

# Análisis del avance de la corrosión en redes de tierra de protección eléctrica



## Advance of corrosion analysis in electric protection grounding networks



Juan-Manuel Sánchez-Rodríguez, Javier Cárcel-Carrasco y Manuel Pascual-Guillamón

Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n - 46022 Valencia (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/10052> | Recibido: 05/11/2020 • Inicio Evaluación: 05/11/2020 • Aceptado: 20/01/2021

To cite this article: SANCHEZ-RODRIGUEZ, Juan-Manuel; CARCEL-CARRASCO, Javier; PASCUAL-GUILLAMON, Manuel. ADVANCE OF CORROSION ANALYSIS IN ELECTRIC PROTECTION GROUNDING NETWORKS. DYNA. September 2021, vol. 96, no. 5, p. 534-539. DOI: <https://doi.org/10.6036/10052>

### ABSTRACT

- This study presents research on the components of grounding systems, against corrosion, in the field of construction, focusing this research on the copper joints. This protection or grounding system consists of a direct electrical connection, without the use of protections, from part of the electrical circuit to a grounding with one or more electrodes buried in the ground. Thus, this study was conducted analyzing how the level of condition varied according to the aggressive environments to which they were subjected, the type of jointing of the electrodes and their component materials. For the realization of this objective, different laboratory tests were completed to know in a practical way the internal level of corrosion of the samples. The evolution of electrical resistance in each witness was studied and a metallographic analysis was performed to directly observe through the microscope the effect of corrosion on the copper joints. It has been possible to analyze the corrosion behavior of flange joints in grounding systems taking into account their component materials of each type of component material taking into account different environments where they may be installed.
- **Key Words:** corrosion, protection network, electrical resistance, grounding.

resistencia eléctrica en cada testigo y se realizó un análisis metallográfico para observar directamente a través del microscopio el efecto de la corrosión sobre las uniones embreadas.

Se ha podido analizar el comportamiento frente a corrosión de las uniones con bridas en sistemas de puesta a tierra teniendo en cuenta sus materiales componentes de cada tipo de material componente teniendo en cuenta diferentes ambientes donde puedan estar instalados.

**Palabras Clave:** corrosión, red de protección, resistencia eléctrica, sistemas de puesta a tierra.

### 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de cualquier edificación es necesaria una apropiada conexión a tierra de los circuitos eléctricos para la seguridad del edificio y sus integrantes [1,2]. Los sistemas de puesta a tierra y los conductores de protección trabajan conjuntamente con los interruptores diferenciales, mejorando su eficacia [3]. En un circuito eléctrico común, la cantidad de corriente que entra por la/s fase/s hasta cualquier aparato eléctrico es la misma que retorna por el neutro [4]. En caso de haber una diferencia en el retorno, el interruptor diferencial actúa interrumpiendo el suministro de corriente [3,5].

Al generarse una fuga de corriente, por defecto de funcionamiento o aislamiento, la corriente circulará por el conductor de protección hasta la puesta a tierra produciendo que el diferencial se active [3,5].

De esta manera, las corrientes de defecto se desvían y hacen activarse las protecciones, evitando contactos indirectos con eficacia. Además, se reconducen al terreno las corrientes de electricidad estática que se puedan generar en las carcasas de algunos aparatos, evitando descargas eléctricas en los ocupantes [6]. También, esta protección sirve para poder descargar las sobretensiones producidas por fenómenos atmosféricos [7-8].

Pese a que esta red está planteada para garantizar la seguridad de los usuarios y receptores eléctricos del edificio, existen numerosos factores que pueden suponer un riesgo muy importante para la integridad del circuito eléctrico [6]. Algunos de los componentes de la red están en contacto con elementos y materiales ajenos a la construcción, ya que deben transmitir las descargas al terreno, alejándolas del edificio [9]. Estos elementos en particular son las puestas a tierra, que se encuentran en contacto directo con el

### RESUMEN

El presente estudio presenta una investigación sobre los componentes de los sistemas de puesta a tierra, frente a la corrosión, en el ámbito de la construcción, centrandose esta investigación en las uniones embreadas. Este sistema de protección o puesta a tierra consiste en una conexión eléctrica directa, sin el uso de protecciones, de parte del circuito eléctrico a una toma de tierra con uno o varios electrodos enterrados en el terreno.

Así pues, este estudio se llevó a cabo analizando cómo variaba el nivel de afectación según los ambientes agresivos a los que eran sometidos, las tipologías de unión de los electrodos y sus materiales componentes.

Para la realización de este objetivo se completaron diferentes ensayos de laboratorio para conocer de manera práctica el nivel interno de corrosión de las muestras. Se estudió la evolución de la

terreno sobre el que se asienta la edificación, y dado que la composición de esta superficie puede tener numerosas formas, es muy importante saber cómo reaccionan los distintos materiales que componen una conexión a tierra frente a los distintos agentes físicos y químicos para poder dotarlos de las condiciones necesarias frente a estos agentes que puedan influir en su corrosión [10,11].

