

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**Influencia de concentraciones de cloruro de sodio sobre la velocidad de  
corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en concreto**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**AUTOR**

**Leandro Muñoz Ortiz**

**ASESOR**

**Elmer Rolando Polo Briceño**

<https://orcid.org/0000-0002-5831-8818>

**Chiclayo, 2024**

**Influencia de concentraciones de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en concreto**

PRESENTADA POR  
**Leandro Muñoz Ortiz**

A la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo  
para optar el título de

**INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR

Cesar Eduardo Cachay Lazo  
PRESIDENTE

Justo David Pedraza Franco  
SECRETARIO

Elmer Rolando Polo Briceño  
VOCAL

## **Dedicatoria**

*Dedico esta tesis a:*

*Dios, que ha sido mi fortaleza en mis momentos más vulnerables y me ha permitido seguir adelante en los momentos complicados.*

*Mi padre, que en paz descanse, por mostrarme el camino y ser mi ejemplo para seguir como persona y profesional.*

*Mi madre, por siempre brindar su apoyo incondicional que ha sido tan necesario para poder cumplir mis metas.*

*A mis familiares, hasta los que físicamente ya no están, por incentivar me y ser mi motor.*

*A Kayser, por ser mi compañero que acabó con mis solitarias amanecidas de trabajos y estudio.*

## **Agradecimientos**

*A mi familia, por ser siempre el respaldo que necesito para dar lo mejor de mí en cada proceso.*

*A los profesores de la facultad de Ingeniería Civil que, en su mayoría, me han apoyado pacientemente con sus orientaciones y críticas constructivas.*

*A mi asesor de tesis que me brindo confianza, orientación y apoyo en cada etapa del desarrollo de mi tesis.*

## INFORME

### INFORME DE ORIGINALIDAD



### FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>repositorio.upao.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>4%</b>
<b>2</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>alconpat.org</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>idoc.pub</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>www.dspace.espol.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>repositorio.uss.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>eprints.uanl.mx</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>tesis.usat.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>9</b>	<b>Submitted to Curtin University of Technology</b> Trabajo del estudiante	<b>1%</b>

## ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	<b>12</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>13</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>14</b>
<b>Revisión de literatura</b> .....	<b>16</b>
<b>Antecedentes del problema</b> .....	<b>16</b>
<b>Bases Legales</b> .....	<b>19</b>
<b>Bases teóricas</b> .....	<b>20</b>
Concreto armado .....	20
El acero .....	22
Problemas en el concreto armado .....	22
Corrosión del acero de refuerzo.....	23
Principios electroquímicos de la corrosión .....	25
Potencial de corrosión .....	25
Tabla de potenciales de serie galvánica .....	26
Aceros galvanizados .....	27
Ensayo de media celda.....	28
Curvas de Pourbaix .....	31
Soluciones Poro concreto.....	32
Potencial de circuito abierto OCP .....	32
Técnicas electroquímicas utilizadas en corrosión .....	33
<b>Materiales y métodos</b> .....	<b>38</b>
<b>Diseño de investigación</b> .....	<b>38</b>
Población, muestra .....	38
<b>Variables – operacionalización</b> .....	<b>39</b>
Variables .....	39
Operacionalización de variables.....	39
<b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</b> .....	<b>40</b>

Material des estudio .....	40
<b>Matriz de consistencia.....</b>	<b>44</b>
<b>Procedimientos .....</b>	<b>45</b>
Estudios complementarios.....	45
Procedimiento de maquinado y galvanizado de probetas de acero .....	46
Procedimiento de recubrimiento de aceros.....	48
Procedimiento de la elaboración de las probetas de concreto con acero sin agua con cloruro de sodio en la mezcla .....	49
Procedimiento de la elaboración de las probetas de concreto con acero con cloruro de sodio en la mezcla .....	50
Curado de probetas .....	51
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>57</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>57</b>
Cotización del acero galvanizado .....	57
Diseño de mezcla .....	58
Metalografía del acero .....	59
Análisis de muestras de agua .....	61
Ensayos de media celda .....	64
Formación de capa pasivada .....	75
<b>Conclusiones .....</b>	<b>92</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>94</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>98</b>

## Lista de figuras

Figura 1 Tiempo de vida útil de una Estructura .....	24
Figura 2 Celda electroquímica .....	25
Figura 3 Medición de Potencial de corrosión de diferentes estructuras.....	26
Figura 4 Potenciales de electrodo estándar a 25°C.....	27
Figura 5 Esquema de medición de potencial de corrosión.....	29
Figura 6. Gráfico de Pourbaix del acero ASTM A615 of Ecorr vs pH. ....	31
Figura 7. Principio de la técnica de modulación de frecuencia electroquímica. ....	34
Figura 8. Frecuencias armónicas e intermodulación que resultan desde las frecuencias básicas de 2 Hz y 5 Hz.....	35
Figura 9. Espectro de frecuencias de la señal de potencial medido para el acero dulce en 0.05 M de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al potencial de corrosión. ....	35
Figura 10. Espectro de frecuencias de la señal de intensidad de corriente medido para el acero de bajo carbono en 0.05 M de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	35
Figura 11. Dimensiones de probetas .....	41
Figura 12 Ubicación de muestreos .....	53
Figura 13. Potencial de metales con tendencia más noble en hacia la parte superior y con tendencia más activa hacia la parte inferior. ....	73
Figura 14. Diseño de celda de tres electrodos para acero A516 con concreto embebido. ....	77
Figura 15. Arreglo de celda de tres electrodos y solución poro de concreto (SPC).....	80
Figura 16. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 galvanizado.....	88

## Lista de gráficos

Gráfico 1 Metodología del diseño .....	38
Gráfico 2 Demostración de hipótesis .....	45
Gráfico 3 Proceso de estudio complementario.....	46
Gráfico 4. Gráfica de Ecorr sin NaCl con relación a/c = 0.60 .....	64

