



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Desarrollo de un sistema galvanostático para la corrosión acelerada en varillas de refuerzo

Jorge Terán Guillén
Maura Arroyo Olvera
Mary Teresa Mauricio Zea
David Vázquez Vega

Publicación Técnica No. 673
Sanfandila, Qro.
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Jorge Terán Guillén, Ing. Mary Teresa Mauricio Zea, Ing. Maura Arroyo Olvera y M.C. David Vázquez Vega.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 03/21 Desarrollo de un sistema galvanostático para la corrosión acelerada en varillas de refuerzo.

Se agradece la colaboración al Lic. Raymundo Cossío Morales, Lic. Martha Murillo e Ing. Víctor Rodolfo Jordán Montaña de la empresa GALVAQRO por las facilidades de realizar el proceso de galvanizado en las varillas de refuerzo.

Contenido

	Página
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Sinopsis.....	ix
Abstract	xi
Resumen ejecutivo.....	xiii
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	3
1.1 Galvanostato.....	3
1.2 Celda electroquímica	3
1.3 Leyes de Faraday	6
1.3.1 Primera ley de Faraday	6
1.3.2 Segunda ley de Faraday	6
1.3.3 Tercera ley de Faraday	6
1.4 Velocidad de corrosión.....	7
1.5 Corrosión acelerada por corriente impresa.....	7
1.6 Pruebas de corrosión acelerada	9
1.7 Solución poro	9
1.8 Varilla de refuerzo.....	10
1.9 Galvanizado	12
2. Desarrollo	15
2.1 Metodología	15
2.2 Matriz experimental y dimensiones de varillas.....	17
2.3 Sistema eléctrico.....	22
2.3.1 Circuito	22
2.3.2 Panel de control	23

2.3.3	Cálculos de pérdida de masa	24
2.4	Celdas de corrosión	26
2.4.1	Diseño y construcción	26
2.4.2	Preparación de electrolitos	28
2.5	Montaje del sistema de corrosión acelerada.....	29
2.6	Corrosión acelerada.....	30
3.	Resultados.....	33
	Conclusiones	39
	Bibliografía.....	41
	Anexos	43
	1. Cálculo de área expuesta, corriente requerida y pérdida de masa para varillas de $\varnothing= 1"$	43
	2. Cálculo de voltaje y corriente con ley de ohm para circuito eléctrico de varillas de 1"	44

Índice de figuras

Figura 1.1 Esquema de una celda electroquímica.	3
Figura 1.2 Reacciones electroquímicas de la corrosión del acero.	5
Figura 1.3 Tiempo de vida útil de una estructura.	5
Figura 1.5 Protección catódica por corriente impresa.	8
Figura 1.6 Corrosión acelerada por corriente impresa.	8
Figura 1.6 Diagrama de Graville para estimar la soldabilidad de un acero. Los puntos rojos son un ejemplo de la ubicación del acero con base a los valores promedio, máximos y mínimos de la composición química de la colada de la varilla.	12
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología.	16
Figura 2.2 Esquema de la preparación de probetas.	18
Figura 2.3 Varillas de cortadas y biseladas.	19
Figura 2.4 Varillas galvanizadas.	19
Figura 2.5 Fotografías de las varillas durante su proceso de soldadura.	20
Figura 2.6 Esquema de la delimitación de la zona expuesta	21
Figura 2.7 Esquema de circuito utilizado para la prueba de corrosión acelerada.	23
Figura 2.8 Panel de control.	24
Figura 2.9 Esquema de partes y armado de la celda.	27
Figura 2.10 Esquema de la tapa de las celdas.	28
Figura 2.11 Esquema de la colocación de las varillas en la celda.	29
Figura 2.12 Esquema del armado de celdas.	30
Figura 2.13 Fotografía de todo el sistema conectado.	31
Figura 2.14 Fuente de poder.	31
Figura 2.15 Fotografía del sistema completo.	32
Figura 3.1 Mayor cantidad de productos de corrosión de las celdas que contienen cloruros.	33
Figura 3.2 Menor cantidad de productos de corrosión en las celdas sin cloruros.	34
Figura 3.3 Varillas con limpieza final de las celdas con cloruros.	35
Figura 3.4 Varillas con limpieza final de las celdas sin cloruros.	36

Índice de tablas

Tabla 1.1 Unidades para la velocidad de corrosión.....	7
Tabla 1.2 Soluciones poro utilizadas en distintas investigaciones	10
Tabla 1.3 Composición química por colada	11
Tabla 1.4 Composición química por producto	11
Tabla 1.5 Propiedades mecánicas en tracción.....	11
Tabla 2.1 Matriz experimental	17
Tabla 2.2 Nomenclatura utilizada para clasificar las varillas	20
Tabla 3.1 Registros de masa y cálculo de porcentaje de pérdida de peso	37
Tabla 3.2 Promedios de pérdida de masa por celda	38

Sinopsis

Se presenta el desarrollo de un sistema galvanostático para acelerar la corrosión en varillas de refuerzo en cuatro tipos de condiciones: testigo, galvanizada, soldada, galvanizada más soldada, en dos soluciones poro sintéticas diferentes que simulan el concreto, a una de ellas se le adicióno NaCl hasta una concentración del 3.5%. Las varillas de 50 cm de longitud y diámetro de una pulgada se clasificaron como varillas de acero al carbono de acuerdo a la norma NMX-B-506.

Con base al diseño de un circuito eléctrico, se desarrolló un sistema que suministra una densidad de corriente de $350\mu\text{A}/\text{cm}^2$ durante 114 días, para obtener un porcentaje de pérdida de masa del 20% en el área expuesta.

El sistema desarrollado puede acelerar la corrosión hasta una pérdida de masa deseada u objetivo en las celdas que contienen la solución poro con 3.5% de NaCl.

El galvanizado da una protección adicional a la corrosión, ya que mostraron menor pérdida de masa las varillas galvanizadas y sin soldar, las cuales estaban inmersas en solución poro con 3.5% de NaCl.

No se presentó un efecto significativo en las perdidas de masa por la corriente impresa aplicada en las celdas que contienen únicamente solución poro.

Abstract

The development of a galvanostatic system to accelerate corrosion in reinforcing rebars on four types of conditions: control or blank, galvanized, welded, galvanized in addition welded. Two different synthetic pore solutions were used for simulating concrete, one of them was added NaCl at a concentration of 3.5%. 50 cm in length and diameter of one-inch rebar were used for the experiment. Rebars were classified as carbon steel according to NMX-B-506 standard.

Based on the design of an electrical circuit, a system was developed that supplied a current density of $350\mu\text{A}/\text{cm}^2$ for 114 days, It was planned to get a 20 percent mass loss for the exposed area.

It was demonstrated that the developed system could accelerate corrosion to a desired or target mass loss in the cells containing the pore solution with 3.5% NaCl concentration.

Galvanizing gives additional corrosion protection since galvanized rebars (unwelded and welded) that were immersed in pore solution with 3.5% NaCl showed less mass loss.

There was no significant effect on the mass losses due to the impressed current applied in the cells containing only pore solution.

Resumen ejecutivo

El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema galvanostático para acelerar la corrosión en el acero de refuerzo, en dos soluciones poro sintéticas que simulan el concreto de las cuales una contendrá cloruros y utilizando, de acuerdo a la clasificación de la norma NMX-B-506, varillas de refuerzo grado 42 con distintas condiciones: testigo o blanco, esto es, sin soldadura ni galvanizadas, soldadas, galvanizadas y galvanizada con soldadura.

El galvanostato es un instrumento electrónico cuya función básica es la de mantener la corriente constante o variable en forma definida, en una celda electroquímica, sin importar la variación en el voltaje, resistencia óhmica, temperatura u otras fluctuaciones.

Una forma de acelerar la corrosión en el acero de refuerzo es mediante la técnica de corriente impresa. Esto se hace con el objetivo de inducir un significativo grado de corrosión en un tiempo determinado. La técnica de corriente impresa tiene varias ventajas, además, del ahorro en tiempo y dinero, es la posibilidad de controlar la rapidez de corrosión que, por lo general, varía debido a los cambios en la resistividad, concentración de oxígeno y temperatura.

Se obtuvo el diseño de un circuito eléctrico para ocho celdas conectadas en serie, en cada una de estas, tres varillas conectadas en paralelo. Las celdas de corrosión contaban con tres elementos principales: el electrodo de trabajo que son las varillas, el contra electrodo una malla de acero galvanizado calibre 16 y la solución poro como electrólito.

Se prepararon dos diferentes soluciones, las cuales tuvieron como componente principal la misma solución poro con la diferencia que a una se le adiciona NaCl hasta un 3.5%. De las diferentes soluciones poro reportadas en la literatura científica se seleccionó la siguiente: 8.33 gramos por litro de hidróxido de sodio ($NaOH$), 23.3 gramos por litro de hidróxido de potasio (KOH), 2 gramos por litro de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$).

Este sistema consiste de un panel de control y una fuente de poder, esta última, suministra una densidad de corriente de $350\mu A/cm^2$ a las varillas de refuerzo durante 114 días, para obtener un porcentaje de pérdida de masa del 20% en la zona expuesta.

Los resultados obtenidos muestran un valor máximo de pérdida de masa de un 19.94% en Solución Poro + 3.5% de NaCl.

El galvanizado da una protección adicional a la corrosión, ya que mostraron menor pérdida de masa las varillas galvanizadas y sin soldar inmersas en solución poro + 3.5% NaCl.

No se presentó un efecto significativo en las pérdidas de masa por la corriente impresa aplicada en las celdas que contienen únicamente solución poro.

Introducción

Las varillas de refuerzo son componentes imprescindibles en la construcción de obras de infraestructura de concreto en diferentes ambientes, ya sea industriales o marinos. Lo que caracterizan a este tipo de estructuras civiles es la combinación de dos materiales que tienen funciones diferentes; se utiliza el concreto para resistir las fuerzas de compresión y el acero para las fuerzas de tensión, el cual en este último existen tanto el acero de refuerzo como el acero de preesfuerzo. Para que la combinación de estos dos materiales resulte efectiva, es necesario que haya adherencia entre los dos para que se deformen de forma conjunta y no haya un deslizamiento entre la varilla de refuerzo y el concreto que rodea ésta (Bentur A., 2007). La adhesión se logra mediante un proceso químico en la interfase acero-concreto, por la rugosidad de la superficie de la varilla de refuerzo y por el corrugamiento (costillas) obtenida durante el proceso de manufactura.

La corrosión de las varillas de refuerzo se debe a que el concreto tiene distintos tamaños de poros (poros de gel, poros capilares y poros aire) donde los elementos corrosivos como el agua con iones de cloruros, oxígeno, dióxido de carbono y otros gases, se difunde a través del concreto y con un tiempo suficiente alcanza la varilla de refuerzo, provocando su deterioro por corrosión ante el cambio de pH del concreto por lo que se causa el rompimiento de la capa de óxido en el acero que funge como protección. Esta corrosión produce herrumbre, lo cual son óxidos que son de 2 a 10 veces más voluminosos que el acero original y teniendo como consecuencia el agrietamiento del concreto. (Red DURAR, 2000)

Por otra parte, la corrosión afecta el comportamiento a tensión de las varillas de refuerzo debido a la disminución del área de la sección transversal, y que trae como consecuencia, la reducción de su capacidad de carga. Además, como no existe una corrosión uniforme a lo largo de la varilla, disminuye su capacidad de deformarse y tiende a fracturarse.

Como la corrosión natural de las varillas es un proceso lento, para fines de estudio, es necesario acelerarlo mediante la aplicación de una corriente. Esto permite, de cierta forma, controlar el proceso de corrosión y obtener una varilla corroída uniformemente en áreas que se pueden delimitar para su control.

Una forma de acelerar la corrosión en el acero de refuerzo es mediante la técnica de corriente impresa (Ahmad S. , 2009) . Esto se hace con el objetivo de inducir un significativo grado de corrosión en un tiempo determinado. La técnica de corriente impresa tiene varias ventajas, además, del ahorro en tiempo y dinero. Una ventaja de ellas es la posibilidad de controlar la rapidez de corrosión que, por lo general,

varía debido a los cambios en la resistividad, concentración de oxígeno y temperatura.

El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema galvanostático para la aceleración de la corrosión en varillas de refuerzo, como una metodología, servirá como herramienta para acortar el tiempo que duran los proyectos de corrosión, ya que obtener el mismo daño con corrosión natural se requieren años, además, la posibilidad a futuro de probar diferentes medios (diferentes porcentajes de contaminantes, como cloruros) y características del material (diferentes grados de varillas y diámetros variados y distintos tipos de recubrimientos). Estos estudios permitirán sistematizar esquemas de control de calidad, tanto de la varilla de refuerzo, como del concreto mismo, de manera que con ello se garantice la calidad de las obras de infraestructura, su conservación y su durabilidad.

Esta publicación está dividida de la siguiente forma: En el capítulo 1, se inicia con la definición de un galvanostato y una celda electroquímica, la aplicación de las leyes de Faraday para evaluar la pérdida de masa y la velocidad de corrosión. Así también, se enfatiza las características que tiene la técnica de corriente impresa y su aplicación, tanto para proteger el acero como para acelerar la corrosión en éste. Se puntualizan las soluciones sintéticas para reproducir la solución poro del concreto, las características del acero de refuerzo y su soldabilidad, además, el recubrimiento de galvanizado para proteger el acero contra la corrosión. El capítulo 2 muestra la metodología y la matriz experimental, los componentes de los ensayos de corrosión acelerada: fuente de poder, tablero y celdas de corrosión. El esquema eléctrico que se utilizó para controlar la densidad de corriente aplicada a las varillas. En el capítulo 3 están los resultados y comparaciones que se obtuvieron en los distintos medios utilizados y las condiciones que tenían las varillas antes de ser inmersas en el electrolito. Por último, el capítulo 4 presenta las conclusiones sobre la eficiencia y limitaciones del sistema galvanostático y que posibles aplicaciones se tendría para proyectos futuros.