El objetivo de esta investigación consiste en la evaluación del efecto de la corrosión sobre las uniones embridadas en sistemas de puesta a tierra sometidas a distintos ambientes con mayor y menor agresividad. Se dirigió la atención específicamente a las uniones de los diferentes elementos metálicos que componen las puestas a tierra tanto enterradas como integradas en la cimentación de hormigón de una edificación, para poder estudiar los condicionantes para su corrosión [12] frente a los elementos más comunes a los que se pueden encontrar en el entorno de un edificio, tales como ambientes compuestos por sulfatos, o ambientes compuestos por cloruros. Para ello se hicieron diversas simulaciones y estudios, con el fin de determinar la mejor solución a las patologías que pueda presentar en las uniones de una red de tierra de protección [13], frente a la corrosión [14,15], y comprobar el funcionamiento de los circuitos de redes de tierra de protección una vez corroídos, verificando su resistencia eléctrica [16].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología principal ha consistido en una simulación de las reacciones electroquímicas a las que se ven sometidas las puestas a tierra de una edificación, pudiendo estar éstas tanto enterradas como integradas en la cimentación de hormigón de una edificación. El estudio se ha centrado en las puestas a tierra embridadas integradas en la cimentación, que se encuentran embebidas en el hormigón estructural.

El hormigón es un material poroso [17-19], y las muestras realizadas se ha realizado con un buen compactado, según estudios realizados se ha observado una porosidad estimada del orden del 12 % de su volumen.

El cemento utilizado para la confección del hormigón es un CEM II/B-L 32,5N. Lo que hace referencia a un cemento pórtland con caliza, tipo B (con un contenido en caliza entre el 21 y 35%), una clase resistente 32,5 y una resistencia inicial normal. El aditivo utilizado es un plastificante Viscocrete 3425 de Sika®. Se trata de un policarboxilato modificado en base acuosa cuya utilización permite mejorar la fluidez, colocación y compactación del hormigón elaborado. El empleo de este aditivo ayuda a reducir el agua de amasado dando hormigones de alta densidad, alta resistencia y gran impermeabilidad. La dosificación del hormigón elaborado en las probetas corresponde a las siguientes características: CEM 350 Kg/m<sup>3</sup>; Agua 193 Kg/m<sup>3</sup>; Aditivo-0,007 2,5 Kg/m<sup>3</sup>; Arena 1074 Kg/m<sup>3</sup>.

### 2.1. PREPARACIÓN DEL ENSAYO

Fueron elaboradas probetas de hormigón, simulando la conexión de las puestas a tierra con la estructura de la edificación. La metodología utilizada pretende simular las reacciones electroquímicas a las que pueden ser sometidas las tomas de tierra en edificación, ya sean enterradas o embebidas en hormigón dentro de la cimentación de una edificación. El estudio de estas reacciones en un ambiente controlado como el de un laboratorio permite el análisis de los resultados con un enfoque práctico y fiable desde el cuál se puede avanzar en el conocimiento de las puestas a tierra y sus lesiones por corrosión. La influencia de la tipología de toma de tierra elegida, material o método de ensamblaje, podrá

ser también sometida a estudio mediante la comparación directa de los resultados entre cada una. Por último, la comparación entre diferentes ambientes agresivos nos proporcionará información útil del comportamiento de las tomas de tierra bajo el ataque de diferentes agentes presentes comúnmente en el terreno. Este experimento ha sido diseñado por los autores basándose en experiencias previas realizadas en el laboratorio de materiales.

La realización de dichas probetas incluyó, por una parte, el ensamblaje y la preparación de los diferentes elementos que simulaban la conexión de las puestas a tierra, y por otra parte la dosificación y elaboración del hormigón con su posterior curado y aplicación de tratamientos de protección.

Durante 4 meses se realizaron mediciones electroquímicas para determinar el avance de la corrosión tras cada ciclo realizado, consiguiendo así un registro de la afección para cada probeta y cada ambiente.

Mediante la utilización de ensayos de estudio electroquímico se registró la evolución interna de las puestas a tierra semana a semana. Se pudo observar cómo la corrosión avanzaba de manera diferente según el material y el ambiente al que estaba expuesto. Además, gracias al uso de micrografías, también se pudo observar la afección estructural de las probetas.

#### 2.1.1 Elaboración de testigos/probetas

Las probetas que se desarrollaron para el estudio comprendían diferentes tipologías según su material y su método de ensamblaje. La selección de los materiales se realizó con el objetivo de aproximarse algunos de los más comúnmente utilizados en la elaboración de las puestas a tierra: las barras de acero y los cables de cobre.

De esta forma, se generaron 2 tipologías de puestas a tierra mediante la combinación de cada uno de estos dos materiales con cable de cobre.

Por otra parte, los métodos de ensamblaje utilizados en este estudio fueron las soldaduras.

- Uniones mediante soldaduras.
- Uniones mediante bridas.