Gráfico 5. Gráfica de pourbaix del acero ASTM A615 con localización inicial de Ecorr medio acuoso sin NaCl.....	66
Gráfico 6. Gráfica de Ecorr en concentraciones de NaCl de 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. y relación a/c = 0.60.....	67
Gráfico 7. Gráfica de pourbaix del acero ASTM A615 con localización inicial de Ecorr concentraciones de NaCl de 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. ....	68
Gráfico 8. Gráfica de Ecorr sin NaCl con relación a/c = 0.60 .....	69
Gráfico 9. Gráfica de pourbaix del acero ASTM A615 galvanizado con localización inicial de Ecorr medio acuoso sin NaCl.....	69
Gráfico 10. Gráfica de Ecorr en concentraciones de NaCl de 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. y relación a/c = 0.60.....	70
Gráfico 11. Gráfica de pourbaix del acero ASTM A615 galvanizado con localización inicial de Ecorr concentraciones de NaCl de 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l.....	71
Gráfico 12. Gráfica de Ecorr en % NaCl de 2.0% y 5.0 %, 10.0 % respecto al peso de cemento .....	74
Gráfico 13. Gráfica de Pourbaix del acero ASTM A615 de Ecorr en % NaCl de 2.0% y 5.0 %, 10.0 % respecto al peso de cemento.....	74
Gráfico 14. Gráfica de Ecorr en % NaCl de 2.0% y 5.0 %, 10.0 %, respecto al peso de cemento .....	76
Gráfico 15. Variación de la velocidad de corrosión del zinc en función del pH del electrólito. ....	77
Gráfico 16. Potencial de corrosión del acero ASTM A615 en solución poro de concreto (SPC) con diferentes concentraciones de NaCl. ....	81
Gráfico 17. Potencial de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado en solución poro de concreto (SPC) con diferentes concentraciones de NaCl.....	82
Gráfico 18. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 en NaCl 0.0 g/l y 0.806 g/l. ....	83
Gráfico 19. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 en NaCl 78.802 g/l y 166.495 g/l.....	84
Gráfico 20. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 en diferentes concentraciones de NaCl en g/l.....	85
Gráfico 21. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 galvanizado en NaCl 0.0 g/l y 0.806 g/l.....	86
Gráfico 22. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 galvanizado en NaCl 78.802 g/l y 166.495 g/l. ....	87

Gráfico 23. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 galvanizado en diferentes concentraciones de NaCl en g/l..... 89

## Lista de fotografías

Fotografía 1 Aceros maquinados.....	47
Fotografía 2 Aceros galvanizados .....	47
Fotografía 3 Aceros con recubrimiento de pintura en base zincromato industrial.....	48
Fotografía 4. Peso de agregado grueso húmedo.....	49
Fotografía 5 Elaboración de probetas de concreto y acero .....	50
Fotografía 6 Curado de probetas .....	51
Fotografía 7 Extracción de muestra de agua superficial en Ciudad del Chofer.....	52
Fotografía 8 Extracción de muestra de agua superficial en Pimentel .....	52
Fotografía 9 Análisis de ph de muestra de agua superficial.....	54
Fotografía 10. Mezcla de relación a/c de 0.5 ingresando al matraz.....	55
Fotografía 11. Vista frontal de la celda de tres electrodos.....	56
Fotografía 12. Solución poro concreto.....	56
Fotografía 13. Fotomicrografía de la microestructura del acero ASTM A615 grado 60, del núcleo y superficie galvanizada. ....	59
Fotografía 14. Fotomicrografía de la microestructura del recubrimiento de galvanizado sobre el acero ASTM A615 grado 60, con espesores de 30.06 um y 27.33 um. ....	60
Fotografía 15. Fotomicrografía de la microestructura en estado de suministro del acero ASTM A615 grado 60, donde se aprecia la microestructura con un objetivo de 100x la matriz perlita y ferrita. ....	60
Fotografía 16. Medición de amperaje y voltaje para acero A516 con concreto embebido.....	78
Fotografía 17. Concreto con acero ASTM A615, corte transversal con aumento x2.76 .....	90
Fotografía 18. Concreto con acero ASTM A615, corte transversal, verificación de capa pasivada.....	91

## Lista de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variable independiente.....	39
Tabla 2 Operacionalización de variable dependiente.....	40
Tabla 3 Operacionalización de variable interviniente.....	40
Tabla 4 Composición del acero ASTM A615 grado 60.....	40
Tabla 5 Reparticiones de dosificaciones de NaCl en recipientes.....	42
Tabla 6. Clasificación de concentraciones en recipientes en probetas con NaCl en su mezcla	43
Tabla 7. Dosificaciones de NaCL en probetas "X" .....	43
Tabla 8 Cotización de acero de construcción.....	57
Tabla 9 Equivalencia de precio acero y concreto.....	57
Tabla 10 Cotización de acero de construcción galvanizado .....	57
Tabla 11 Resumen de diseño de mezcla.....	58
Tabla 12 Cantidad de materiales por m <sup>3</sup> .....	58
Tabla 13 Dosificación del diseño de mezcla.....	58
Tabla 14 Determinación de concentración de iones cloruro de muestras líquidas de análisis 1 .....	61
Tabla 15 Determinación de concentración de iones sulfato de muestras líquidas de análisis 1 .....	62
Tabla 16 Determinación del pH de muestras líquidas de análisis 1 .....	62
Tabla 17 Determinación de concentración de iones cloruro de muestras líquidas de análisis 2 .....	63
Tabla 18 terminación de concentración de iones sulfato de muestras líquidas de análisis 2...	63
Tabla 19 Determinación del pH de muestras líquidas de análisis 2.....	64
Tabla 20. Velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 en NaCl en g/l a diferentes concentraciones medidos con amperímetro.....	78
Tabla 21. Velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 galvanizado en contacto con NaCl en g/l a diferentes concentraciones con amperímetro.....	79
Tabla 22. Velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 en NaCl en g/l a diferentes concentraciones. ....	85

Tabla 23. Velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 en NaCl en g/l a diferentes concentraciones. .... 88

## Resumen

Las estructuras de concreto armado están constantemente expuestas a ataques de agentes externos, como los cloruros. Por eso, es importante determinar la eficacia de diversos métodos de protección, y entre ellos está el galvanizado por inmersión en caliente. La presente investigación tiene como objetivo realizar una comparativa de la influencia de la concentración de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 convencional y galvanizado, embebidos en concreto. Para tomar valores referenciales en la concentración de cloruros, se realizaron calicatas en diferentes puntos del departamento de Lambayeque y se tomaron muestras de agua subterránea, la cuales fueron analizadas en laboratorio. Con respecto a la evaluación de corrosión, se fabricaron 42 probetas con acero colocado en el centro, el cual fue maquinado en el centro dejando lisa su área de la cara lateral para poder tomar con mayor precisión la velocidad de corrosión. También es importante mencionar que 24 probetas de acero pasaron por un proceso de galvanizado por inmersión en caliente en una empresa metalúrgica, para así poder realizar una comparativa con las probetas de acero convencional. Realizado el vaciado de las probetas, se procedió a realizar el curado de estas. Para este proceso, el acero que sobresale del concreto se cubrió con pintura anticorrosiva, con el objetivo de protegerlo ante salpicaduras de agua de las fosas. Finalmente, fueron sumergidas en diferentes concentraciones de cloruro de sodio, para posteriormente medir su velocidad de corrosión, teniendo resultados variados para cada caso, teniendo finalmente una velocidad de corrosión mayor en los aceros comerciales y calculando una efectividad mayor al 30% del recubrimiento de zinc para la localidad de Lambayeque.