1. Antecedentes

1.1 Galvanostato

Es un instrumento electrónico cuya función básica es la de mantener la corriente del electrodo de trabajo (ET) con respecto al electrodo de referencia (R), esto le permite mantener una corriente constante o variable en forma definida, en una celda electroquímica, sin importar la variación en el voltaje, resistencia óhmica, temperatura u otras fluctuaciones. Además, se monitorea el potencial del electrodo de trabajo con respecto al electrodo de referencia, en lugar de la corriente en la celda. (Barrero Pérez, 2004)

1.2 Celda electroquímica

Es un sistema que está constituido por electrodos introducidos en un electrolito, en el que ocurre una reacción de oxidación-reducción capaz de absorber o generar corriente eléctrica. La celda consiste de tres electrodos: electrodo de trabajo (ET), contra electrodo (CE) y electrodo de referencia (R) (Figura 1.1).

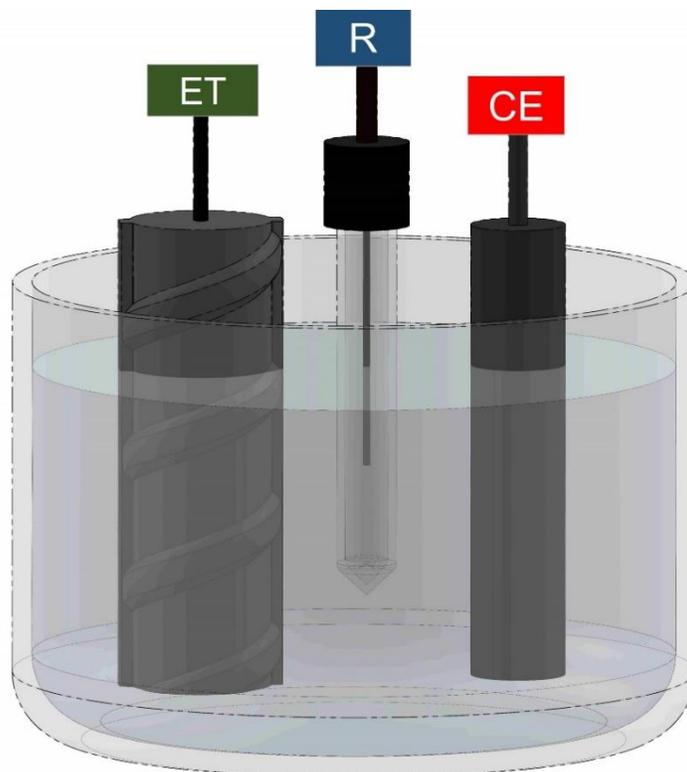
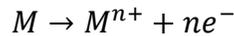


Figura 1.1 Esquema de una celda electroquímica.

Cualquier proceso de corrosión involucra transferencia de cargas (iones y electrones), en particular en el caso de la corrosión húmeda, que se da a través de soluciones acuosas (electrólitos) donde el agua es el disolvente en la solución. Estas soluciones son eléctricamente conductoras. Este proceso de naturaleza electroquímica involucra reacciones químicas de oxidación y reducción. El origen del fenómeno es la presencia de heterogeneidades en la superficie de los metales, que producen zonas de diferentes niveles de energía y propician la formación de la celda electroquímica de corrosión, en la que son indispensables los siguientes elementos (Ahmad Z. , 2006):

Ánodo: Porción de una superficie metálica en donde se lleva a cabo la corrosión (disolución). En este proceso existe una reacción de oxidación donde hay una pérdida o liberación de electrones como consecuencia el metal pasa a su forma iónica, que se representa en la siguiente ecuación:



Siendo M un metal, M^{n+} es su forma iónica y n el número de electrones cedidos.

Cátodo: Porción de la superficie metálica donde se lleva a cabo la reacción de reducción, en la cual los electrones producidos en el ánodo, se combinan con determinados iones presentes en el electrolito como, nitratos, sulfatos etc. En este proceso hay una ganancia de electrones y se representa en la ecuación 2.2:



Electrolito: sustancia que al disolverse en agua da lugar a la formación de iones y es capaz de conducir electricidad, por un flujo de iones. Diferencia de potencial: desigualdad en el estado energético entre los dos electrodos que provoca un flujo de electrones desde el ánodo hasta el cátodo.

Conductor: elemento que conecta eléctricamente los electrodos, conduce los electrones desde el ánodo hacia el cátodo.

En proceso de corrosión en las estructuras de concreto reforzado, el ánodo y el cátodo están en la superficie del acero de refuerzo, y el concreto actúa como el electrolito, formando una celda electroquímica.

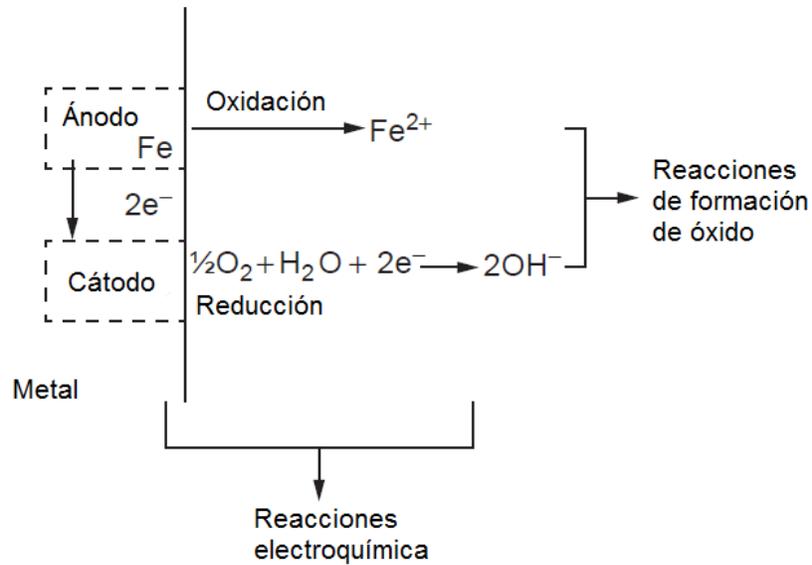


Figura 1.2 Reacciones electroquímicas de la corrosión del acero.

Los problemas de corrosión en los materiales son muy comunes y más si estos tienen reacción con el medio en el que se encuentran. La corrosión tiene un periodo de iniciación; en el que se produce el rompimiento de la capa protectora de óxido del acero. Un periodo de propagación; en el que se produce la corrosión del acero. (Figura 1.3) (Lea & Hewlett, 1971)

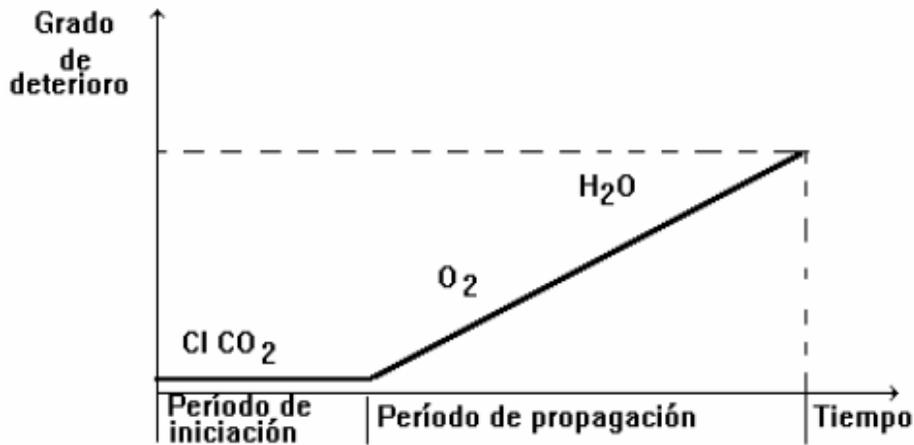


Figura 1.3 Tiempo de vida útil de una estructura.

1.3 Leyes de Faraday

Las leyes de Faraday o leyes de la electrólisis son fórmulas que expresan de manera cuantitativa las cantidades depositadas en los electrodos. Estas leyes fueron enunciadas por Michael Faraday en 1834 y son las siguientes:

1.3.1 Primera ley de Faraday

La cantidad de la masa depositada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado por el electrodo:

$$\text{masa desprendida} = k(\text{constante}) * Q = k * I * t$$

Donde:

Q=carga (Culombios)

I=Intensidad (Amperios)

t=tiempo (segundos)

1.3.2 Segunda ley de Faraday

La cantidad de masa depositada de un elemento en un electrodo es proporcional a su peso equivalente (peso atómico dividido entre su número de oxidación).

$$\text{masa desprendida} = \frac{K(\text{constante}) * \text{peso atómico}}{\text{número de oxidación}}$$

1.3.3 Tercera ley de Faraday

La cantidad de electricidad que es necesaria para que se deposite 1 equivalente gramo de un elemento es $F = 96,500$ culombios (constante de Faraday). Como un equivalente gramo es igual al peso atómico entre el número de oxidación en gramos, por lo tanto:

$$\text{masa desprendida} = \frac{I * t * \frac{\text{peso atómico}}{\text{número de oxidación}}}{F}$$

Donde:

I=Intensidad (Amperios)

t=tiempo (segundos)

F=constante de Faraday

1.4 Velocidad de corrosión

Para evaluar la velocidad de corrosión existen diversos procedimientos, algunos de ellos se encuentran establecidos bajo ciertas normas, como la ASTM G31-72, la cual contiene la metodología y normalización en la preparación de probetas metálicas para un análisis gravimétrico (pérdida de peso). La norma establece que para este método se necesita pesar las muestras previamente, después, someter las muestras al ataque de un agente corrosivo durante un tiempo largo, con el fin de limpiar la pieza expuesta de los productos de corrosión.

Teniendo los valores de peso inicial y peso final, se utiliza la fórmula para el cálculo de velocidad de corrosión con base a la norma ASTM G31-72.

Para el cálculo de velocidad de corrosión (V_{corr}), se emplea la siguiente ecuación:

$$V_{corr} = \frac{K * W}{A * T * D}$$

Donde:

$$\begin{aligned} K &= \text{una constante} \\ T &= \text{tiempo de exposición (hrs)} \\ W &= \text{perdida de masa (g)} \\ D &= \text{densidad } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \\ A &= \text{area (cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

El valor de la constante K depende de las unidades en las que se quiera obtener la velocidad de corrosión. Ver la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Unidades para la velocidad de corrosión

Unidades para la velocidad de corrosión	Valor de K
Milésimas de pulgada por año (mpy)	3.5×10^4
Milímetros por año (mmy)	8.76×10^4

1.5 Corrosión acelerada por corriente impresa

La corriente impresa tiene dos características: se puede utilizar para proteger el acero (protección catódica) o para acelerar el proceso corrosivo. En el sistema de protección catódica por corriente impresa se utiliza para reducir la velocidad de corrosión de la varilla, esto depende de la cantidad de corriente aplicada, si está por arriba o debajo del potencial de corrosión. Conectando eléctricamente el metal a proteger, al polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua y el polo positivo a un electrodo auxiliar que puede estar constituido por chatarra de hierro, ferro-silicio, plomo-plata, grafito, etc. Este sistema se conoce con el nombre

de protección catódica por corriente impresa y se emplea para proteger a la estructura de la corrosión electroquímica, como se muestra en la Figura 1.5. (Avila & Genesca, 1989)

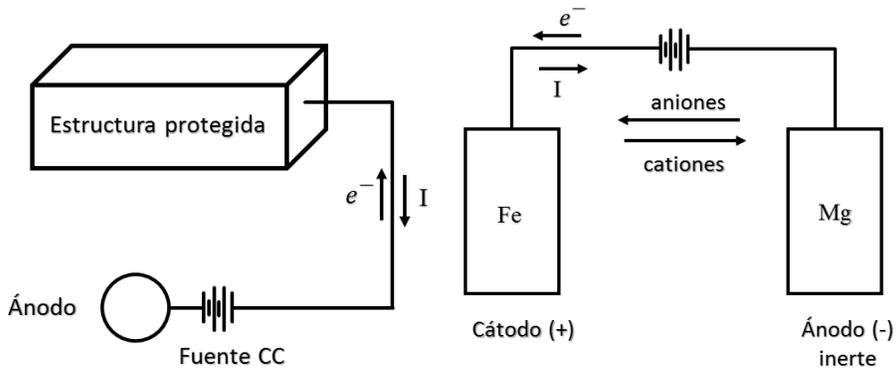


Figura 1.4 Protección catódica por corriente impresa.

En el caso de acelerar la corrosión por corriente impresa, se necesita polarizar la superficie metálica de la estructura mediante en un circuito que impregna corriente (Figura 1.5). El circuito tiene como función que la varilla de refuerzo (cátodo) reciba una corriente por encima del potencial de corrosión del acero, haciendo que se degrade o se corra, lo cual dependerá de su composición química. Es indispensable la existencia de un electrolito que complete el circuito, el cual sería una solución poro. Debido que en el concreto existen poros que naturalmente se llenan, con el tiempo, de la solución que los rodea, es muy difícil realizar mediciones electroquímicas en éstos. Se han empleado soluciones poro sintéticas para simular el entorno químico presente en los poros del concreto.