En este artículo se ha realizado sólo el estudio de las uniones con bridas estándar (figura 1B), formadas por varillas curvadas de acero al carbono y placas de apriete de latón, dejando para una futura segunda fase de la investigación las uniones soldadas.

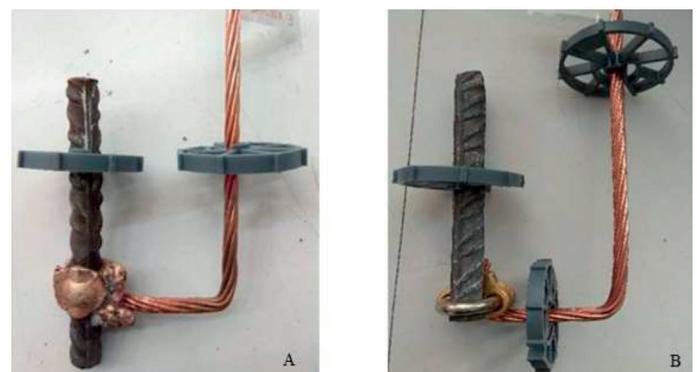


Fig. 1: Unión soldada de cable de cobre con barra corrugada de acero (A) y unión con brida de cable de cobre con barra corrugada de acero (B), analizada en este estudio

Una vez se realizaron las uniones de ambos materiales, se procedió al hormigonado de todas las probetas, puesto que se debía simular la función de puesta a tierra que tendría lugar embebida en la estructura de hormigón de los edificios.

### 2.1.2 Simulación de ambientes

En este estudio se ha buscado generar diferentes ambientes, dotando así de una mayor profundidad y precisión a la toma de datos.

De este modo, se simularon tres ambientes diferentes, planteados en estado líquido:

- Ambiente con cloruros: Se trata del ambiente que será más agresivo para las probetas y donde se espera observar una mayor afección por corrosión. Para su elaboración se utiliza una solución de NaCl con una concentración de 30g/litro.
- Ambiente con sulfatos: El uso de sulfatos generará un ambiente agresivo, pero de una afección para las probetas mucho menor al anteriormente descrito. Se elabora una solución de MgSO<sub>4</sub> con una concentración de 50g/litro.
- Ambiente no agresivo: Las probetas introducidas en este ambiente servirán como referencia para la comparación con los otros dos ambientes mencionados.

El listado de probetas a generar para la realización de los ensayos se puede observar según tipología de ambiente y unión en la Tabla 1. Para este estudio hemos utilizado las probetas realizadas mediante sistema embridado.

	PROBETAS EMBRIDADAS	PROBETAS SOLDADAS	PROBETAS EMBRIDADAS ADICIONALES
<b>AMBIENTE NO AGRESIVO</b>	BPCNA 1 BPCNA 2 BHCNA 3 BHCNA 4 BCCNA 5 BCCNA 6 BHCNAD	SPCNA 1 SPCNA 2 SHCNA 3 SHCNA 4 SCCNA 5 SCCNA 6	BCCNA5 BCCNA6
<b>AMBIENTE CON CLORUROS</b>	BPCM 1 BPCM 2 BHCM 3 BHCM 4 BCCM 5 BCCM 6 BHCMD	SPCM 1 SPCM 2 SHCM 3 SHCM 4 SCCM 5 SCCM 6	BCCM5 BCCM6 NBHCM1 NBHCM2
<b>AMBIENTE CON SULFATOS</b>	BPCS 1 BPCS 2 BHCS 3 BHCS 4 BCCS 5 BCCS 6 BHCSD	SPCS 1 SPCS 2 SHCS 3 SHCS 4 SCCS 5 SCCS 6	BCCS5 BCCS6

Designación lista de probetas:

MÉTODO DE UNIÓN + MATERIALES IMPLICADOS + AMBIENTE EXPUESTO + Nº TESTIGO

(S: Soldadura / B: Breda) + (CC: Cable Cu + Cable Cu / HC: Hierro + Cable Cu / PC: Pica + Cable Cu) + (M: Cloruros / S: Sulfatos / NA: No agresivo) + (Nº de testigo dentro de la misma probeta de hormigón)

Tabla 1: Lista de probetas a generar para la realización de ensayos y designación de probetas

Se plantea una designación de cada probeta haciendo referencia a su tipología tanto en material, en método de unión, así como al tipo de ambiente al que va a ser sometida.

## 2.2. TOMA DE DATOS

### 2.2.1. Elementos a utilizar

El uso de una estación de trabajo "AUTOLAB potenciostato/galvanostato", en conjunción con el software "NOVA" ha permitido realizar las mediciones electroquímicas y a su vez realizar un análisis de los datos obtenidos. Para medir la diferencia de potencial en las probetas se ha utilizado como electrodo de referencia

un electrodo de calomelanos. Sus características permiten conocer su potencial referido al estándar de hidrógeno, el cual está establecido en 0,244V. Para evitar interferencias electromagnéticas en las mediciones, todas se realizan con el conjunto de probeta, electrodo de referencia y sensores en el interior de una caja de Faraday.