**Palabras clave:** corrosión, acero galvanizado, iones de cloruro de sodio, celda galvánica, concreto armado

### **Abstract**

Reinforced concrete structures are constantly exposed to attacks from external agents, such as chlorides. Therefore, it is important to determine the effectiveness of various protection methods, and among them is hot-dip galvanization. The present research aims to make a comparative analysis of the influence of sodium chloride concentration on the corrosion rate of conventional and galvanized ASTM A615 steel embedded in concrete. To obtain reference values for chloride concentration, soil pits were dug at various points in the Lambayeque department, and groundwater samples were collected and analyzed in the laboratory. Regarding the corrosion assessment, 42 test specimens were fabricated with steel positioned at the center, machined in the center to smooth the lateral face area for more precise corrosion rate measurements. It is also noteworthy that 24 steel specimens underwent a hot-dip galvanization process in a metallurgical company for comparison with conventional steel specimens. After pouring the specimens, they underwent the curing process. During this process, the steel protruding from the concrete was covered with anticorrosive paint to protect it from water splashes from the pits. Finally, the specimens were immersed in different concentrations of sodium chloride, and their corrosion rates were subsequently measured. Varied results were obtained for each case, with a higher corrosion rate in commercial steels, ultimately calculating an effectiveness of over 30% for the zinc coating in the Lambayeque locality.

**Keywords:** corrosion, galvanized steel, sodium chloride ions, galvanic cell, reinforced concrete

## Introducción

El concreto armado, en épocas pasadas, se consideraba un material bastante perdurable en el tiempo. No obstante, hoy por hoy, se ve cada vez más una cantidad considerable de estructuras deterioradas debido al fenómeno de la corrosión causada por los agentes externos, los cuales en gran parte están presentes en el suelo. Estos, al entrar en contacto con estructuras de concreto armado, aceleran un proceso inevitable de corrosión[1] y no sólo da la apariencia de un rendimiento deficiente, sino que, en casos extremos, puede perder su integridad estructural [2]. De estos agentes externos, destacamos los sulfatos y cloruros [3] que encontramos en el agua de los agregados, así como también en el suelo donde se ubican diversas estructuras, por lo cual podemos decir que el concreto está permanentemente expuesto a sufrir ataques. Así mismo, la corrosión que ocurre en el suelo es un proceso muy complejo y, por lo tanto, es difícil predecir la resistencia a la corrosión de un componente específico porque muchos factores pueden influir directamente en el comportamiento del material sumergido en el suelo [4]. Por ejemplo, la velocidad de corrosión del acero embebido en concreto con una relación agua-cemento de 0,4 es menor que con una de 0,6. Esto sucede porque a mayor relación agua-cemento, mayor es la porosidad y menor la resistividad eléctrica del concreto [1]. Con respecto al tema económico, se estima que los costos globales de la corrosión equivalen al 3,4% del PIB mundial (2013), mientras que en la India, los costos de la corrosión constituyen el 4,2% del PIB del país [5]. Desafortunadamente, en nuestro país y demás países Latinoamericanos no existen estudios concretos, actualizados y verificados sobre problemas económicos por corrosión y sobre sistemas de protección del acero corrugado en estructuras enterradas.

Al mismo tiempo, se sabe que la galvanización de las barras de refuerzo toma relevancia cuando se quiere hablar de uno de los métodos más efectivos [6] para extender la vida útil de las estructuras enterradas [7]. Puesto que la tasa de corrosión del acero galvanizado es notablemente más baja que la del acero galvanizado corroído y el acero al carbono desnudo, especialmente en concreto contaminado con cloruro porque el óxido de zinc es más denso que el hierro[1]. También es importante mencionar que se ha informado que los recubrimientos galvanizados con zinc aleados con aluminio, magnesio, hierro, etc. tienen una mejor resistencia a la corrosión, especialmente en entornos industriales, costeros y urbanos[8]. Además, el proceso de galvanizado por inmersión en caliente es ecológico, y el zinc es un elemento natural no tóxico presente en el agua y en el suelo, como consecuencia de procesos naturales. A

diferencia de la difusión de pinturas que produce un impacto ambiental severo y la eliminación de las muchas toneladas de pintura que se retiran en cada fase de mantenimiento requiere un alto costo [4]. Por otra parte, la carbonatación del concreto no aumenta significativamente la velocidad de corrosión del acero galvanizado con respecto a mediciones en concreto no carbonatado. Por el contrario, la exposición a la solución de cloruro después de la carbonatación del concreto conduce a una marcada disminución del umbral de cloruro para la corrosión del acero galvanizado con respecto al que se encuentra en el concreto no carbonatado [9].

Sin embargo, no todo es favorable para el galvanizado en los aceros de construcción, debido a que otros autores señalan muchos resultados contradictorios y, por lo tanto, es un hecho de que las consecuencias reales de la corrosión de las armaduras galvanizadas no se conocen, ni siquiera en la actualidad [10]. El uso de recubrimientos de zinc galvanizado para la protección de armaduras de acero convencionales no puede, hasta el día de hoy, considerarse claramente beneficioso y falta investigación sobre el tema [11]. También, se sabe que no hay una norma nacional que hable sobre el uso del acero galvanizado en nuestro país, sin embargo, esto no solo sucede aquí, ya que países como Argentina, Venezuela, Bolivia, etc, no tienen normado el uso de este gran recurso para las construcciones civiles, hecho bastante curioso debido a que su costo se reduce a 2-3 % del costo de la obra. Y su beneficio es que aumenta entre 4 a 5 veces la vida útil de la obra. Independientemente de ello, este método de protección nos da ventajas frente al uso convencional del acero de refuerzo. Sin embargo, al parecer no hay mucha intención de querer obtener experiencia en el uso del acero galvanizado, quizá por la ausencia de una referencia nacional.

El presente artículo científico requiere determinar las concentraciones de cloruro de sodio en aguas superficiales, a 5km, 10 km y 15 km con respecto al océano Pacífico mediante excavaciones, extrayendo agua superficial, para posteriormente ser analizada en laboratorio y poder simularlo en la fase de experimentación. Así permitiendo mostrar tendencias de los potenciales de corrosión durante 4 meses, lo que deriva en analizar una comparativa entre el potencial de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado con y sin protección de galvanizado por inmersión en caliente. Y así finalmente, consiguiendo determinar la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 estándar y galvanizado, todo mediante ensayo de media celda. Como objetivo principal se tiene determinar la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en un concreto  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .

