GUZMÁN GONZÁLEZ, O. (2008). *Influencia del agrietamiento en concreto de la corrosión del acero de refuerzo*. Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca de Juárez, Mexico.
- HERNANDEZ, M. C. (Mayo de 2017). *Cemento local: una competencia más roja que gris*. Recuperado el 2018, de LR La Republica: <https://www.larepublica.co/infraestructura/cemento-local-una-competencia-mas-roja-que-gris-2510991>
- ICONTEC. (2007). Norma técnica colombiana NTC 2289: Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto. (I. C. certificación, Ed.) Bogotá D.C.

- ICONTEC. (s.f.). Norma tecnica Colombiana NTC 121 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA CEMENTO PÓRTLAND. ESPECIFICACIONES FÍSICAS Y MECÁNICAS. (I. C. Certificación, Ed.) Bogota D.c, Colombia.
- LOPEZ, M. F. (s.f.). *Instituto de ciencia de materiales de madrid*. Recuperado el 2018, de Técnicas electroquímicas: <http://www.icmm.csic.es/fis/esp/electroquim.html>
- ROJAS, G. (Octubre - diciembre de 2008). Evaluación de estructuras de concreto por corrosión. *Tecnología en Marcha*, 21(4), 69-78.
- ROMO, M. (2008). *Temas de hormigón armado. La Flexo compresión en los Elementos de Hormigón Armado*. Ecuador.
- SALAZAR, J. A. (2015). *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales* . Recuperado el 2018, de <http://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- TRISTANCHO, J. L. (2011). *Caracterización por sales fundidas de los recubrimientos metálicos NiCrFeNbMoTiAl, NiCrAlY, mediante técnicas electroquímicas. Doctor en ciencia de materiales*. Chihuahua. México.
- VALLE, J. C. (2013). *Concreto y concreto reforzado*. Recuperado el 2018, de <https://matdeconstruccion.wordpress.com/2013/04/28/concreto-y-concreto-reforzado-diferencias/>