### 2.2.2. Preparación de las probetas

La preparación de la probeta para la realización del ensayo consistiría en los siguientes pasos:

- Humectación adicional de las probetas. Las probetas se encontrarían saturadas antes de comenzar el ensayo. Para aportar una mayor conductividad se haría uso de una bayeta común saturada de agua, colocándola sobre la superficie de las probetas.
- Colocación de malla de acero inoxidable. Sobre la bayeta anterior se dispondría una malla de acero que actuaría como contra-electrodo del sistema. Fig. (2)
- Realización de conexiones. Se conectaron las probetas al potenciostato y galvanostato.
- Continuidad electrodo de referencia. Para maximizar la conductividad eléctrica entre la probeta y el electrodo de calomelanos se interpondría entre ambos un fragmento de bayeta y una esponja saturada de agua. Fig.(2).

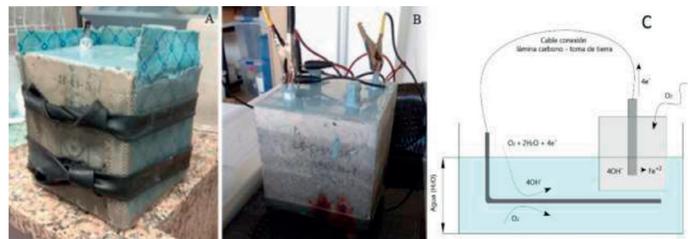


Fig. 2: Preparación de las probetas (A), conexión del cableado eléctrico (B) y circuito para ensayo de aceleración (C)

## 2.3. DESARROLLO DEL ENSAYO

### 2.3.1. Cálculo del potencial e intensidad de corrosión

La primera fase del ensayo consistiría en determinar el potencial de corrosión OCP (Open Circuit Potential) de la probeta. El cálculo de este parámetro depende directamente del estado interno de la probeta, ya que a mayor corrosión interna más se complica el cálculo. El valor que resulta es el promedio de 50 mediciones y mientras más negativo el valor, en peor estado se encuentra el acero.

La siguiente fase consistiría en medir la Intensidad de corrosión, la cual se realizó mediante el equipo previamente mencionado. Estas mediciones darían como resultado unas gráficas que mostraban la intensidad de corrosión en función del avance de la corrosión. Una de las complejidades de este procedimiento residió en la introducción de los valores de superficie de cada uno de los elementos de las probetas que, en el caso del cable de cobre, se calculó multiplicando la superficie individual de cada filamento, por el número total de filamentos que componían el cable, y en el caso de la barra de acero, se calculó teniendo en cuenta solo la superficie de la barra, ignorando las corrugas.

### 2.3.2. Cálculo de la resistividad

La resistividad se define como la oposición de un material al flujo de corriente eléctrica. Con una resistividad reducida el paso de la electricidad se realiza más fácilmente. Su unidad de medida es ohmios por superficie ( $\Omega$  cm).

La resistividad es un valor decisivo para el correcto funcionamiento de las redes eléctricas de protección, pues cuanto mayor sea este valor, menos eficiente será la conducción de la carga eléctrica y por lo tanto menos segura la red de protección.

A su vez, una alta resistencia implicaría un mayor calentamiento de los elementos conductores al verse sometidos a corrientes eléctricas, lo que comprometería la seguridad de todo el sistema eléctrico.

Para estudiar hasta que nivel podía afectar la corrosión a la resistividad eléctrica de las puestas a tierra se realizaron dos mediciones diferentes de este parámetro en cada una de las probetas. Una de las mediciones se realizó antes de comenzar los ensayos y otra más al finalizarlos.

### 2.3.3. Estudio metalográfico mediante análisis micrográficos

Se realizó un estudio metalográfico a través de análisis micrográficos para tener otro punto de vista que mostrase el desarrollo de la corrosión de las probetas. Con este sistema, fue posible apreciar el deterioro del material debido a la corrosión.

Estas micrografías son un proceso bastante delicado, por lo que fue necesaria una preparación extensa de las piezas antes de hacerlas. En un inicio, las piezas se cortaron para poder estudiarlas al microscopio. Después de cortar las piezas, las superficies cortadas se pulieron, para que no hubiese imperfecciones en las superficies a estudiar. Al final, cuando todas las piezas estuvieron correctamente pulidas, fue necesario realizar un ataque químico a las superficies de trabajo que resaltase la microestructura, para un mejor análisis bajo el microscopio.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez finalizados todos los ensayos, habiendo recopilado todos los datos del estudio, se dieron los siguientes resultados en cuanto a: corrosión en función del ambiente y del tipo de unión; variación de la resistencia eléctrica de los testigos tras los ensayos; y evolución de la corrosión a vista micrográfica.

### 3.1. EVOLUCIÓN DE LA CORROSIÓN

En este caso se estudiaron los resultados de potencial de corrosión y de intensidad de corrosión en las probetas más representativas de la tipología unida mediante bridas, en todos los ambientes, comparándolos.