## Revisión de literatura

### *Antecedentes del problema*

En [12], se tuvo como objetivo determinar en qué medida el uso de soluciones de poro simulados permite predecir el comportamiento de las armaduras embebidas en concreto mediante una comparación entre las curvas de polarización de barras de acero embebidas en mortero con y sin contenido de cloruros de 0, 0.5, 1, 5 y 10% con respecto al peso del cemento. El resultado de la investigación fue que el uso de probetas prepasivadas en SPS (simulando el tiempo de curado húmedo de 28 días en mortero) no modifica los resultados y que el uso de SPS con diferentes niveles de cloruro es útil al comparar el comportamiento a la corrosión de diferentes materiales.

Según manifiesta [13], que debido a la necesidad percibida de producir resultados en un período relativamente corto, es posible que los resultados, de hecho, no sean tan representativos del comportamiento real de la barra de refuerzo, ya que como bien se sabe, la penetración de cloruros en el concreto armado lleva muchos años. Esto significa que el hormigón tiene tiempo de madurar y el acero tiene tiempo de equilibrarse en el ambiente alcalino, antes de que el acero encuentre cloruros y se inicie la corrosión. Sin embargo, para los experimentos de laboratorio, no es práctico esperar muchos años para obtener resultados. Nos menciona que si tenemos como objetivo es evaluar un periodo largo de vida útil, se debe considerar razonable y necesario dedicar un mínimo de unas pocas semanas o meses para la evaluación. También que se debe evitar la exposición al hormigón o a soluciones de poros que contengan cloruros, a menos que el objetivo sea determinar la influencia de sustancias contaminadas. La medición del potencial de media celda es la técnica más utilizada en la evaluación de la corrosión del acero en concreto armado. Sin embargo, al interpretar los datos, se deben tener en cuenta los factores ambientales y, siempre que sea posible, se deben realizar análisis repetidos de la condiciones de la misma época del año. Es más, se recomienda mojar completamente una gran área de la estructura y que las mediciones comiencen no antes de 15 minutos después de que el área de medición esté húmeda.

La investigación realizada por [4], nos menciona que la corrosión en el suelo plantea un contexto sumamente complejo, lo que complica la predicción de la resistencia a la corrosión de

elementos específicos. Diversos factores pueden influir directamente en el comportamiento del material inmerso en el suelo. La investigación se enfocó en analizar el impacto de las concentraciones de cloruros y sulfatos en la corrosión de alambres de acero galvanizado enterrados. Se emplearon técnicas electroquímicas, como el potencial de circuito abierto, la espectroscopia de impedancia electroquímica y la polarización potenciodinámica, para monitorear los cables. Posteriormente, las muestras se extrajeron y examinaron minuciosamente con microscopía óptica y electrónica para analizar la superficie corroída y la morfología de la corrosión. Los resultados revelaron que los cloruros y sulfatos ejercen un impacto considerable, lo que conduce a una notable degradación del recubrimiento de zinc. Específicamente, la combinación sinérgica de estos elementos provocó, en situaciones críticas, la pérdida de protección de la capa externa, lo que resultó en un contacto directo entre el sustrato de acero y el suelo, reduciendo significativamente la resistencia a la corrosión del material.

En [14], se llevaron a cabo investigaciones de campo para evaluar el estado de corrosión de los refuerzos en los túneles subterráneos del metro construidos entre 1980 y 2006. Se midieron in situ la profundidad de carbonatación, el potencial de media celda y la resistividad del concreto. Se realizó un análisis teórico basado en la ecuación de Nernst y la ecuación de Butler-Volmer. Se reveló la naturaleza del potencial de corrosión (potencial de media celda) y su relación con la velocidad de corrosión en diferentes estados de corrosión. También se analizó el impacto del acoplamiento galvánico sobre la corrosión localizada y la corrosión de macroceldas. Al conectar el análisis teórico con los resultados de las pruebas, la caída del potencial de media celda que se produjo cerca de la cristalización de NaCl en algunos segmentos del túnel puede servir como indicador de la corrosión inducida por cloruro. Sin embargo, para los segmentos que muestran parches húmedos y resistividad relativamente baja, será un desafío evaluar el estado de corrosión basándose simplemente en el potencial de media celda debido al impacto del acoplamiento galvánico. Los autores creen que el impacto de la cristalización de NaCl debe considerarse cuidadosamente en el diseño de durabilidad, la predicción de la vida útil y el mantenimiento diario de estructuras de hormigón armado en entornos similares.

Los investigación realizada por [15], menciona que hay necesidad de estudiar el comportamiento de la corrosión del acero en el hormigón durante su vida útil. Tiene como objetivo comparar y evaluar sistemáticamente diferentes métodos para acelerar la corrosión inducida por cloruro del refuerzo de acero en concreto. Primero, se analizan brevemente los

métodos acelerados categorizados en tres grupos, a saber, la corriente impresa (IC), la difusión de iones cloruro (CID) y el entorno climático artificial (ACE). Luego, se comparan y evalúan los factores clave que influyen (es decir, densidad de corriente, concentración de sal, carga de servicio) que afectan los resultados de corrosión en diferentes métodos. Finalmente, se analizan exhaustivamente los productos de corrosión y el método de aceleración, concluyendo que la difusión de cloruro podría ser un método alternativo para iniciar la corrosión, pero falta investigación experimental sobre esta técnica. Se deberían centrar más investigaciones en la fase de propagación de la corrosión y en cómo este método puede representar el proceso de corrosión natural y que los iones cloruro están presentes en varios tipos de sal en la naturaleza, vale la pena estudiar más a fondo el efecto de acoplamiento de los tipos de cationes cloruro sobre el comportamiento de corrosión del refuerzo, así como el posterior mecanismo de degradación estructural.

En 2022 , se presentó la morfología de la corrosión de alambres de acero de alta resistencia galvanizados artificialmente y su efecto sobre el comportamiento mecánico. La morfología de la corrosión se obtuvo mediante un escáner óptico 3D. Se identificaron cuatro morfologías típicas de picaduras en alambres corroídos: picadura cónica, picadura hemisférica, picadura combinada y picadura secundaria. Posteriormente, se discutió el efecto de las picaduras de corrosión sobre el comportamiento mecánico de los alambres corroídos. Muestra que la degradación de la ductilidad de los alambres corroídos es mucho mayor que la de la resistencia; la degradación de la ductilidad está estrechamente relacionada con la relación entre la profundidad de la picadura y el radio residual. Además, se encontró que la función de densidad probabilística de la relación entre la profundidad de las picaduras y la profundidad de la corrosión uniforme tiende a estabilizarse cuando la pérdida por corrosión es superior al 10%, lo que indica que la superficie del alambre corroído con picaduras de corrosión se adelgaza uniformemente.