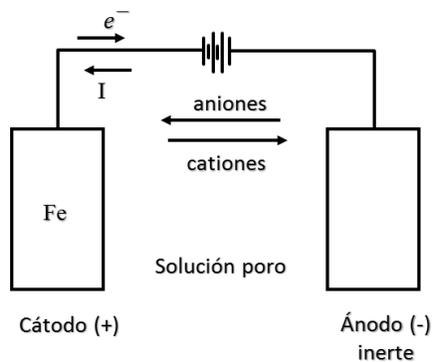


Figura 1.5 Corrosión acelerada por corriente impresa.

Conociendo el tipo de superficie, la intensidad de corriente del cátodo, su peso, geometría, la resistencia eléctrica y la del medio, se puede diseñar un sistema para corroer varillas de refuerzo de forma controlada.

1.6 Pruebas de corrosión acelerada

Una forma de acelerar la corrosión en el acero de refuerzo es mediante la técnica de corriente impresa. Esto se hace con el objetivo de inducir un significativo grado de corrosión en un tiempo determinado. La técnica de corriente impresa tiene varias ventajas, además, del ahorro en tiempo y dinero. Una ventaja es la posibilidad de controlar la rapidez de corrosión que, por lo general, varía debido a los cambios en la resistividad, concentración de oxígeno y temperatura. Del mismo modo, la rapidez de corrosión está directamente relacionada a la densidad de corriente. Al utilizar una densidad de corriente más pequeña, la corrosión es más cercana a la corrosión natural.

La técnica de corrosión impresa se ha utilizado para evaluar el comportamiento del de los elementos de concreto reforzado que incorporan materiales cementicios complementarios, como cenizas volantes, humo de sílice y escoria, contra daños inducidos por la corrosión. Debido a la flexibilidad de la técnica de corriente impresa, materiales como los selladores de concreto o recubrimientos en el acero de refuerzo pueden ser comparados y evaluados dentro de un período de tiempo relativamente corto. La técnica ha sido comprobada como un método válido para estudiar el proceso de corrosión del acero en el concreto, ya que permite reducir el período de iniciación requerido para la despasivación del acero, fijando la velocidad de corrosión deseada sin alterar los productos de corrosión formados.

La principal diferencia electroquímica entre la corrosión inducida por la técnica de corriente impresa con la corrosión natural, es el aumento del potencial a un valor mayor que el potencial transpaso, que no corresponde al potencial de equilibrio o mixto, el cual se obtiene en condiciones normales sin aplicar corriente por una fuente externa. Esto significa que el acero de refuerzo estará polarizado artificialmente con la técnica de corriente impresa. Dicho de otra manera, el acero de refuerzo tendrá una corrosión uniforme cuando se utiliza la técnica de corriente impresa, que será diferente a la corrosión natural, en esta última, la corrosión dependerá del lado del concreto que está bajo un ambiente corrosivo natural. Por consiguiente, se recomienda tomar en cuenta el efecto que tiene la distribución del daño por corrosión en la superficie del acero de refuerzo en el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado (Ahmad S. , 2009).

1.7 Solución poro

Una forma de caracterizar la durabilidad de las estructuras de concreto es su resistencia para evitar la penetración de agentes agresivos tales como el agua, oxígeno, dióxido de carbono y cloruros, los cuales en cierta forma provocan cambios del pH del concreto. Si este cambio se da en el sentido de descenso del pH, las condiciones son propensas para que la varilla de refuerzo pierda su estado pasivo, el cual está dado por la alcalinidad del concreto que la rodea, por consiguiente, el deterioro por corrosión se desarrollará en las varillas (Association, 2002)]

Por medio de soluciones sintéticas es posible estudiar el fenómeno de corrosión en varilla de refuerzo inmersas en el concreto para tratar de reproducir la solución poro del concreto en el intervalo de pH de 9 a 13.6. Aunque, las velocidades de corrosión medidas en solución no se pueden extrapolar de forma directa al comportamiento real del concreto, si se puede evaluar los factores que influyen en el proceso de corrosión y el peso relativo que tienen en el comportamiento global. En la Tabla 1.2 se muestran las soluciones que se han empleado en distintas investigaciones (Zhang Y, 2015) (Li, 1999) (Moreno M., 2004) (Chin W. Joannie, 1999)) (Ghods P., 2009) (Goñi S., 1990).

Tabla 1.2 Soluciones poro utilizadas en distintas investigaciones

Solución poro (SPS)	pH	NaOH	KOH	Ca(OH) ₂	Ca(SO ₄).H ₂ O	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃
SPS 1	13			2.0 (g/L)			
SPS 2	13	3.7 (g/L)	10.5 (g/L)	2.0 (g/L)			
SPS 3	12	0.0833 (g/L)	0.233 (g/L)				
SPS 4	13	0.1 (mol/L)	0.03 (mol/L)	0.03 (mol/L)	0.002 (mol/L)		
SPS 5	14	8.33 (g/L)	23.3 (g/L)	2 (g/L)			
SPS 6	14	0.9 (mol/L)					
SPS 8	13			Saturada			
SPS 9	9					0.3 (mol/L)	0.1 (mol/L)
SPS 10	9					0.015 (mol/L)	0.005 (mol/L)
SPS 11	14	0.14 (mol/L)	0.23 (mol/L)	0.002 (mol/L)			

1.8 Varilla de refuerzo

Como el propósito de las estructuras de concreto reforzada consiste en resistir las fuerzas de tensión, la varilla de refuerzo cumple esa función, por lo que debe de reunir ciertas características que proporcionan las propiedades mecánicas y químicas del acero. De acuerdo a la norma NMX- B-506 (CANACERO, 2019), las varillas de refuerzos deben de cumplir con la composición química de la colada, del producto y de las propiedades mecánicas, tal como se muestran en la Tabla 1.3, 1.4 y 1.5. Cabe aclarar que esta norma no especifica el contenido de carbono, manganeso y azufre, pero si el contenido de fosforo.

Tabla 1.3 Composición química por colada

Elemento	Max (%)
Carbono	
Manganeso	
Fosforo	0.050
Azufre	
Silicio	

Tabla 1.4 Composición química por producto

Elemento	Max (%)
Carbono	
Manganeso	
Fosforo	0.062
Azufre	
Silicio	

Tabla 1.5 Propiedades mecánicas en tracción

	Grado 42(412)	Grado 52(510)
Límite de fluencia mínimo kg/mm ² (MPa)	42(412)	52(510)
Resistencia a la tensión mínima kg/mm ² (MPa)	63(618)	72(706)
Numero de designación	%Alargamiento mínimo en 200mm	
2,5,3, 4, 5, 6	9	8
7 y 8	8	7
9 a 18	7	6

1 N/mm² = 0.10197 kg/mm² = 1 MPa = 10 kg/cm²

Si se requiere soldar los aceros al carbono de los grados 42 y 52, no existen disposiciones específicas en la norma NMX-B-506 (CANACERO, 2019) para mejorar su soldabilidad. Se recomienda utilizar un procedimiento de soldadura adecuado a la composición química y al uso o servicio previsto. Para el desarrollo del procedimiento de soldadura es recomendable utilizar los códigos de soldadura y construcción: AWS D1.4/D1.4M-2011 (AWS, 2011) y ACI 318-14 (ACI, 2014). El primero describe la selección adecuada del material de aporte, las temperaturas de precalentamiento y/o entrepasos, así como los requisitos que deben de cumplir las especificaciones del procedimiento de soldadura y su calificación. El segundo código describe donde se puede aplicar las varillas soldadas y que razón de resistencia a la tensión y límite de fluencia debería tener el material soldado.

Por otro parte, para el desarrollo del procedimiento de soldadura, un concepto fundamental es el carbono equivalente (C.E.), como existen diferentes fórmulas

para estimarlo de acuerdo al tipo de acero o composición química, la interpretación del carbono equivalente es necesario referirse a los diagramas de Graville, ver Figura 1.6. La fórmula de carbono equivalente para las varillas de acero al carbono de acuerdo a la norma AWS D1.4 (AWS, 2011) es:

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6}$$

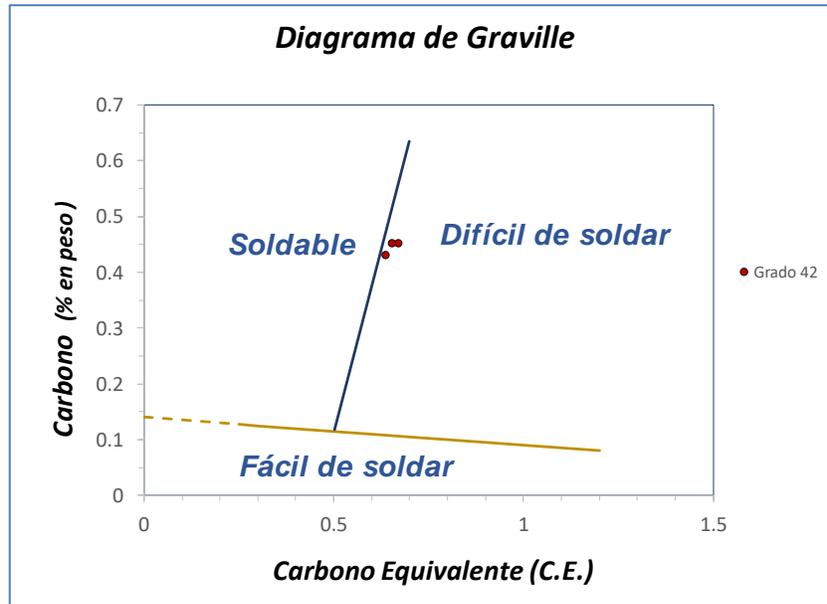


Figura 1.6 Diagrama de Graville para estimar la soldabilidad de un acero. Los puntos rojos son un ejemplo de la ubicación del acero con base a los valores promedio, máximos y mínimos de la composición química de la colada de la varilla.

1.9 Galvanizado

Los recubrimientos de zinc es una manera de proteger el acero contra la corrosión mediante la formación de una barrera de protección y protección galvánica. En la barrera de protección, el recubrimiento de zinc separa el acero de medio corrosivo; por lo que el zinc se corroerá primero antes que el medio corrosivo alcance el acero. En la corrosión galvánica, el zinc se corroerá primero por ser menos noble o anódico que el acero, e incluso, si existen imperfecciones como bordes puntiagudos o existe un rasguño en el recubrimiento. Los procesos de manufactura tradicionales utilizados en la producción de recubrimientos de zinc son: inmersión en caliente, rociado térmico y electrodeposición. (Yeomans , 2004) (Marder , The metallurgy of zinc-coated steel , 2000)

En el caso de la inmersión en caliente, el acero previamente desoxidado superficialmente se inmersa en un baño de zinc líquido a una temperatura aproximada de 450°C. Por lo general, el proceso de inmersión dura entre 5-10 minutos, tiempo suficiente para que se efectúen las reacciones entre el hierro y el

zinc, estas reacciones permiten la formación de capas de compuestos intermetálicos que permiten una unión metalúrgica y no por adherencia.

Por otro lado, la corrosión de las varillas de refuerzo se debe a que el concreto tiene poros y pequeños capilares donde los elementos corrosivos como el agua, iones de cloruros, oxígeno, dióxido de carbono y otros gases, se difunde a través del concreto y con un tiempo suficiente alcanza la varilla de refuerzo, provocando su deterioro por corrosión por un cambio en el pH del concreto que produce que la capa formada inicialmente de óxido en el acero se rompa. Esta corrosión produce herrumbre, lo cual son óxidos que son de 2 a 10 veces más voluminosos que el acero original y teniendo como consecuencia el agrietamiento del concreto.

Una de los métodos más utilizados para proteger la varilla de refuerzo del concreto es por medio de un recubrimiento a base de zinc utilizando el proceso de galvanizado en caliente, lo cual implica formar una capa protectora contra la corrosión de la varilla. Esta capa protectora tiene dos funciones: 1) Por una parte, una vez formada la capa de zinc, de forma natural se forma una capa pasiva, la cual evita la corrosión. 2) El recubrimiento de zinc también proporciona protección catódica, esto quiere decir, que cuando el proceso corrosivo inicia, el zinc será el primero en corroerse debido al diferente potencial eléctrico entre el zinc y el acero. (Vourlias G., 2006) (Pistofidis , 2006)

Sin embargo, a pesar de las ventajas que proporciona el galvanizado para proteger el acero de refuerzo, cuando se utiliza para ambientes marinos, las varillas soldadas y galvanizadas pueden presentar el problema de fragilización por metal líquido en zonas aledañas a la soldadura debido a los esfuerzos residuales, deformación, y probablemente, a la presencia de hidrógeno generado durante la limpieza previa de la varilla antes de galvanizar y a las reacciones de hidratación que ocurre en el concreto durante el fraguado del mismo. (Yeomans , 2004) (Okafor, 2013) (Mendala, 2012)

2. Desarrollo

El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema galvanostático para la aceleración de la corrosión en varillas de refuerzo, en dos medios distintos que simulan el concreto de las cuales una contendrá contaminantes y utilizando como base varillas NMX-B-506 (CANACERO, 2019) con distintos procesos (soldadura y galvanizado), mediante el diseño de un circuito eléctrico conectado a una fuente de poder que suministrará una densidad de corriente definida durante tiempo calculado para obtener un porcentaje de pérdida de masa deseado u objetivo.