#### 3.1.1. Potencial de corrosión

En este caso se observa en Gráfico 1 una comparativa de los resultados del potencial de corrosión obtenido en los tres ambientes ensayados:

Las probetas que se sometieron a este ensayo fueron las embridadas, nombradas BHCNA 3 a las sometidas a ambientes no

agresivos, BHCS 3 a las sometidas a ambientes con sulfatos y BHCM3 a las sometidas a ambientes con cloruros.

En las primeras dos mediciones todas las probetas se comportaron de la misma forma. Más tarde se puede apreciar cómo los agentes a los que estuvieron expuestos comenzaron a hacer efecto y cómo cada una empezó a comportarse de forma diferente, concluyendo resultados esperados. Este comportamiento se deduce como consecuencia del transitorio desde que se realiza la conexión embridada hasta que comienza el flujo de iones entre ánodo (hierro) y cátodo (cobre), que es un material más noble y con mayor potencial de reducción, en un medio cuyo electrolito varía desde muy activo (como el ambiente húmedo cloruro muy aniónico), seguido del electrolito en ambiente de sulfuro (menos agresivo) y del ambiente no agresivo.

La probeta BHCNA3 empieza a tomar su pendiente en descenso como consecuencia de la inactividad del electrolito, en el que la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo en el transcurso del tiempo no llega a alcanzar los  $-0,2V$ , que dará lugar a una corrosión muy ralentizada en el tiempo.

En el caso de BHCS3, la probeta mantuvo inicialmente unos valores de mayor diferencia de potencial en valor absoluto, que posteriormente va aumentando en el transcurso del tiempo, debido al carácter aniónico del electrolito sulfato, cuyos valores de diferencia de potencial entre ánodo (Fe) y cátodo (Cu) oscilantes entre  $-0,30V$  y  $-0,40V$ , generarán una corrosión más acelerada que en la muestra anterior, produciendo la corrosión del ánodo (Fe), pues es habitual que los sulfatos sean más perjudiciales para el hormigón que para el acero.

Por último, la probeta BHCM3 es la que presentó los valores más elevados, debido al electrolito existente, pues es mucho más aniónico que los dos anteriores, como consecuencia de los mayores porcentajes de iones Cloro, lo que genera diferencias de potencial entre ánodo y cátodo, según las mediciones obtenidas, que oscilan entre  $-0,3V$  y  $-0,6V$ . Estas diferencias de potencial tan significativas producirán una corrosión mucho más acelerada del ánodo (Fe).

#### 3.1.2. Intensidad de corrosión

En este caso se observa en el Gráfico 2 una comparativa de los resultados de la intensidad de corrosión obtenidas en los tres ambientes ensayados:

Las probetas que se sometieron a este ensayo fueron de nuevo las embridadas, nombradas BHCNA 3 a las sometidas a ambientes no agresivos, BHCS 3 a las sometidas a ambientes con sulfatos y BHCM3 a las sometidas a ambientes con cloruros.

Al igual que en el caso de los OCP, las tres probetas respondieron a la entrada en ambiente de forma agresiva en el periodo transitorio de la conexión con el electrolito de contacto (como se observa en el gráfico de intensidades, gráfico 2), correlacionado con

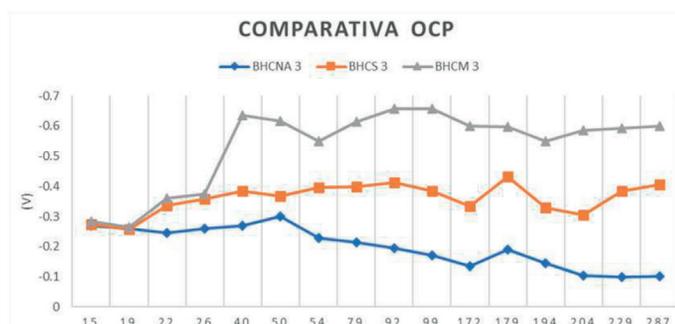


Fig. 3: Mediciones de potencial de corrosión en las probetas embridadas sometidas a los distintos ambientes

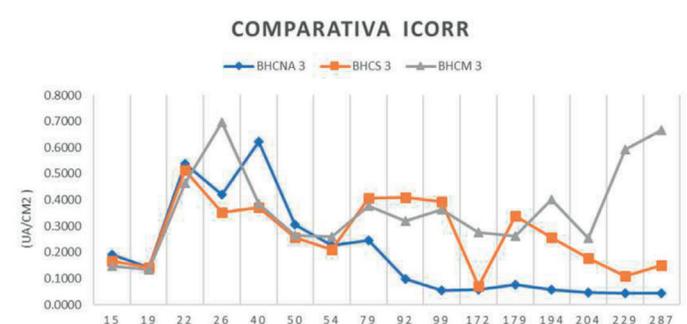


Fig. 4: Mediciones de intensidad de corrosión en las probetas embridadas sometidas a los distintos ambientes