En el artículo de [16] , se tiene como objetivo evaluar el método de predicción de la actividad temprana de corrosión del acero en las pruebas OCP aceleradas. La evaluación se basó en el tipo de electrodo de referencia, la adopción de ciclos de humectación y secado y el nivel de inmersión de las muestras en solución de NaCl. Este artículo se centra en ensayar compuestos cementosos que contienen residuos industriales (SBAS y WTPS) en sustitución de arena natural. Se concluyó que el tipo de electrodo de referencia no afecta los resultados de OCP. Diferentes soluciones dentro de cada electrodo analizado (KCl y KOH) no son capaces de contaminar los composites cementosos (atacados por soluciones de cloruro), y viceversa. También que el nivel de inmersión influye fuertemente en el proceso de corrosión. La inmersión

parcial de las muestras en solución salina favorece una entrada más fácil de oxígeno y una mayor succión capilar debido a la evaporación del agua.

En 2018 [17], nos detalla que en los últimos tiempos, la modulación de frecuencia electroquímica ha atraído la atención de los investigadores de la corrosión como una técnica prometedora con alta sensibilidad, así como una alta precisión debido al cálculo inherente de factores de causalidad. Por lo tanto, la comparación de datos obtenidos de EFM con resultados de técnicas electroquímicas convencionales para análisis de corrosión se ha convertido en una tendencia común. En la investigación se revisa la técnica EFM y su propensión a convertirse en una técnica electroquímica de elección para la investigación de la corrosión. Se destacan la aplicación reciente de EFM para la evaluación de inhibidores de corrosión, análisis de corrosión por CO<sub>2</sub> y evaluación de corrosión inducida. Dentro de las conclusiones más importantes se tiene que en comparación con técnicas contemporáneas como la polarización potenciodinámica, la polarización lineal, la espectroscopia de impedancia electroquímica y la pérdida de peso, la técnica EFM ofrece una excelente alternativa para el análisis del comportamiento de corrosión electroquímica de los metales y que efectivamente se puede utilizar como una nueva técnica de evaluación de la corrosión para investigaciones que involucran inhibidores de corrosión, corrosión por CO<sub>2</sub> y corrosión inducida.

### ***Bases Legales***

- **ASTM A615/ NTP 341.031 G60: Fierro Corrugado ASTM A615-Grado 60**  
La norma en mención, establece los requerimientos que debe obedecer las barras corrugadas que serán utilizadas como acero de refuerzo, estos requisitos consisten en la composición química, peso, propiedades mecánicas, dimensiones, etc [18].
- **Norma ISO 9223**  
Esta norma categoriza los niveles de corrosividad atmosférica dependiendo de la velocidad de corrosión en ciertos metales [19].
- **ASTM G3-89**  
Esta norma informa y visualiza datos de corrosión electroquímica.  
Convenciones para potencial, densidad de corriente, impedancia

electroquímica y admitancia, así como convenciones para la presentación gráfica [20].

- **ASTM G15 2007**

Esta normativa, nos da una explicación y definición del fenómeno de la corrosión [21].

- **ASTM D 512:**

Métodos de prueba estándar para ion de cloruro en agua [22].

- **ASTM D 516:**

Método de prueba estándar para iones sulfato en agua [23].

- **ASTM C876 .**

Método de prueba estándar para potenciales de corrosión de acero de refuerzo [24].

### ***Bases teóricas***

#### ***Concreto armado***

Es un material compuesto, es decir, un conjunto de concreto y acero, donde este último le brinda la resistencia a la tracción, que no tiene el concreto por sí mismo.

#### **a) Virtudes y Características del concreto**

##### Protección física

Hay diferencia entre la corrosión sin recubrimiento, es decir, expuesto y la del acero embebido en concreto. “Esta capa de concreto retarda la entrada de agentes agresivos, como el oxígeno, la humedad y los iones cloruros a la interfaz acero-concreto” [25]. Generalmente la corrosión del acero ocurre cuando el espesor del recubrimiento no es el adecuado para su medio.

### Protección química

El acero dentro del concreto está “protegido” por una barrera química. Esta es gracias al grado de alcalinidad inherente del concreto. Donde ocurre la capa pasivante que retarda el proceso corrosivo. El grado de alcalinidad del concreto, es gracias al hidróxido de calcio (CH) producido en la hidratación de los silicatos del cemento y a los álcalis (sodio y potasio) que están presentes como sulfatos en el cemento [26].

En la hidratación del cemento se produce un ambiente adecuado para alcalinidad con un alto pH (mayor o igual a 12). El acero incrustado en el concreto de alto pH sin cloruros no sufre ningún ataque de corrosión notable, incluso si hay suficiente humedad y oxígeno disponibles. Esto se debe a la capa pasivante. Esta capa de óxido superficial, que es una barrera física que separa el metal del electrólito adyacente, a menudo se denomina película de óxido o película pasiva.

El espesor de la capa pasiva está alrededor de 0,4 nanómetros (nm) [26]. Esta nueva capa de óxido tiene características y propiedades muy diferentes al acero ya que se forma en un medio alcalino sobre el acero y actúa como protección química que disminuye el proceso de corrosión a esto se le conoce como pasividad o estado pasivo.

### Porosidad del concreto

La porosidad es una de las características más importantes a tomar en cuenta en los concretos, ya que tiene una influencia considerable en su resistencia y su durabilidad. Entonces, a más porosidad, más incidencia tendrá en disminuir su resistencia, y por lo tanto, será más vulnerable ante la exposición del medio que le rodea.

El agregado es el esqueleto y la pasta de cemento, el aglutinante, que permite la unidad. De estas dos fases la que tiene mayor importancia, visto electroquímicamente, es la pasta porque tiene porosidad. Por lo cual, los

procesos de transporte de carga y de masa en el concreto se van a dar en la pasta y no en los agregados.

La pasta de cemento tiene poros de tamaños variados que se denominan como poros gel (0.2nm), poros capilares 50nm hasta 1 $\mu$ m y huecos (>10  $\mu$ m) y debido a errores constructivos se puede tener una red de poros fácilmente penetrables por los agentes agresivos [27].

### ***El acero***

El acero compensa la débil capacidad de tracción del concreto, mientras que el entorno alcalino del concreto favorece la formación de una película pasiva sobre la superficie del acero para protegerla de la corrosión [28].

#### **b) Características del acero de refuerzo**

En el acero de refuerzo del concreto debe presenciarse corrugaciones para favorecer la adherencia con el concreto excepto los alambres y mallas electrosoldadas. La norma de fabricación (A 615/A 615M 2002) refiere que las barras con óxido, pliegues, irregularidades o cascarilla de laminación no serán causa de rechazo, siempre que el peso, las dimensiones, sección transversal y las propiedades mecánicas de una muestra cepilladas con escobillas de acero no sean menores que los requerimientos de esta norma.

### ***Problemas en el concreto armado***

El concreto armado es ampliamente utilizado en construcciones civiles como edificios, represas, puentes, etc. Estas estructuras implican grandes esfuerzos de construcción, cuestan mucho dinero y exigen una vida útil de varios años, sin embargo pueden sufrir deterioro por diversas causas:

- **Causas Físicas:** agrietamiento, por el fuego.