2.1 Metodología

Con base al control de la corriente impresa comparar entre la pérdida de masa por corrosión acelerada del acero de refuerzo y los cálculos teóricos después de una pérdida de masa del 20%. Las actividades se realizaron como se muestran en la Figura 2.1 pero estas están descritas detalle en la lista siguiente:

⇒ Selección de material y definición de matriz experimental

- Tipo varillas
- Condiciones (galvanizado, soldadura y soluciones poro)
- Definición de longitud y bisel
- Contraelectrodo

Preparación de varillas

- Maquinados (Careos, biseles, identificación y barrenados)
- Galvanizado
- Soldadura
- Limpieza y registro de pesos de varillas
- Preparación de probetas para ensayos de corrosión (delimitación del área a ensayar y colocación de abrazaderas para la sujeción en la celda de corrosión).

a) Sistema eléctrico

- Diseño y cálculos teóricos para la experimentación (circuito eléctrico, cálculo de tiempo requerido para pérdida de masa deseada y cálculo de corriente requerida).
- Fabricación de panel de control

b) Celdas de corrosión

- Diseño y construcción, verificación de estado de celdas de corrosión

Preparación de medios de corrosión

Montaje de probetas a ensayar

Ensayo de corrosión acelerada y monitoreo de potencial de corrosión

Limpieza y registro de pesos de varillas

Análisis de resultados

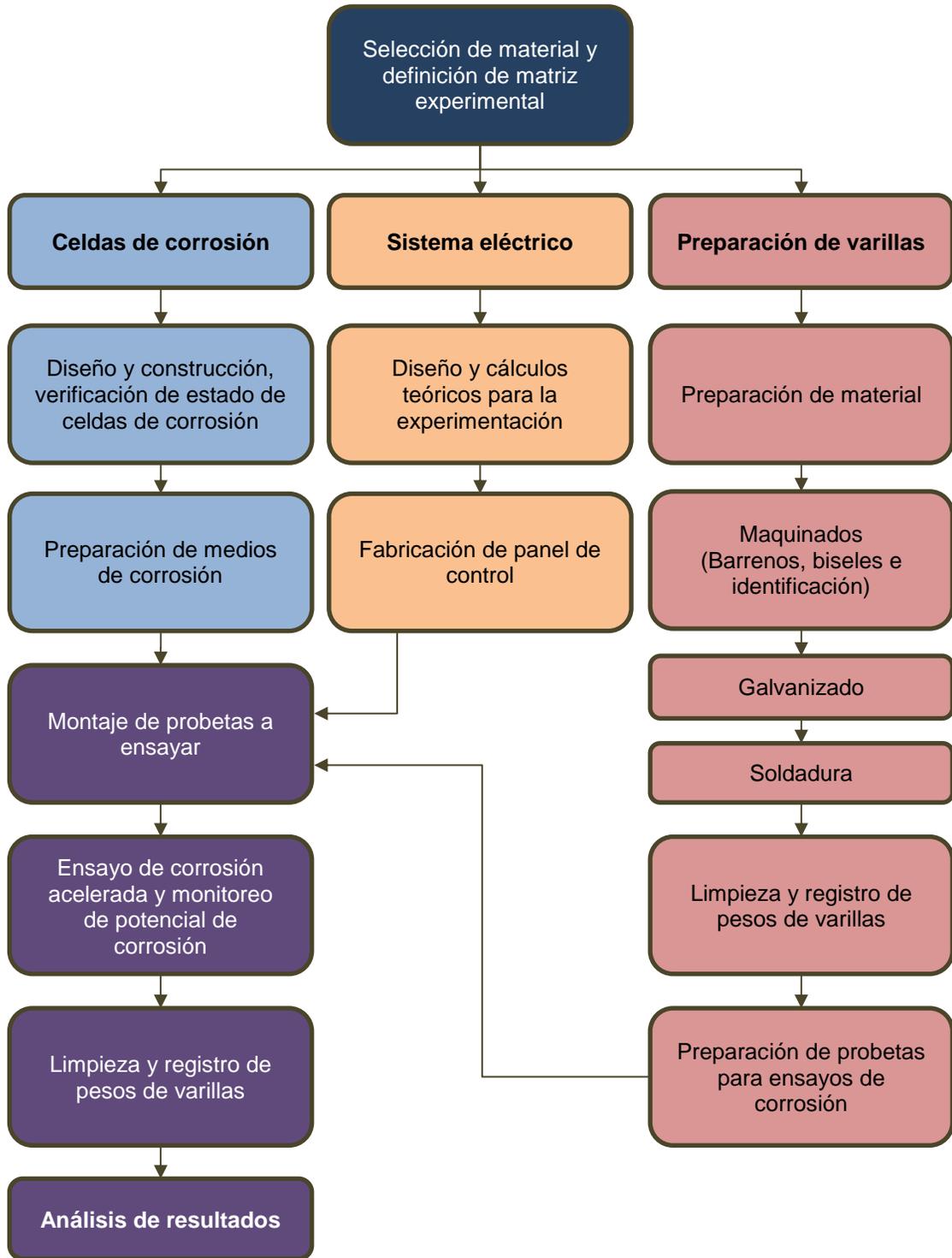


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología.

2.2 Matriz experimental y dimensiones de varillas

Para el experimento se utilizaron varillas de grado 42 de distintas marcas, varillas de llegada o normalizadas es decir tal cual salieron de su fabricación, a partir de estas varillas seleccionaron unas que serían el blanco o testigo, soldadas, galvanizadas y galvanizadas con soldadura. Además, para los electrolitos se seleccionó una solución poro con la diferencia que en una se adicionaría NaCl al 3.5%. Por cada condición e se utilizaron tres varillas, siendo un total de 24 varillas.

Tabla 2.1 Matriz experimental

Varillas	Recubrimiento	Proceso	Medio	Numero de probetas
	Galvanizadas	Soldadas	SP	3
			SP+ 3.5% de NaCl	3
		Sin soldar	SP	3
			SP+ 3.5% de NaCl	3
	Sin galvanizar	Soldadas	SP	3
			SP+ 3.5% de NaCl	3
		Sin soldar	SP	3
			SP+ 3.5% de NaCl	3

Las varillas se cortaron con una longitud de 50cm (sección completa) y para las soldadas 2 tramos de 25cm.

A los tramos de sección completa se les careo los extremos, y a los tramos que se iban a soldar, se carearon y biselaron como se muestra en la Figura 2.7. Una vez terminados los maquinados se pasaron a un proceso de limpieza superficial realizado con una carda.

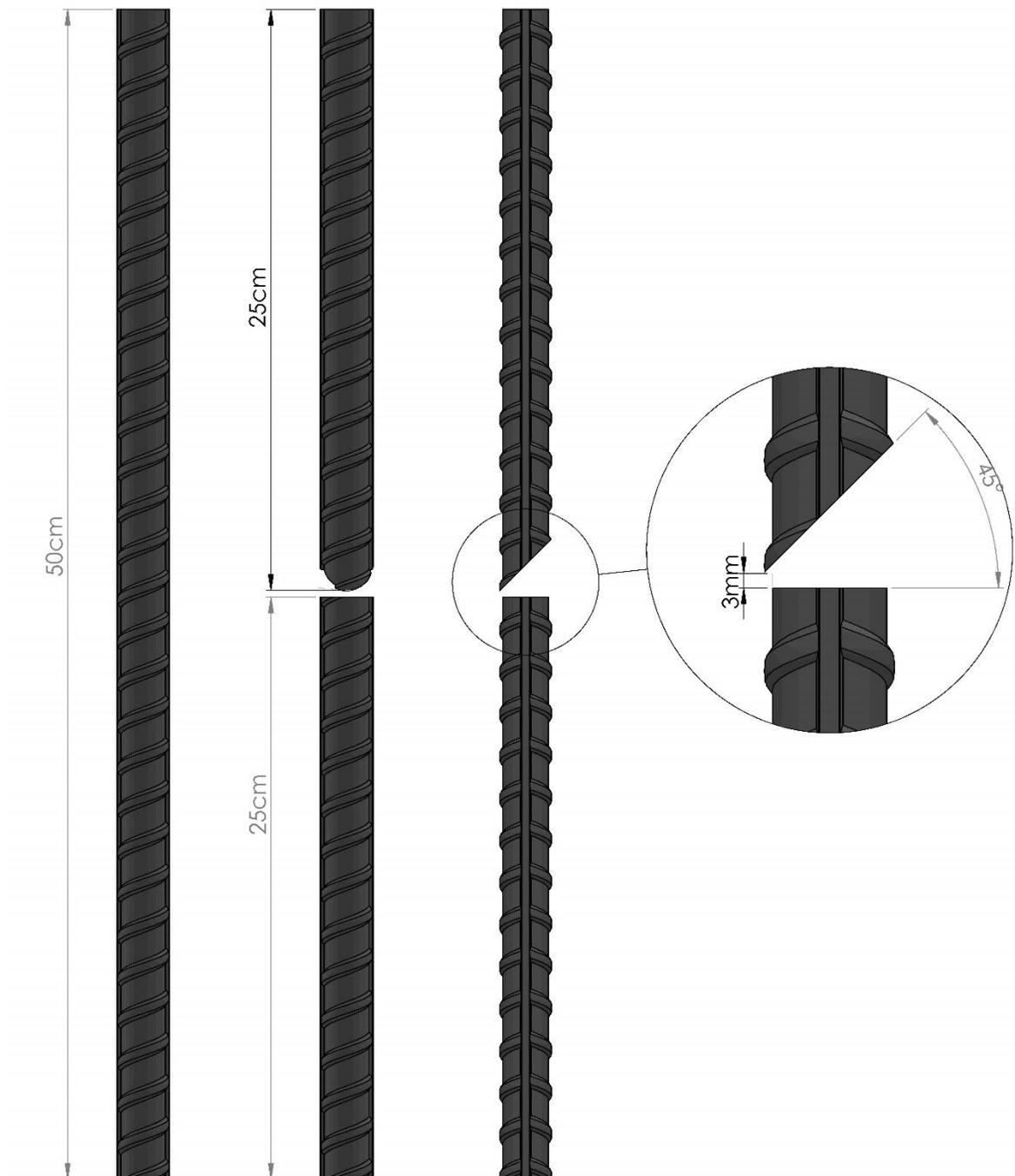


Figura 2.2 Esquema de la preparación de probetas.

Una vez cortadas y careada la superficie de las varillas mediante el maquinado (Figura 2.3), las correspondientes se llevaron a galvanizar (Figura 2.4). El galvanizado se realizó por la técnica de inmersión en caliente con un espesor aproximado de $174\mu\text{m}$ por una empresa externa.



Figura 2.3 Varillas de cortadas y biseladas.



Figura 2.4 Varillas galvanizadas.

Después del galvanizado, las varillas con bisel fueron soldadas, ver la Figura 2.5. Se soldaron por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés), utilizando una apertura de raíz de 3mm, la temperatura de precalentamiento

fue de 200°C, la temperatura de entrespasos de 250°C, el material de aporte o electrodos fue E9018M con un diámetro de 1/8" para los primeros 12 pasos, con los intervalos de 90-160 amperes y 20-24 volts. Para los pasos subsiguientes (del 13 al 30) el mismo tipo de electrodo, pero con mayor diámetro (5/32"), con los intervalos de 130-210 amperes y 22-26 volts.



Figura 2.5 Fotografías de las varillas durante su proceso de soldadura.

Para finalizar se hizo una clasificación y nomenclatura para un total de 24 varillas como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Nomenclatura utilizada para clasificar las varillas

Nombre	Especificaciones
GS1	Varilla galvanizada soldada en solución poro + NaCl al 3.5%
GS2	Varilla galvanizada soldada en solución poro
GN1	Varilla galvanizada en solución poro + NaCl al 3.5%
GN2	Varilla galvanizada en solución poro
VS1	Varilla soldada en solución poro + NaCl al 3.5%
VS2	Varilla soldada en solución poro
VN1	Varilla en solución poro + NaCl al 3.5%
VN2	Varilla en solución poro

Con esa clasificación se le asignó un numero consecutivo a cada varilla y se procedió marcado con lápiz eléctrico. Para las conexiones eléctricas, se les hizo un barrenado a cada varilla en la parte superior.

Finalmente se procedió su limpieza y registro de masa, después, se les puso un recubrimiento de resina en los extremos para delimitar la zona expuesta como se muestra en la Figura 2.6

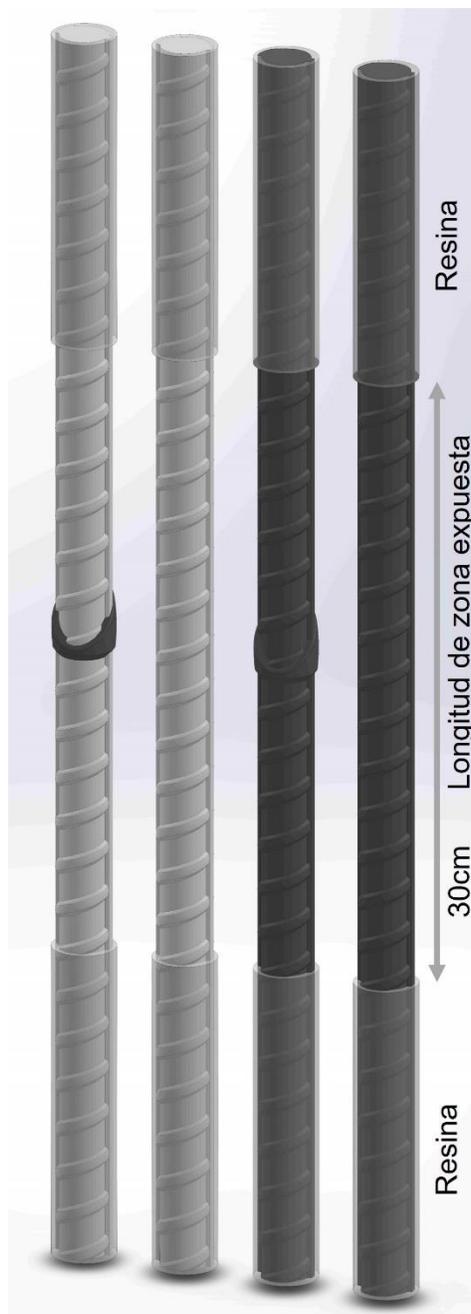


Figura 2.6 Esquema de la delimitación de la zona expuesta .