lo expuesto anteriormente, al analizar la gráfica 1, ya comentada, de las diferencias de potencial generadas entre ánodo y cátodo del apartado 3.1.1. Sin embargo, la probeta que estuvo sometida a un ambiente no agresivo (electrolito débil) y no aniónico comenzó a disminuir la intensidad de corrosión con el tiempo (pasivación), como consecuencia de lo descrito en el apartado anterior, al establecerse entre ánodo y cátodo diferencias de potencial que van tendiendo en el transcurso del tiempo a valores inferiores a  $-0,2V$ , dando así lugar a intensidades de corrosión que llegan a pasivar la corrosión galvánica entre ánodo y cátodo. Mientras que, la probeta sometida a sulfatos mantuvo valores de intensidad de corrosión prácticamente constantes en todo el intervalo de tiempo y superiores a las de la muestra con electrolito neutro, como se puede observar en la gráfica de las muestras obtenidas. Además, puede comprobarse la correlación existente con las variaciones de potencial descritas en el apartado anterior, cuando el electrolito utilizado es el sulfato, con valores que oscilan uniformemente entre  $-0,3V$  y  $-0,4V$ . Sin embargo, la medición número once reflejó un descenso de esta intensidad, coincidente con el valor de la variación de diferencia de potencial de la gráfica de potenciales de la figura 2, en el mismo intervalo de tiempo.

En conclusión, así como en las variaciones de potencial, la probeta en ambiente con cloruros mantuvo una pendiente positiva de la intensidad de corrosión más elevada que las anteriores, como consecuencia del carácter más aniónico del electrolito, que produce mayor degradación en el ánodo (Fe) que en los casos anteriores.

### 3.2. RESISTENCIA ELÉCTRICA

Al inicio de los ensayos, tras el montaje y ensamblaje de las puestas a tierra se realizó una medición de la resistencia eléctrica en cada uno de los testigos, mediante un multímetro común. Tras la realización de los ensayos se volvió a realizar la misma medición utilizando el mismo equipo inicial. Los resultados obtenidos en todas las mediciones se pueden observar en la Tabla 2.

Las mediciones iniciales obtenidas varían entre  $0-0,3 \Omega$ , lo que arroja valores lógicos y esperados al tratarse de materiales libres de corrosión e imperfecciones. La conexión eléctrica entre los materiales es directa y no hay ningún elemento que dificulte o actúe como barrera para el paso de la electricidad.

Sin embargo, los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos muestran una pérdida de la resistencia muy escasa con respecto a la inicial.

Es interesante la interpretación de estos resultados, ya que, la corrosión sí ha aumentado, pero este valor no, lo que hace perceptible el hecho de que el interior de los materiales no se ha visto comprometido.

### 3.3. ANÁLISIS MICROGRÁFICOS

Este ensayo ayudó a estudiar los testigos de otra forma, ya que al poder ver los avances de la corrosión a simple vista, se pudieron comprender mejor los datos numéricos obtenidos en los ensayos anteriores.

De esta forma, en este caso, se realizó el análisis metalográfico de 3 probetas embridadas: BCCNA5 (ambiente no agresivo), BCCS5 (Ambiente con sulfatos) y BCCM5 (Ambiente con cloruros).

Los análisis microscópicos llevados a cabo se realizaron en el latón de las bridas, y en el acero de las barras, ya que son los materiales del sistema más vulnerables a la corrosión.

En la Figura 3 se muestran las micrografías a 400 aumentos del acero de los testigos en los distintos ambientes.

Comparando las micrografías de las probetas expuestas a ambientes con cloruros y con sulfatos, con las correspondientes del

	Medición Inicial	Medición Final
BHCNA 3	0	0.1
BHCNA 4	0	0.1
BHCM 3	0.2	0.3
BHCM 4	0	0.3
BHCS 3	0.1	0.2
BHCS 4	0.1	0.3
BCCNA 5	0	0
BCCNA 6	0	0
BCCM 5	0	0
BCCM 6	0	0
BCCS 5	0	0
BCCS 6	0	0

Tabla 2: Medición de la resistencia eléctrica inicial y final de los testigos en  $\Omega$ . Fuente propia

testigo en un ambiente no agresivo se puede observar la evidente diferencia de estado entre los testigos.

La muestra del testigo sometido a sulfatos, reflejada en la figura 3 (B), muestra la presencia del elemento color turquesa que identifica la corrosión. El nivel de afección es mucho menor al generado por el ambiente con cloruros. En cambio, el testigo sometido a un ambiente de cloruros, reflejado en la figura 3 (C), es el que presenta una mayor afección. Incluso en el menor nivel de aumento podrían observarse elementos ajenos a la estructura común del acero. Estos elementos corresponden con la presencia de corrosión y se perciben como un moteado disperso de color turquesa. En el aumento de 400 se percibe de una manera aún más patente la presencia de este elemento.

Por otra parte, en la figura 4 se muestran las micrografías del latón de las bridas presentes en los testigos en los distintos ambientes.

Comparando las micrografías de las probetas expuestas a ambientes con cloruros y con sulfatos, con las correspondientes del testigo en un ambiente no agresivo se puede observar la evidente diferencia de estado entre los testigos.