- **Causas Mecánicas:** El concreto puede presentar grietas transversales (grietas inducidas por la carga excesiva) y son las más extensas lo que puede acelerar el ingreso de cloruro, humedad u oxígeno.
- **Causas Químicas:** Existen dos causas principales de la corrosión del acero en concreto armado y son: corrosión inducida por cloruros y corrosión inducida por carbonatación y otras causas como el ataque de sulfato, ataque de ácido, agua de mar, reacción de álcali agregado, lixiviación, etc.
- **Corrosión del refuerzo:** Todo daño de la corrosión del acero embebido se revela en forma de expansión, grietas longitudinales (grietas inducidas por la corrosión) y eventual desprendimiento del recubrimiento siendo el principal proceso de deterioro que puede causar una reducción prematura de la vida útil en cualquier estructura de concreto.

### ***Corrosión del acero de refuerzo***

Para aceros en concreto la corrosión se obtiene por disminución de su diámetro inicial, la pérdida de sus propiedades mecánicas, la acumulación de óxidos expansivos que provocan grietas, desprendimiento del concreto ocasionando el ingreso de oxígeno y posterior corrosión del acero de refuerzo [29].

Se denomina corrosión al deterioro de las propiedades de un material debido por la exposición y acción al medio, mediante un proceso electroquímico.

En nuestro medio existen agentes externos que causan corrosión en el acero de refuerzo o pueden acomodar ciertas condiciones para el inicio prematuro de la misma, donde se destaca la presencia de los cloruros.

### **c) Etapas de corrosión del acero**

De acuerdo con el modelo de Tuutti la corrosión del acero en concreto comprende dos períodos. En el primer periodo los elementos agresivos, como el cloruro (Cl-) o el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presentes en el medio circundante, penetran en el concreto, en el segundo periodo la propagación

comienza, cuando estos elementos agresivos están en niveles de concentración bastante altas en el refuerzo, lo cual provoca la expansión de óxidos que puede romper el recubrimiento del concreto.

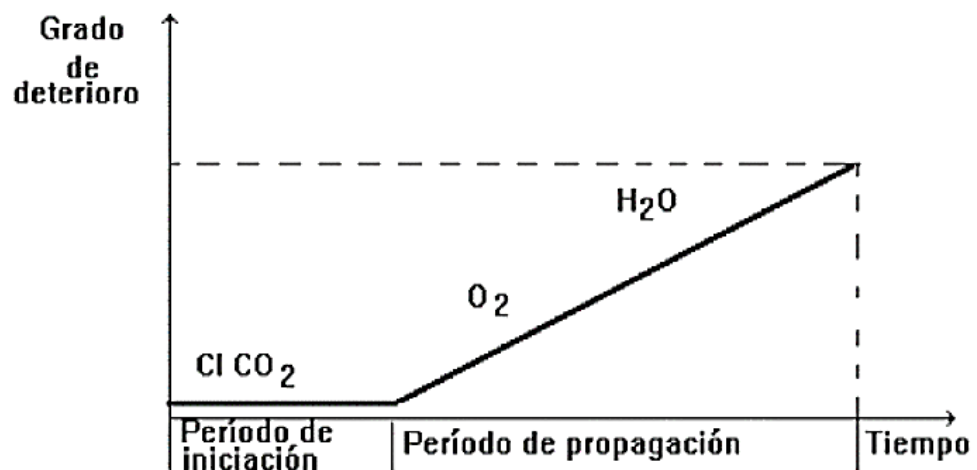
Períodos:

-Período de iniciación: Tiempo que tarda los cloruros y/o carbonatación en provocar la despasivación.

-Período de propagación: Proceso de corrosión que, si no es tratado, puede llegar a un deterioro total de la estructura.

Entonces, para describir la corrosión, es recomendable definir, por un lado, la penetración de los agentes agresivos a través del concreto y, por otro lado, las condiciones de despasivación del refuerzo, la vel. corrosiva y el crecimiento expansivo de óxidos.

*Figura 1 Tiempo de vida útil de una Estructura*



**Fuente:** El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado [30]

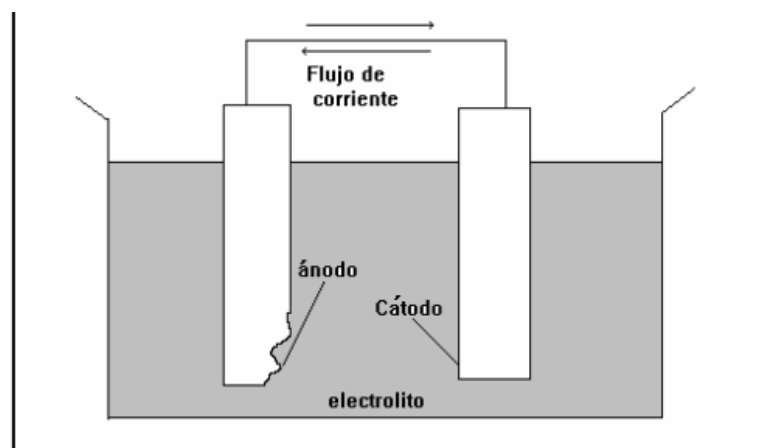
#### **d) Velocidad de corrosión**

La velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ ) se asocia a la pérdida de metal con respecto al tiempo, tanto la corrosión del acero embebido en el concreto armado y del acero expuesto al medio ambiente (sin concreto) en ambos casos la velocidad de corrosión es el resultado de un proceso electroquímico, el cual depende de dos reacciones: la anódica y la catódica.

### ***Principios electroquímicos de la corrosión***

La reacción anódica se refiere a la oxidación de los metales, donde se generan electrones que quedan en el metal y los átomos se convierten en cationes en solución acuosa. Por otro lado, la reacción catódica se relaciona con la reducción de la carga de valencia de un metal o no metal, implicando un consumo de electrones. En las reacciones de corrosión electroquímica, se producen reacciones de oxidación que liberan electrones y reacciones de reducción que los utilizan. Ambas reacciones deben ocurrir simultáneamente y a la misma velocidad global para evitar la acumulación de carga eléctrica en el metal.