2.3 Sistema eléctrico

Primero se estableció la densidad de corriente de $350\mu A/cm^2$ y se determinó el área de la varilla expuesta:

$$A = 2\pi rh$$

$$A = 2\pi * 1.27cm * 30cm$$

$$A = 239.38 cm^2$$

Sabiendo el área, se calculó la corriente necesaria para mantener la densidad de corriente por varilla (I_v) y por celda (I_c)

$$I_v = \text{densidad de corriente} * A = 350 \mu A/cm^2 * 239.38 cm^2 = 83786.27 \mu A \\ = 0.083A$$

$$I_c = \text{densidad de corriente} * 3 A = 350 \mu A/cm^2 * 3 * 239.38 cm^2 \\ = 251358.82 \mu A = 0.251A$$

2.3.1 Circuito

Para el proceso de corrosión acelerada en las varillas de refuerzo por corriente impresa, se desarrolló un sistema eléctrico que consistió de una fuente de poder híbrida (control de voltaje o control de corriente), la cual fue configurada en modo de corriente (galvanostato) a través de la cual se establecieron los valores de corriente constante. Esta corriente aplicada es la corriente impresa que promueve la corrosión acelerada en las varillas, la cual es distribuida en las distintas celdas (tres varillas por celda). Las celdas se conectaron en serie y las varillas en paralelo. también se consideró el amperímetro, la resistencia principal que mide la corriente total aplicada, las resistencias por cada varilla que sirvieron para medir el voltaje que se aplicaba a cada una de éstas y, por consecuencia, la corriente que se suministraba por cada varilla, los interruptores para aislar las conexiones de una celda con otra y medir de forma aislada cada una de las celdas utilizadas en el ensayo. En la Figura 2.7 se muestra el circuito eléctrico para la prueba de corrosión acelerada.

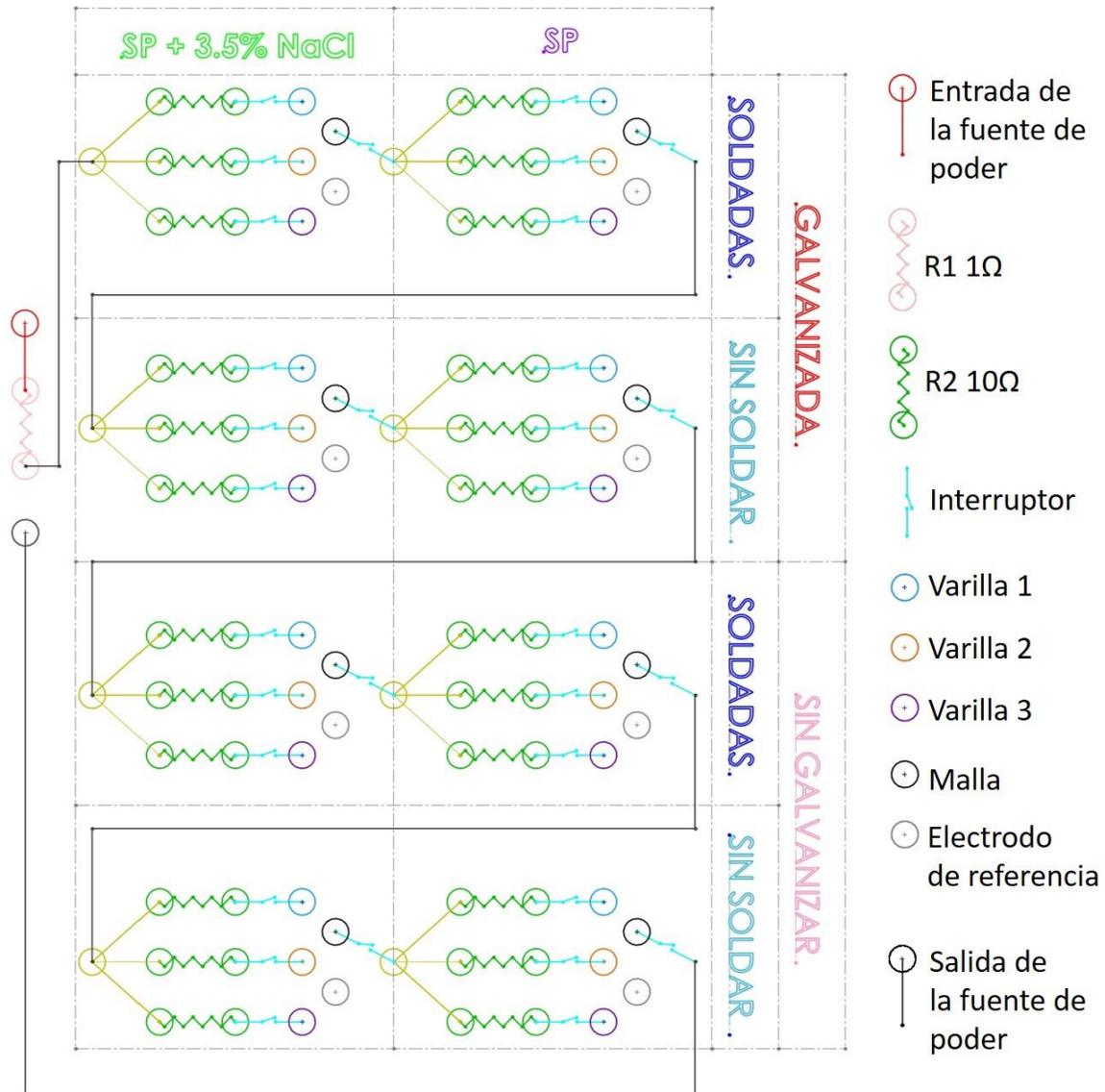


Figura 2.7 Esquema de circuito utilizado para la prueba de corrosión acelerada.

2.3.2 Panel de control

Con el circuito establecido en la Figura 2.7 se diseñó un panel de control para un mejor control y medición de corriente del sistema, se utilizó como base un acrílico perforado donde se colocaron terminales tipo borne y con sus correspondientes resistencias, también se agregó un cable para conectar la varilla y mallas (contra electrodos) con su correspondiente terminal en el panel de control.



Figura 2.8 Panel de control.

2.3.3 Cálculos de pérdida de masa

Para este experimento se calculó considerando una pérdida del 20% de su masa en la zona expuesta con este proceso. Primero se obtiene la pérdida de masa del material, y con ayuda de la Ecuación de Faraday obtener el tiempo en que el material perdería ese 20%, conociendo que la densidad de corriente (J) es de $350\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y el material es hierro.

Fórmula para obtener la masa del material:

$$m = \rho * v$$

Donde:

Densidad del material: 7.874 g/cm^3

Volumen del material: $\pi r^2 h$

$r = \text{radio} = 1.27 \text{ cm}$

$h = \text{altura} = 30 \text{ cm}$

$$m = \rho * \pi r^2 h = \left(7.874 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) * (\pi(1.27 \text{ cm})^2(30 \text{ cm})) = 1196.94 \text{ g}$$

La masa obtenida es la masa total de la zona expuesta del material. Para conocer cuál es el 20% de pérdida de masa de la zona expuesta se realizó lo siguiente:

$$m * 0.20 = 1196.944407 \text{ gm} * 0.20 = 239.38 \text{ g}$$

Por lo tanto, el 20% de la pérdida de masa de la zona expuesta de una varilla de 25.4mm (1in) de diámetro es de 239.38g. Con ayuda de la Ecuación de Faraday obtenemos el tiempo que necesita el material para perder esa masa en la zona expuesta, donde la densidad de corriente es:

$$J = 350 \mu\text{A/cm}^2.$$

Ecuación de Faraday:

$$W = \frac{I t M}{n F}$$

$W = \text{Peso del metal corroído o electrodepositado en una}$

$\text{solución acuosa (g)} = 239.38 \text{ g}$

$I = \text{Flujo de corriente (A)}$

$t = \text{tiempo (s)}$

$M = \text{Masa atómica del metal } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) = 55.85 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

$n = \text{numero de electrones producido o consumido en el proceso} = 2$

$F = \text{constante de Faraday} = 96500 \frac{\text{A s}}{\text{mol}}$

Para conocer el flujo de corriente se obtiene con la fórmula de densidad de corriente donde la densidad ($J = 350 \mu A/cm^2$):

$$J = \frac{I}{S}$$

$$J = \text{densidad de corriente} \left(\frac{\mu A}{cm^2} \right)$$

$$I = \text{Flujo de corriente} (\mu A)$$

$$S = \text{area en contacto con el flujo de corriente} (cm^2) = 2\pi r * h$$

S se obtiene con el área que está en contacto con la corriente, en este caso es la zona expuesta con la solución ($S = 2\pi r * h$).

$$J * S = I = 350 \frac{\mu A}{cm^2} * (2\pi(1.27 \text{ cm})(30 \text{ cm})) = 83786.27 \mu A$$

De la fórmula de Faraday se despeja el tiempo y se sustituyen los valores obtenidos para conocer el tiempo (segundos y días) que necesita la varilla para perder el 20% de su masa de la zona expuesta:

$$t = \frac{W n F}{I M} = \frac{239.38 \text{ g} * 2 * 96500 \frac{A s}{mol}}{0.08378627607 \text{ A} * 55.85 \frac{g}{mol}} = 9873365.59s$$

$$t (\text{días}) = 9873365.59s * \left(\frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} \right) = 114.27 \text{ días} \approx 114 \text{ días}$$

2.4 Celdas de corrosión

2.4.1 Diseño y construcción

Las celdas de corrosión requieren tres elementos principales, el electrodo de trabajo es la varilla, el contra electrodo una malla de acero galvanizado calibre 16 y la solución poro como el electrolito. Por las dimensiones de las varillas se diseñó un recipiente o celda con tubos de PVC de cuatro pulgadas de diámetro, compuesto de un tramo de tubo, 2 tapas y 2 coples como se muestra en la Figura 2.9. El tubo se cortó a 60 cm y se unieron las piezas con pegamento para PVC, la excepción fue la tapa de arriba. Después del tiempo recomendado en la etiqueta del pegamento, se procedió a llenar de agua los recipientes verificando que no hubiera fugas. La tapa de arriba se diseñó como se muestra en la Figura 2.10 y cuenta con tres orificios de 30mm para las varillas, el orificio central sirvió para el electrodo de referencia y el resto de ellos para permitir la aireación.

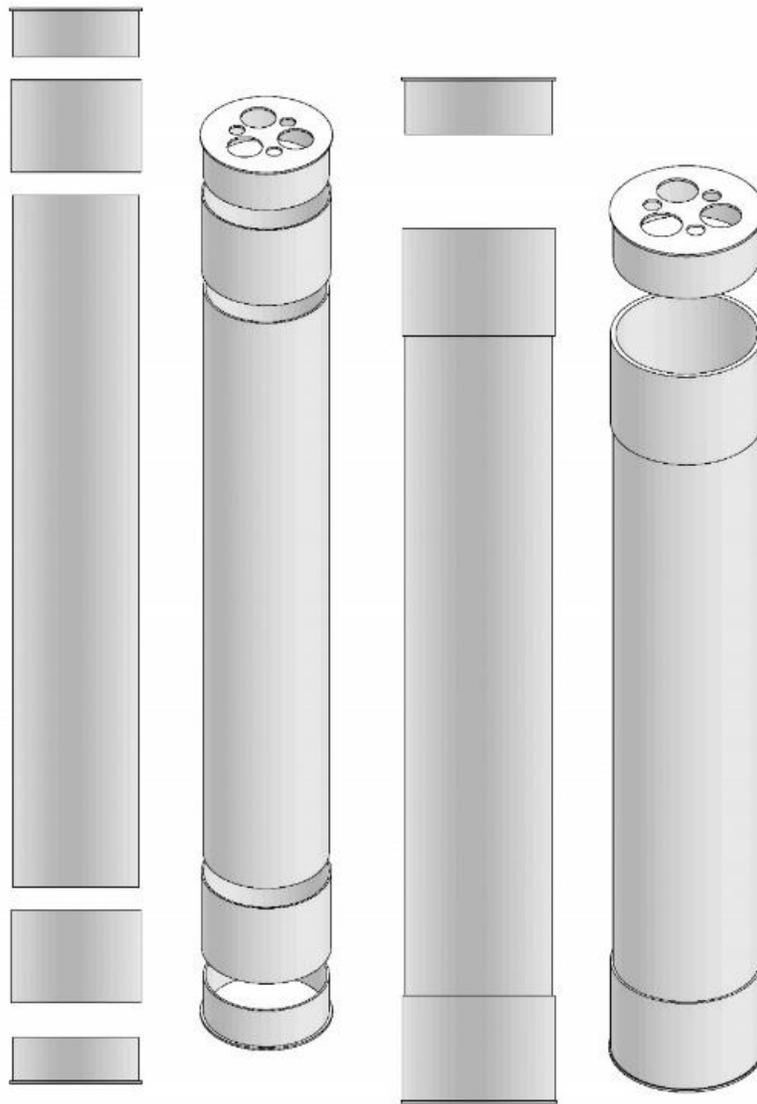


Figura 2.9 Esquema de partes y armado de la celda.