En los testigos embridados, se observó que las mediciones de OCP arrojan valores que varían entre  $-0.25 V$  y  $-0.65V$ . Los valores registrados comienzan a indicar una fuerte presencia de corrosión generalizada en todos los testigos. La muestra más afectada es la compuesta por barra de acero + cable Cu alcanzando valores estables de  $-0.65V$  (corrosión alta). Por el contrario, la muestra com-

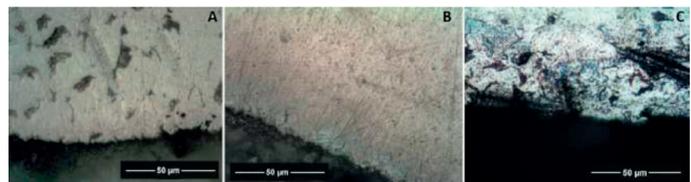


Fig. 5: Micrografías de elementos de acero de probetas sometidas a: ambientes no agresivos (A), ambientes con sulfatos (B) y ambientes con cloruros (C)

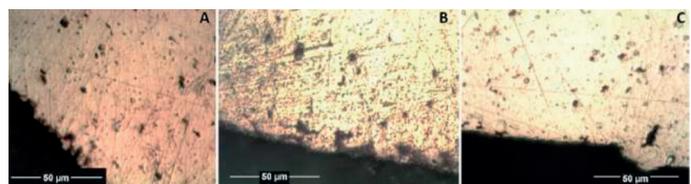


Fig. 6: Micrografías de elementos de latón de probetas sometidas a: ambientes no agresivos (A), ambientes con sulfatos (B) y ambientes con cloruros (C)

puesta por Pica de acero + cable Cu presenta un comportamiento diferente al del resto de testigos. Alcanza niveles de OCP similares al final, pero el avance es mucho más lento y prolongado en el tiempo. Los valores registrados varían entre 0.1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  (corrosión despreciable) y 0.85  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  (corrosión moderada). Al igual que en el caso del ambiente con sulfatos, la pica de acero + cable de Cu es el testigo que presenta los picos máximos y un valor medio mayor de  $I_{\text{corr}}$ .

La tipología de ensamblaje se muestra una vez más determinante a la hora de determinar el nivel de corrosión generado, al menos durante el tiempo que han durado estos ensayos. Los valores registrados varían entre 0.01  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  (corrosión despreciable) y 0.4  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  (corrosión baja).

La muestra del testigo sometido a sulfatos, reflejada en la figura 4 (B) muestra a simple vista una mayor afección por corrosión compleja como consecuencia de la reacción del sulfato con el metal de latón. Se puede observar un pronunciado picado disperso del material acompañado del característico moteado color turquesa ya comentado anteriormente. Este elemento ajeno al latón se encuentra disperso reiterativamente por toda la superficie del latón, no se trata de una simple aglomeración en zonas concretas. La percepción de la corrosión es visible incluso desde el menor nivel de aumento.

En cambio, en la muestra del testigo sometido a cloruros, reflejada en la figura 4 (C), es posible observar elementos ajenos y una ligera presencia de corrosión compleja como reacción del cloro en la zona de transición entre el latón y el hormigón. En la trama interior del latón no se observa afección a simple vista. Esto se justifica debido a que la capa de corrosión generada ha sido simplemente superficial, sin llegar a penetrar en el material, lo que corresponde con las etapas temprana del proceso de corrosión.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha realizado en este estudio un análisis del efecto de la corrosión producida en los elementos de unión mediante bridas en la puesta a tierra, en función de los ambientes a los que se sometan y los materiales que los compongan.

Los resultados obtenidos muestran experimentalmente que ambientes son más agresivos hacia las puestas a tierra. El ambiente con cloruros ha sido el más perjudicial. En líneas generales, se han obtenido las siguientes conclusiones respecto a cada uno de los ambientes:

- 1º - Se observa que la corrosión en ambientes no agresivos es cero. La introducción de las muestras en agua no ha producido ninguna alteración electroquímica en las muestras.
- 2º - Las muestras en ambiente con sulfatos han sufrido un pequeño ascenso en los valores de potencial de corrosión. Aún así, este efecto es limitado suponiendo una diferencia pequeña respecto a los testigos de referencia (no agresivo). Además, el ascenso en los valores solo se produce en los primeros días del ensayo dando lugar a un estancamiento en el que los efectos no avanzan a más.
- 3º - Las muestras introducidas en ambientes con cloruros experimentan la reacción más extrema respecto a la corrosión. Los niveles registrados de OCP presentan notables incrementos desde el primer momento y se mantienen durante el tiempo en el que duran los ensayos. Se duplican los efectos conseguidos con ambientes con sulfatos.

El ambiente donde está situada la conexión es bastante determinante sobre el nivel de corrosión, al menos en las etapas iniciales del proceso de corrosión.