*Figura 2 Celda electroquímica*



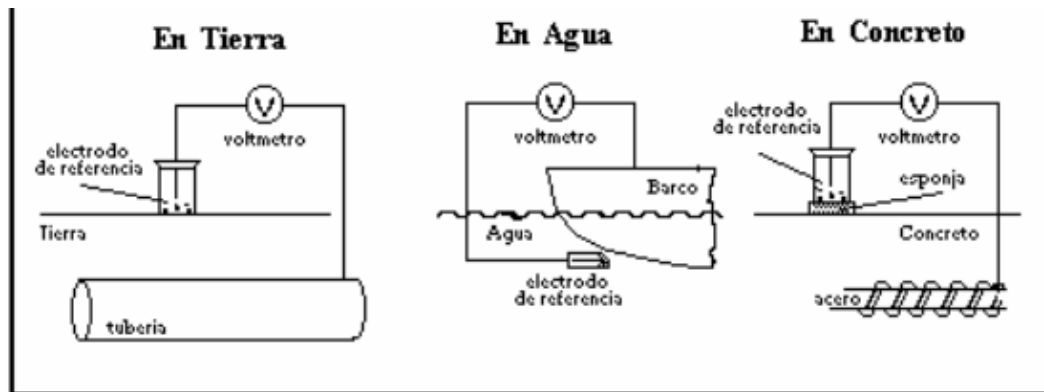
Fuente: El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado[30].

### ***Potencial de corrosión***

Cuando la protección metálica se desgasta, su capacidad y la rapidez con la que se deteriora cambian, por lo tanto, el análisis de estos parámetros proporciona una evaluación precisa del nivel de peligro de corrosión, tanto en entornos de laboratorio como en estructuras reales. El proceso de corrosión de un metal en un entorno acuoso, como el caso de la protección metálica dentro del concreto, implica dos reacciones de oxidación-reducción: la oxidación del Fe a Fe<sup>+2</sup> y la reducción del oxígeno. En un estado de equilibrio cinético, la intensidad de los procesos anódicos y catódicos es igual, identificada como la intensidad de corrosión del proceso,  $I_{corr}$ , que representa la magnitud eléctrica utilizada para medir la velocidad de corrosión [31]. En este equilibrio, el metal se descompone a un

potencial característico determinado por su composición y las características del medio en el que está sumergido. A este potencial de equilibrio se le conoce como potencial mixto o de corrosión,  $E_{corr}$ .

*Figura 3 Medición de Potencial de corrosión de diferentes estructuras*



Fuente: El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado [30].

### ***Tabla de potenciales de serie galvánica***

Cada metal presenta una diferente sensibilidad a la corrosión en un entorno particular. Por ejemplo, el zinc se corroerá en presencia de cloruro de sodio, mientras que el oro permanecerá inalterado en estas condiciones. Los metales que son menos reactivos que el hidrógeno se consideran catódicos en comparación con el hidrógeno y se les asigna un potencial eléctrico positivo.

Figura 4 Potenciales de electrodo estándar a 25°C

	(corrosión)	(volts frente a electrodo estándar de hidrógeno)
↑	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	+1,498
	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	+1,229
	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	+1,200
	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0,799
Más catódico (menor tendencia a la corrosión)	$2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,788
	$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$	+0,771
	$4(\text{OH})^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	+0,401
	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,337
	$\text{Sn}^{2+} \rightarrow \text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^-$	+0,150
	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0,000
	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,126
	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,136
	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,250
	$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,277
Más anódico (mayor tendencia a la corrosión)	$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,403
	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,440
	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,744
	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,763
	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,662
	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,363
↓	$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$	-2,714

\* Las reacciones se escriben como semiceldas anódicas. La reacción de semicelda más negativa, la más anódica, presenta la mayor tendencia a que aparezca la corrosión u oxidación.

Fuente: Fundamentos de corrosión y protección [32]

### *Aceros galvanizados*

La galvanización de los aceros es un procedimiento de protección ante medios que promueven la corrosión, en el que un acero se recubre de zinc. Este proceso funde hierro con zinc. Esto tiene una duración aproximada de 5min.

En el sistema de recubrimiento, el zinc tiene dos roles en la protección del acero. En primer lugar, actúa como una barrera física para proteger el acero al carbono. Cuando esta capa se corroe y expone el acero, el zinc funciona como un ánodo de sacrificio, proporcionando protección catódica al acero.

El galvanizado no es más que el baño del acero en diferentes tinas de solución. Sus pasos:

- Desengrase. Eliminación de impurezas
  - Decapado. Se elimina cualquier forma de óxido para tener una superficie químicamente limpia.
  - Flux: Sal protectora frente a oxidación
  - Baño de Zn fundido: en temperaturas entre 430 y 450 °C.
- El proceso está normado según la norma ASTM A153.

### ***Ensayo de media celda***

La medición del potencial de corrosión implica calcular la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de la armadura y un electrodo de referencia colocado en la superficie del concreto. La medición de  $E_{corr}$  es el método más común y ampliamente utilizado en inspecciones de estructuras afectadas por la corrosión [31]. Además, se aconseja obtener mediciones simultáneas de la velocidad de corrosión siempre que sea viable, con el fin de mejorar la confiabilidad y establecer la probabilidad real de corrosión en la armadura.

Este procedimiento es aplicable a la armadura de acero sin ningún tipo de recubrimiento, ya sea dentro de cualquier tipo de concreto en estructuras en funcionamiento o en muestras de laboratorio. Puede utilizarse tanto en estructuras o muestras expuestas al ambiente como en entornos sumergidos, teniendo cuidado en el último caso de aislar adecuadamente la conexión entre el cable y el electrodo. Cabe mencionar que, aunque este método puede aplicarse en situaciones con armaduras recubiertas con pinturas anticorrosivas, armaduras galvanizadas o en presencia de inhibidores, su interpretación es diferente debido a posibles variaciones en los rangos de pasividad y corrosión.

#### **e) Instrumentos**

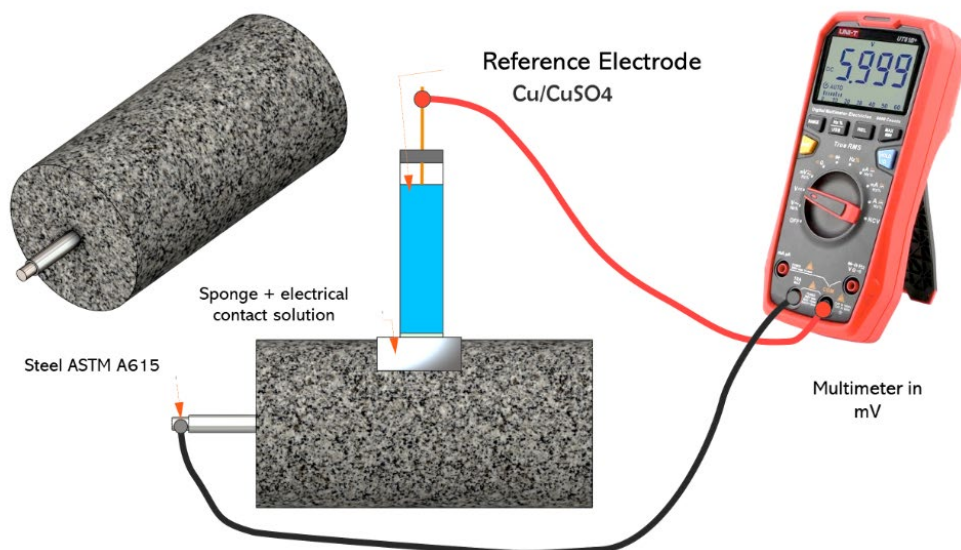
- Media celda: Es un tubo elaborado con elementos no reactivos con cobre, de carácter poroso y húmedo, junto a una barrita de cobre que se hunde dentro del tubo en una solución saturada. La solución se hará con cristales de sulfato de cobre de grado reactivo disueltos en agua destilada.
- El tubo de vidrio: con un diámetro interno no inferior a 25 mm.