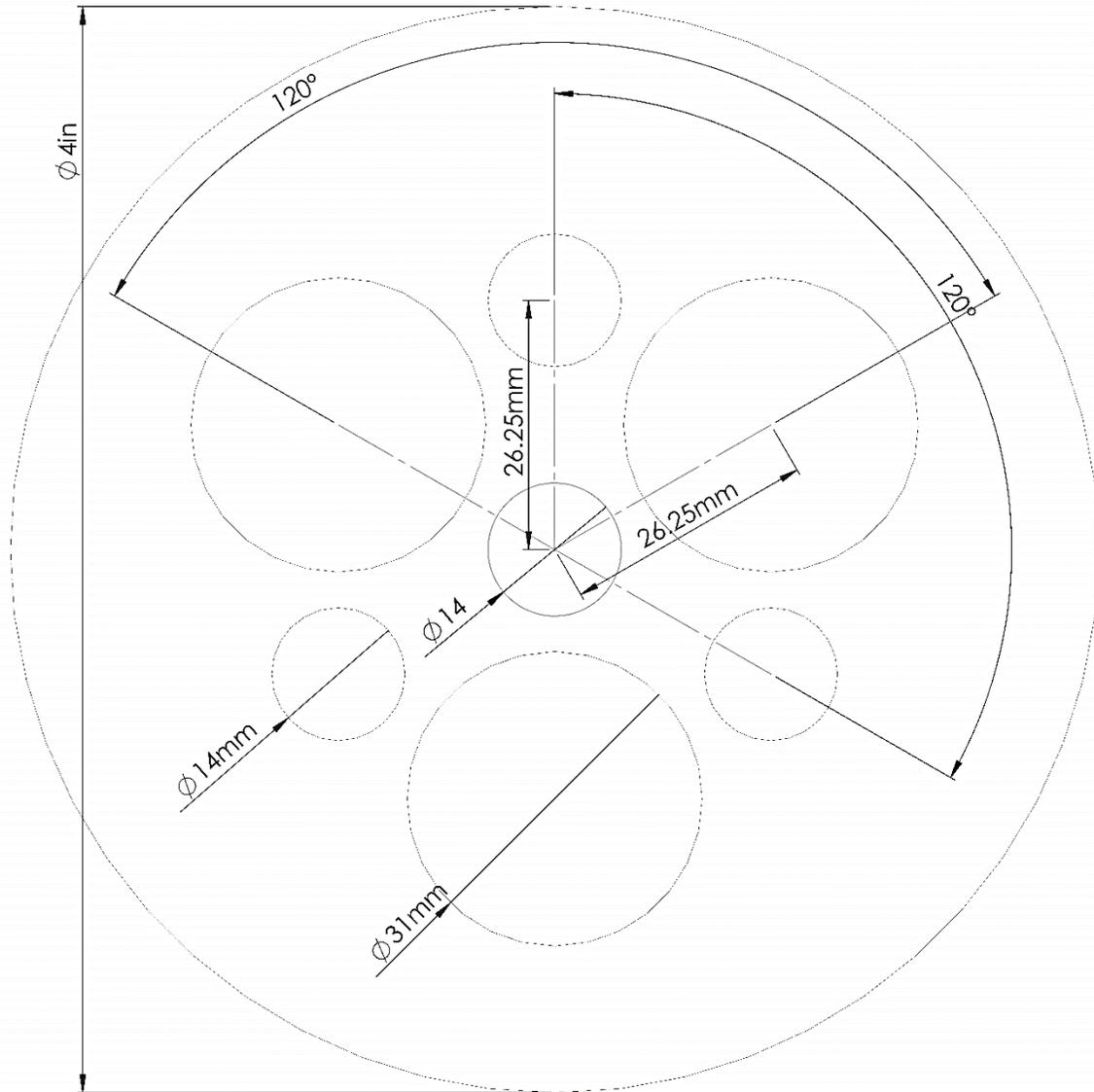


Figura 2.10 Esquema de la tapa de las celdas.

2.4.2 Preparación de electrolitos

Se prepararon dos diferentes soluciones, las cuales tuvieron como base la misma solución poro con la diferencia que a una se le adiciono NaCl al 3.5%. Esta solución poro consiste de 8.33 g/l de hidróxido de sodio (NaOH), 23.3 g/l de hidróxido de potasio (KOH), 2 g/l de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Con esta composición se tiene un pH de 13.6, que fue monitoreado con tiras de pH.

2.5 Montaje del sistema de corrosión acelerada.

La colocación de las varillas en las celdas de corrosión, en donde, por cada celda, se colocaron tres varillas que fueron sujetadas utilizando abrazaderas, tal como se muestra en la Figura 2.11.

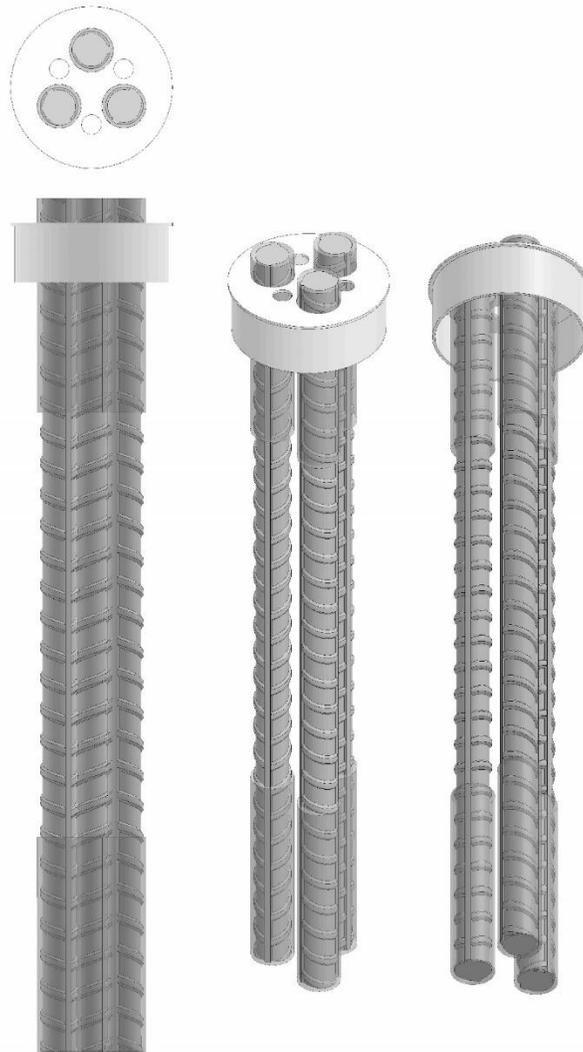


Figura 2.11 Esquema de la colocación de las varillas en la celda.

Una vez que se comprobó que el recipiente donde las varillas iban a estar inmersas no tenía fugas, se introdujo la malla en éste, a su vez, la conexión para el panel de control. Posteriormente, se vertieron los distintos electrolitos por cada uno de los recipientes o celdas y, por último, las varillas fueron introducidas, Ver la Figura 2.12.

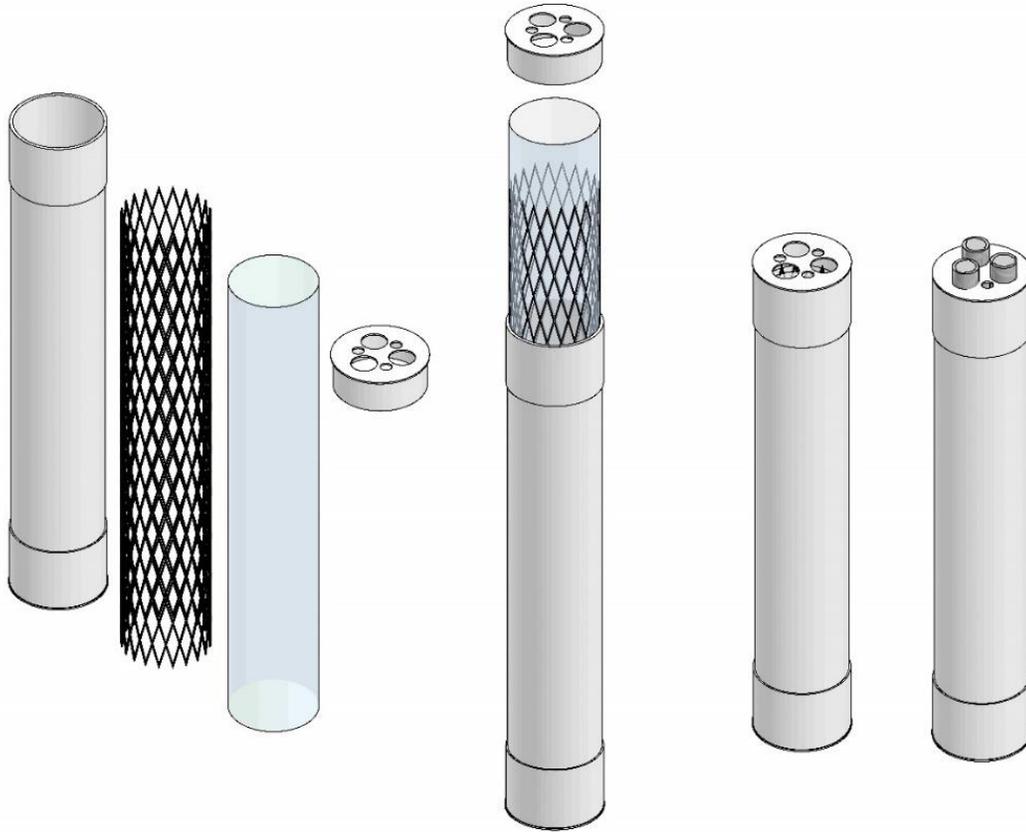


Figura 2.12 Esquema del armado de celdas.

Con las celdas armadas se procedió a la conectar las varillas y mallas con el panel de control (Figura 2.13), se verificó que las conexiones tuvieran continuidad.

2.6 Corrosión acelerada

Para iniciar con los ensayos de corrosión acelerada se conectó una fuente de poder al panel de control, y se comenzó a regular la corriente dejándola en 0.251A por celda como se había calculado previamente. Se verificó la corriente periódicamente para asegurarnos que no presentara variaciones, en caso que las hubiera, poder ajustar la demanda de voltaje en caso de ser necesario. En la Figura 2.13 muestra de como se configuro el tablero (control de corriente) y las celdas de corrosión. Asimismo, la fuente de poder (Figura 2.14) con el amperímetro, este último, mide la corriente total que se aplica a todas las celdas. La Figura 2.15 presenta el sistema galvanostático completo.



Figura 2.13 Fotografía de todo el sistema conectado.

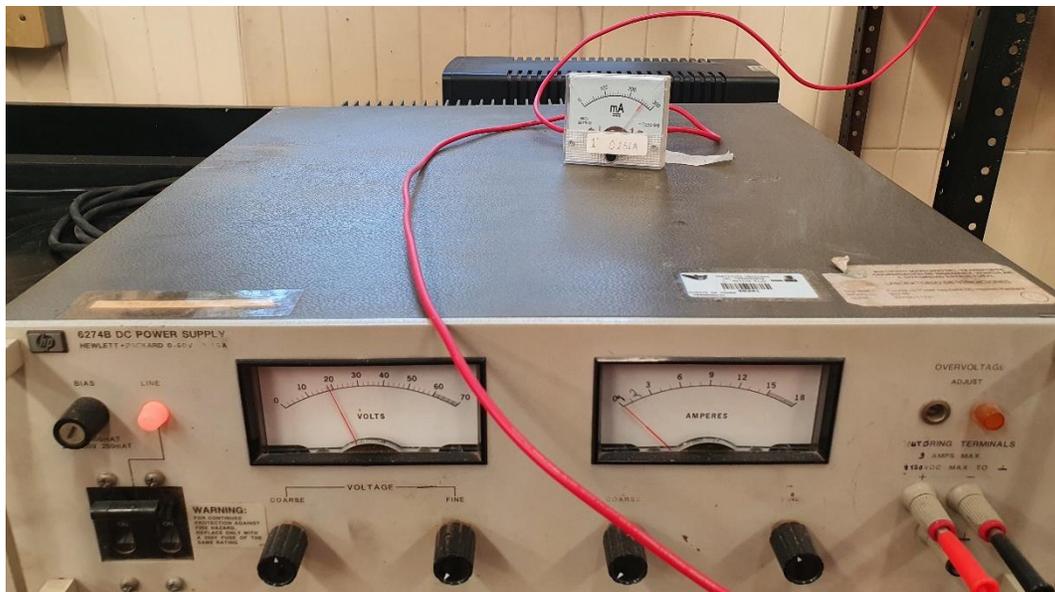


Figura 2.14 Fuente de poder.



Figura 2.15 Fotografía del sistema completo.

3. Resultados

Cuando se finalizó el tiempo calculado se desconectó el sistema y se procedió a desarmar las celdas y realizar un registro fotográfico de las varillas (figuras 3.1 y 3.2), posteriormente, su limpieza (figuras 3.3 y 3.4) y su registro de masa final para compararlo con el anterior (Tabla 3.1).