Al revelarse como un factor determinante es importante seguir estudiando la repercusión que puede tener la corrosión y destrucción de las bridas de latón. Sería posible que el nivel de afección llegase a tal punto que la conexión dejase de ser mecánicamente estable y se produjera una desconexión entre el electrodo de puesta a tierra y el conductor de protección.

Cuando se evalúa la evolución de la resistividad eléctrica en los diferentes testigos se nota que esta no ha sufrido cambios a lo largo de los días del estudio, esto se debe a que en las uniones con bridas la corrosión no ha impedido el contacto entre los metales.

En cuanto al estudio de la evolución en la resistividad eléctrica de los testigos, no ha presentado relevancia alguna al no haberse producidos cambios destacados que comprometan la funcionalidad de las puestas a tierra.

Por último, las micrografías han permitido realizar un análisis visual del deterioro de los testigos por la corrosión.

En investigaciones futuras se pretende analizar el efecto de la corrosión en uniones soldadas sometidas a los mismos tipos de ambientes, así como una comparativa que muestre la diferencia entre uniones con bornes y uniones soldadas.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Tecnología de Materiales (ITM) de la Universitat Politècnica de València la colaboración en los ensayos realizados.

#### REFERENCIAS

- [1] Valdés, V., Trejos, Á., Vásquez, L. A., Valenzuela, V., & Trotman, E. 2019. Evaluación de la seguridad en las instalaciones eléctricas de las viviendas del distrito de Changuinola. *Revista de Iniciación Científica*, 5, 54-60. DOI: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.0.2370>
- [2] IEEE Std. 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, 2000. DOI: 10.1109/TIA.2013.2256092
- [3] Feijo Muñoz, J. 1991. Conductores de protección en las instalaciones eléctricas. *Revista de edificación*, 9, 35 - 37.
- [4] Mantilla Quijano, G. 1993 *El circuito eléctrico simple*. 1ª ed. Santa Fe de Bogotá: SENA. DOI: <https://hdl.handle.net/11404/5677>
- [5] Darío Contreras, F. *Interruptor estático para alimentación de equipos electrónicos sensibles*. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería Eléctrica - Electrónica. Bogotá. 2006
- [6] De la Cruz Gómez, J.M., Gallego Calvo, J., Trujillo del Campo, T. 2005. *Instalaciones de puesta a tierra y protección de sistemas eléctricos*. 1ª ed. Barcelona: Ediciones Experiencia. 84-96283-19-4.
- [7] González-Longatt, F. M. 2007. *Sistemas de Puesta a Tierra y Protección contra descargas atmosféricas*. II Seminario en seguridad y Riesgos Eléctricos en la industria. UNEXPO. Puerto Ordaz.
- [8] Liliana, P., Augusto, D. 2001. *Propuesta de protección externa e interna contra descargas atmosféricas*. Trabajo presentado en Taller Modelos Electromagnéticos para Diseño de Sistemas de Potencia, Valparaíso, Chile. DOI: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/44677>
- [9] Dufo, R. *Cálculo de los sistemas de puesta a tierra en edificios*. *Técnica Industrial Especial Electricidad y Electrónica*. Octubre de 2004, 74-78
- [10] Pardo, W. A. *Diseño de puestas a tierra y apantallamientos eléctricos para protección de equipos y personas de la Universidad de las fuerzas armadas - Espe extensión Latacunga*. Cotopaxi, Ecuador.
- [11] Zhang, Z., Mei, D., Dan, Y. et al. 2020. Novel method for diagnosing corrosion of grounding electrodes in soil. *Electric Power Systems Research*, 178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2019.106049>
- [12] Gummow, R.A. 2004. *Cathodic protection current requirements for electrical grounding materials*. NACE International, 04045.
- [13] Zhao, J., Durham, N. Abdel-Hadi, K. 2019. Acoustic guided wave techniques for detecting corrosion damage of electrical grounding rods. *Measurement*, 147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106858>
- [14] Lima, A.B. Caetano, C.E.F. Paulino, J.O.S. et al. 2019. An original setup to measure grounding resistances using fast impulse currents and very short leads. *Dev.*, 173, 6-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2019.04.002>
- [15] Zheng, R., He, J., Hu, J. et al. *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference*. 37th IAS Annual Meeting. Pittsburg, USA.
- [16] Kyun Kim, D., Ju Kim, B., Kwan Seo, J. et al. 2013. Time-dependent residual ultimate longitudinal strength - grounding damage index (R-D) diagram. *OceanEngineering*, 76, 163-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.06.023>
- [17] Valcuende, M., Parra, C., & Benlloch, J. V. 2005. Permeabilidad, porosidad y resistencia a compresión de hormigones autocompactables. *Materiales de construcción*, (280), 17-26.
- [18] del Carmen Galán-Marín, M., Briones, J. L., Santiago, M. O., & Nadal, P. (2004). Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad. *Materiales de construcción*, (273), 21-33.
- [19] Martialay, R. M. (1973). Permeabilidad al aire del hormigón. *Materiales de Construcción*, 23 (150-151), 291-300.