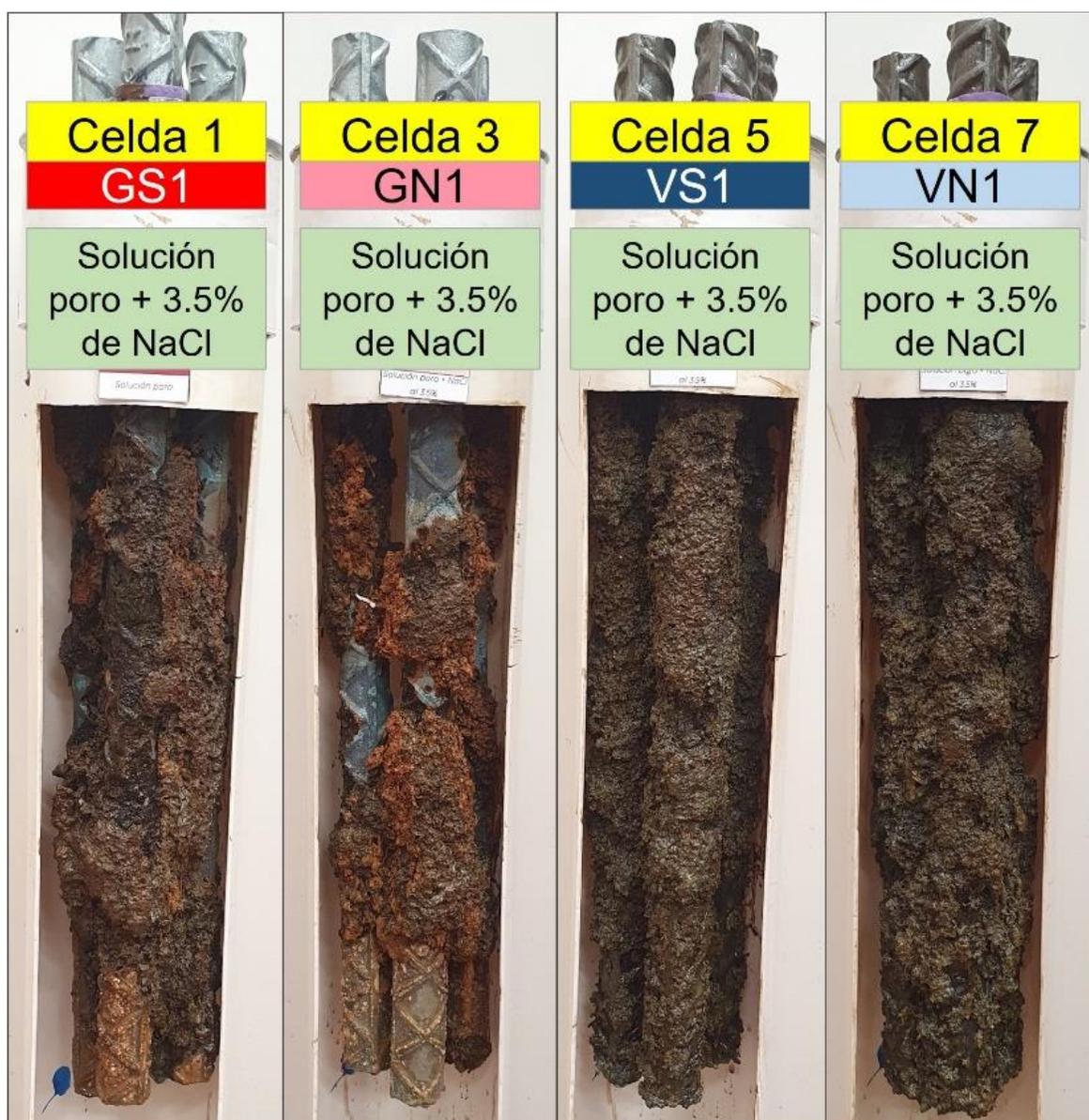


Figura 3.1 Mayor cantidad de productos de corrosión de las celdas que contienen cloruros.

Como se puede ver en la Figura 3.1, todas las varillas que estuvieron inmersas en solución poro más 3.5% de cloruro de sodio presentaron una corrosión significativa. En cambio, las varillas inmersas en solución poro y sin cloruros no se observó productos de corrosión que indicaran que las varillas fueran afectadas por corrosión de forma significativa, ver Figura 3.2.



Figura 3.2 Menor cantidad de productos de corrosión en las celdas sin cloruros.

Para limpiar las varillas se utilizó un cepillo de alambre y ácido muriático (50% ácido clorhídrico y 50% de agua). En las figuras 3.3 y 3.4 se exponen las varillas limpias. Las varillas galvanizadas y soldadas junto con las varillas testigos tienen mayor daño por corrosión que las varillas galvanizadas y las varillas soldadas, ver Figura 3.3.

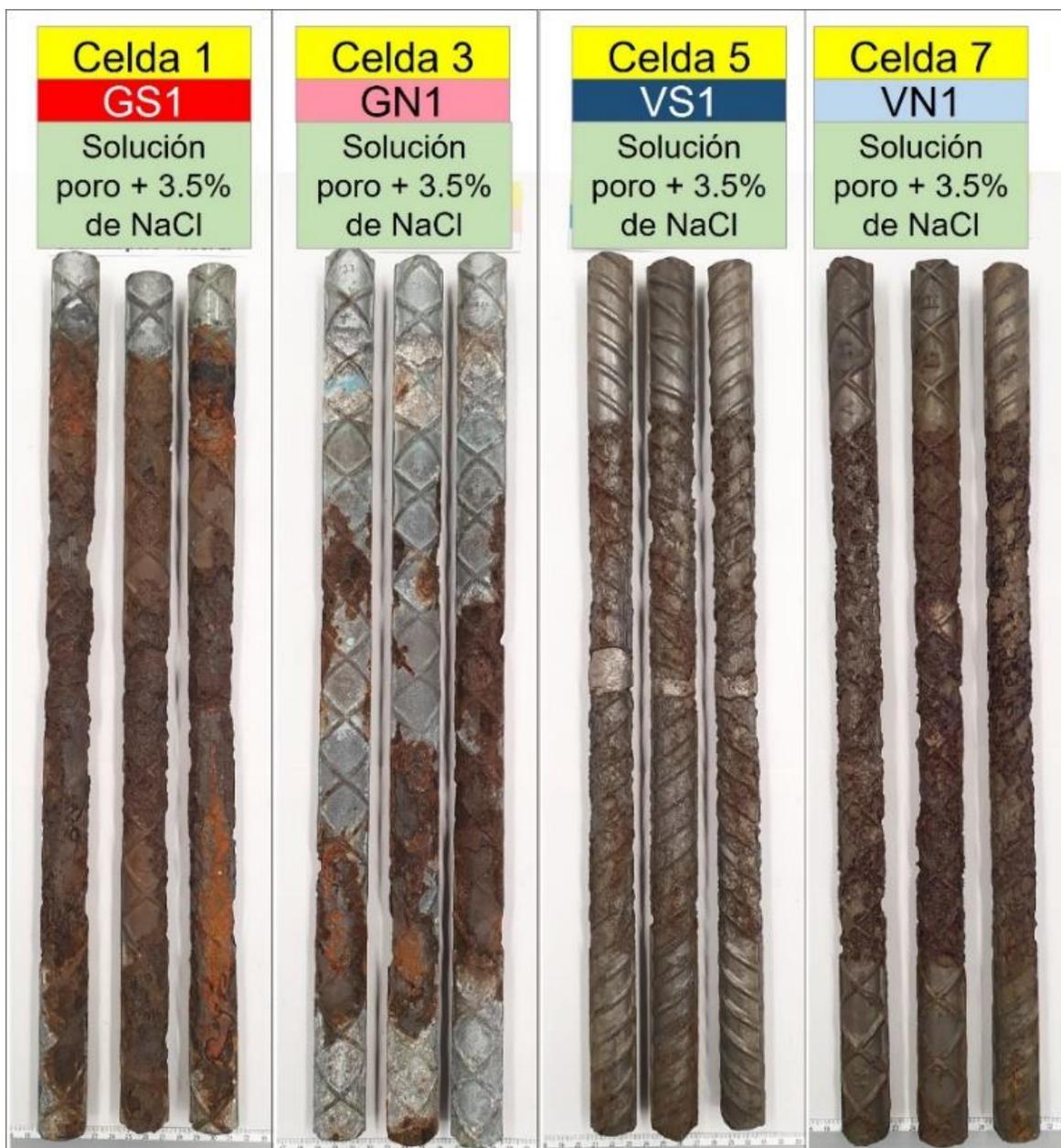


Figura 3.3 Varillas con limpieza final de las celdas con cloruros.

Las varillas limpias y que fueron inmersas en solución poro, no presentaron un daño significativo por corrosión en la zona expuesta. Sin embargo, En las zonas donde hubo recubrimiento para delimitar la zona expuesto, se observan daños, por lo que, se requiere modificar el tipo de recubrimiento. ver Figura 3.4.

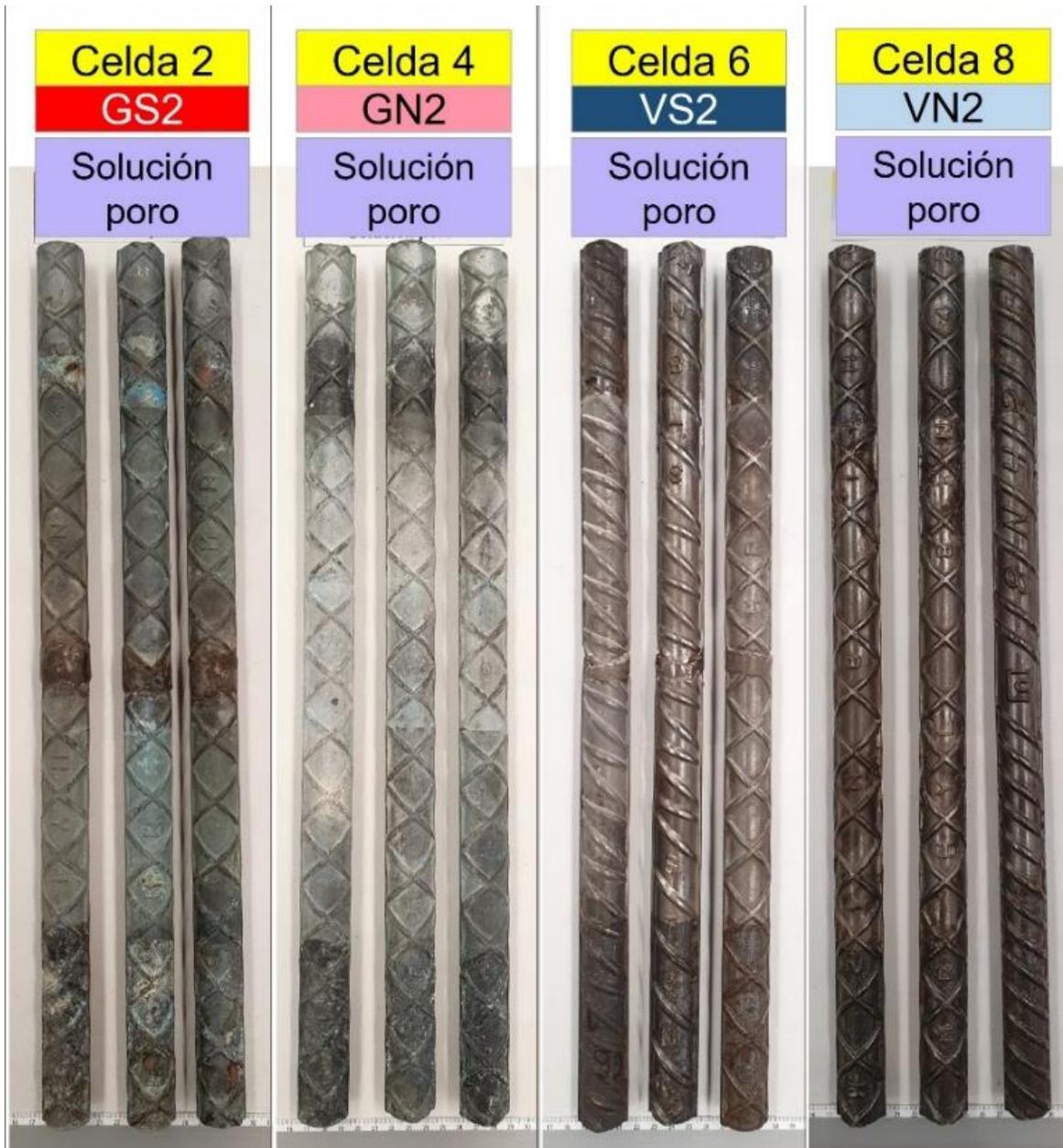


Figura 3.4 Varillas con limpieza final de las celdas sin cloruros

Para poder cuantificar el grado de deterioro por corrosión, todas las varillas fueron pesadas antes y después de los ensayos de corrosión acelerada. En la Tabla 3.1 están registradas la masa inicial y la pérdida de masa. Como se puede ver en la tabla, todas las varillas en solución poro + 3.5% de cloruros presentaron las mayores pérdidas de masa con respecto a las varillas inmersas en solución poro.

Tabla 3.1 Registros de masa y cálculo de porcentaje de pérdida de peso

Electrolito	Celdas	Varillas	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Masa perdida (g)	Porcentaje de perdida en la zona expuesta (%)
Solución Poro + 3.5% NaCl	1	GS1-1	2023.30	1777.40	245.90	20.20
		GS1-2	2002.03	1754.51	247.52	20.33
		GS1-3	1966.74	1744.88	221.87	18.23
Solución Poro	2	GS2-1	2018.95	2015.63	3.32	0.27
		GS2-2	2003.89	2000.05	3.84	0.32
		GS2-3	2012.62	2009.24	3.38	0.28
Solución Poro + 3.5% NaCl	3	GN1-1	2032.28	1939.28	93.00	7.64
		GN1-2	2025.56	1908.09	117.47	9.65
		GN1-3	2030.67	1920.12	110.55	9.08
Solución Poro	4	GN2-1	2035.31	2034.26	1.05	0.09
		GN2-2	2030.10	2029.25	0.85	0.07
		GN2-3	2019.57	2018.36	1.22	0.10
Solución Poro + 3.5% NaCl	5	VS1-1	1930.30	1667.50	262.80	21.59
		VS1-2	1942.35	1731.50	210.85	17.32
		VS1-3	1931.08	1696.54	234.54	19.27
Solución Poro	6	VS2-1	1929.21	1928.97	0.24	0.02
		VS2-2	1901.76	1901.24	0.52	0.04
		VS2-3	1972.56	1972.19	0.37	0.03
Solución Poro + 3.5% NaCl	7	VN1-1	1982.74	1723.27	259.47	21.31
		VN1-2	1978.65	1763.76	214.89	17.65
		VN1-3	1916.44	1662.53	253.90	20.86
Solución Poro	8	VN2-1	1973.72	1973.22	0.50	0.04
		VN2-2	1948.74	1948.19	0.55	0.05
		VN2-3	1911.53	1910.96	0.57	0.05

En la Tabla 3.2, se presenta en porcentaje, el resumen del promedio de la pérdida de masa por celda. Al comparar los resultados experimentales con el cálculo teórico de pérdida del 20%, se observa que ambos son muy similares cuando se utiliza la solución poro contaminada con cloruros. Sin embargo, en la solución poro sin cloruros, las varillas presentan una mínima pérdida de masa. También se observa que la soldadura disminuye la protección del galvanizado, probablemente, el efecto del calor durante el proceso de soldadura hace que se pierda parte del recubrimiento. Además, las varillas galvanizadas y sin soldar, inmersas en solución poro + 3.5% NaCl, pierden menos peso que las varillas sin galvanizar, lo que indica que el zinc del recubrimiento de galvanizado se corroe menos que el acero.

Tabla 3.2 Promedios de pérdida de masa por celda

Medio	Proceso	Recubrimiento	Porcentaje de pérdida promedio (%)
Solución Poro + 3.5% de NaCl	Soldadas	Galvanizadas	19.59
		Sin galvanizar	19.39
	Sin soldar	Galvanizadas	8.79
		Sin galvanizar (testigo o blanco)	19.94
Solución Poro	Soldadas	Galvanizadas	0.29
		Sin galvanizar	0.04
	Sin soldar	Galvanizadas	0.09
		Sin galvanizar (testigo o blanco)	0.03

Conclusiones

Se demostró que el sistema desarrollado puede acelerar la corrosión hasta un valor aproximado de pérdida de masa deseada en las celdas que contienen la solución poro + 3.5% de NaCl.

El galvanizado da una protección adicional a la corrosión, ya que mostraron menor pérdida de masa las varillas galvanizadas y sin soldar, las cuales estaban inmersas en solución poro + 3.5% NaCl.

No se presentó un efecto significativo en las pérdidas de masa por la corriente impresa aplicada en las celdas que contienen únicamente solución poro.

La limitación de este sistema depende de la capacidad de la fuente de poder ya que podemos aumentar el número de probetas teniendo como límite el voltaje que puede suministrar para la demanda de la densidad de corriente.

Con estos resultados se podría, en un futuro, evaluar las propiedades mecánicas relacionando el porcentaje de pérdida de peso y reducción de área con la resistencia última, límite de fluencia, porcentaje de elongación y la razón de resistencia última con respecto al límite de fluencia, así como determinar las variaciones en el diámetro debido a las pérdidas de masa.

La corriente se mantuvo estable, solo tenían pequeñas variaciones que se ajustaban manualmente. Como siguiente paso para este proyecto, se podría mejorar el sistema mediante el desarrollo de un controlador electrónico, el cual permitiría controlar de forma automática la demanda de voltaje para mantener constante la corriente aplicada.

Por último, se requiere un recubrimiento más eficiente debido a los daños evidentes en la resina que se utilizó para delimitar el área expuesta.

Bibliografía

- American Concrete Institute (2014), ACI 3.-1.. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete*. Michigan: American Concrete Institute.
- Ahmad, S. (2009). Techniques for Inducing Accelerated Corrosion of Steel in Concrete. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 95-104.
- Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. USA: Butterworth-Heinemann.
- Association, P. C. (2002). *Types and Causes of Concrete Deterioration*. Skokie, Ill: Portland Cement Association.
- Avila, J., & Genesca, J. (1989). *Más allá de la herrumbre II*. México: La ciencia desde México.
- Americal Welding Sociaty., D. AWS (2011). *Structural Welding Code- Reinforcing Steel*. Miami, Florida,USA: Americal Welding Sociaty.
- Barrero Pérez, J. G. (2004). Diseño y construcción de un prototipo de potencióstato galvanostato para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica. *Revista de la facultad de ingenierias fisicomecánicas*, 29-40.
- Bentur, A., D. S. (2007). *Steel Corrosion in Concrete*. Taylor & Francis.
- Bernhard, E., Polder, R., Redaelli, E., Bertolini, L., & Pedferri, P. (2004). *Corrosion of Steel in Concrete*. WILEY-VCH.
- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, N.-B.-5. (2019) CACERO. *Varillas Corrugadas de Acero para Refuerzo de Concreto-Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero.
- Chin, W. Joannie, N. T. (1999). Sorption and Diffusion of Water, Salt Water, and Concrete Pore Solution in Composite Matrices. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol 71., 483-492.
- G31-72, A. (2004). *Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*, ASTM International. Retrieved Enero 20, 2021, from West Conshohocken, PA,: www.astm.org

- Ghods, P., I. O. (2009). The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black Steel reinforcement. *Cement & Concrete. Composite* 31 , 2-11.
- Goñi, S., A. C. (1990). Syntetic Concrete Pore Sokution Chemistry and Rebar Corrosion Rate in the Presence of Chroridaes. *Cement and Concrete Research Vol. 20.* , 525-539.
- Lea, F. M., & Hewlett, P. C. (1971). The chemistry of cement and concrete. 3a. Edición, New York: Chemical Publishing Company.
- Li, L. &. (1999). Effect of chloride concentration on the pitting and repassivation potentials of reinforcing steel in alkaline solutions. *NACE. Corrosion* 99.
- Marder, A. (2000). The metallurgy of zinc-coated steel . *Progress in Materials Science* 45, 191-271.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. (1986). *Concrete. Structure, properties and materials*. Prentice Hall.
- Mendala, J. (2012). Liquid metal embrittlement of steel with galvanized coatings. *Materials Science and Engineering* 35.
- Moreno, M., M. W. (2004). Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: Effect of carbonation and chloride content. *Corrosion Science* 46 , 2681-2699.
- Okafor, C. I. (2013). Effect of zinc galvanization on microstructure and fracture behavior of low and medium carbon structural steel. *Engineering*, 656-666.
- Pistofidis, N. (2006). On mechanism of formation of zinc pack coating. *Journal of alloy and compounds* 407, 221-225.
- Red DURAR. (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela: Ciencie y Tecnologia para el Desarrollo (CYTED).
- Vourlias, G. (2006). Comparative study of the structure and the corrosion behavior of zinc coating deposited with various methods. *Surface & Coating Technology* 200 , 6594-6600.
- Yeomans, R. S. (2004). Galvanized Steel Reinforcement in Concrete. *Elsevier*.
- Zhang, Y, P. A. (2015). Passivation and Corrosion Behavior of Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solution under Tensile and Compressive Stresses. American Society of Civil Engineers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1-8.

Anexos

1. Cálculo de área expuesta, corriente requerida y pérdida de masa para varillas de $\phi = 1''$.

Fórmulas. -

$$\text{Perímetro (P)} = \pi \phi$$

$$I = V / R$$

$$V = I * R$$

$$R = V / I$$

$$m = \delta v$$

$$v = \pi r^2 h$$

$$t = (w.n.f)/(I.M)$$

Cálculo de área expuesta.-

$$A = P * L$$

$$A = \pi * (2.54 \text{ cm}) * (30 \text{ cm})$$

$$A = 239.39 \text{ cm}^2 \approx 0.023939 \text{ m}^2$$

Cálculo de corriente 3 varillas

$$j_{TOTAL} = (3 \text{ varillas}) * (83786.27 \text{ mA})$$

$$j_{TOTAL} = 0.251 \text{ A}$$

Cálculo de masa inicial (teórico)= Masa expuesta

$$m_i = 7.874 \text{ g/cm}^3 * \pi * (1.27 \text{ cm})^2 * (30 \text{ cm})$$

$$m_i = 1196.94 \text{ g} \approx 1.197 \text{ kg}$$

Cálculo de pérdida de masa (teórico)

$$m_f = m_i * 0.20$$

$$m_f = 239.39 \text{ g}$$

Tiempo estimado de pérdida de masa (20%)

$$t = [(239.39 \text{ g}) * (2) * (96500 \text{ As/mol})] / [(0.083786 \text{ A}) * (55.45 \text{ g/mol})]$$

$$t = 9873365.59 \text{ s} \approx 114 \text{ días.}$$

Datos.-

$$\text{Diámetro } (\phi) = 2.54 \text{ cm}$$

$$L = 30 \text{ cm}$$

$$\text{Densidad} = 350 \mu\text{A/cm}^2$$

$$\rho_a = 7,850 \text{ kg/m}^3 \approx 7.85 \text{ g/cm}^3$$

$$n = 2$$

$$F = 96500 \text{ A.s/cm}^2$$

$$M = 55.45 \text{ gr/mol}$$

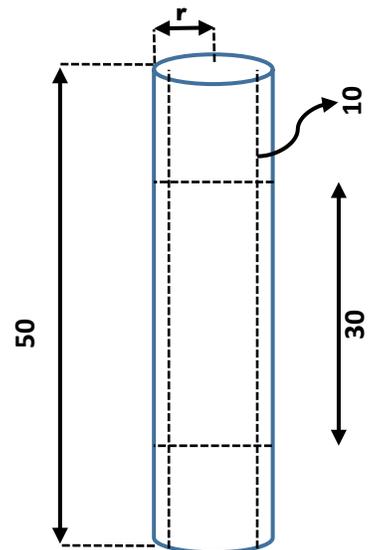
Cálculo de corriente.-

$$1 \text{ varilla } \phi = 1''$$

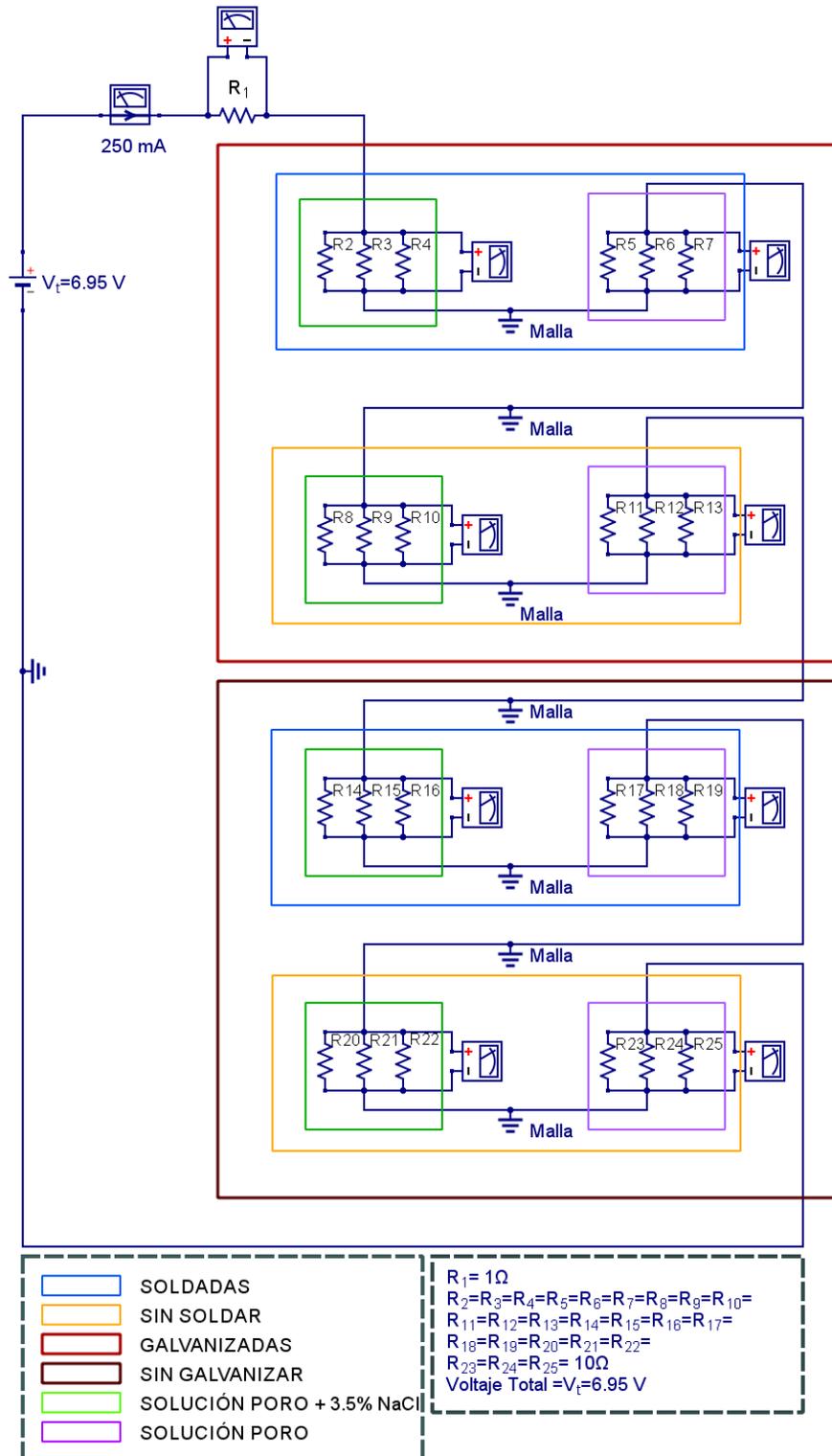
$$\text{Densidad} = 350 \mu\text{A/cm}^2$$

$$A = 239.39 \text{ cm}^2$$

$$\text{Intensidad} = (350 \mu\text{A/cm}^2) * (239.38 \text{ cm}^2) \\ = 83786.27 \mu\text{A}$$



2. Cálculo de voltaje y corriente con ley de ohm para circuito eléctrico de varillas de 1''





COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>