- Dispositivo de empalme eléctrico: para recrear un anexo una minúscula resistencia eléctrica entre la superficie de concreto y de la media celda.
- Voltímetro o multítester
- Cables eléctricos: viene con multítester.

#### f) Preparación

Previo a usar la media celda, se verifica el electrodo referencial, usando una celda galvánica, que no es más que un metal, un multítester, un electrolito (NaCl) para que permita el flujo de electrones, un recipiente adecuado y un electrodo de referencia.

*Figura 5 Esquema de medición de potencial de corrosión.*



Fuente: Propia

Se coloca las soluciones en el recipiente sumergiendo el elemento a medir y el electrodo referencial, después se conectan los cables conectores del voltímetro a los elementos de prueba y el voltímetro indicará la diferencia de potencial.

#### g) Procedimiento

- a) Espacios de las medidas: Cuando no se define un espacio mínimo entre medidas en el área del concreto, se halla un valor minúsculo al tomar dos

medidas desde 1 punto. De forma contraria, al tomar medidas con espacios anchos, tampoco se puede medir la corrosión y tampoco resulta para una toma de datos adecuada. El espaciamiento será medido consistentemente al elemento que está siendo midiendo y el proyectado uso final de las mediciones.

**b) Conexión Eléctrica para el Acero:**

- Elaborar una conexión con el acero de refuerzo, con ayuda de una abrazadera, a la varilla saliente. Para tener exactitud en la conexión de resistencia eléctrica, se debe raspar la varilla antes de las conexiones. A veces, se retira una parte de concreto para así dejar expuesto al acero. Posteriormente se conectará eléctricamente el acero de refuerzo al terminal positivo del voltímetro.
- Se puede acoplar directo al acero.

La medida de ensayos es continuada en un determinado lapso de tiempo, teniendo los mismos puntos de conexión para hacer las mediciones.

**c) Conexión eléctrica de la Media Celda:** Se deberá tener una conexión en el final del cable conductor y el otro extremo del cable al terminal negativo del voltímetro.

**d) Humedecer Concreto:**

- Es posible que, a la superficie del concreto, se le humedezca con el objetivo de aminorar la resistencia eléctrica del circuito.

**e) Mediciones Horizontales y Verticales bajo el agua**

-Se harán medidas de potencial con el objetivo de detectar la corrosión, sin embargo, no el punto donde ocurre la misma. En mediciones sumergidas, los resultados deben ser tomados con cuidado ya que pueden ser variables. Habitualmente, no se ubica el punto donde ocurre este fenómeno ya que en un ambiente sumergido los resultados son bastante variables. Solo se puede precisar si ocurre o no el proceso corrosivo. Los comportamientos horizontal y vertical ascendente de las mediciones igual al de las mediciones verticales descendentes.

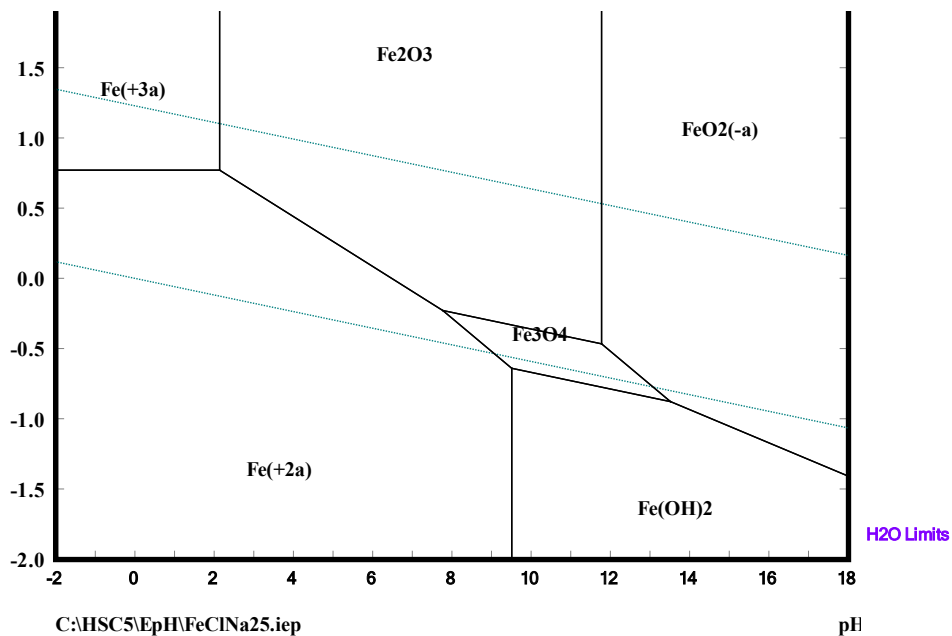
**f) Recolección de datos de Potencial de Media Celda**

-Se toman las medidas de potenciales eléctricos de media celda con una precisión de 0.01 V. Se toman los datos en voltios.

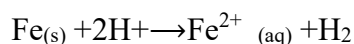
### Curvas de Pourbaix

El uso de diagramas de pourbaix para un mejor entendimiento del estado en que se encuentra el acero de construcción ASTM A615 grado 60, el metal podría encontrarse en la zona de inmunidad, en su forma elemental y termodinámicamente estable. Es importante mencionar que el metal puede encontrarse pasivado, y esto ocurre cuando se genera un compuesto sólido del metal en la fase termodinámicamente estable. Estos pueden ser óxidos, hidróxidos o hidruros. De lo anteriormente descrito, podemos concluir que los diagramas de Pourbaix son de mucha ayuda para entender el comportamiento de los materiales metálicos frente a la corrosión ya que permiten predecir zonas de inmunidad, corrosión y pasivación, ver figura 6.

Figura 6. Gráfico de Pourbaix del acero ASTM A615 of Ecorr vs pH.



Analizando el potencial del acero en voltios con una concentración de 0.0 g/l de NaCl, donde el pH es ligeramente ácido, y el hierro es bastante inestable se genera la reacción de oxidación por el hierro y reducción por el hidrógeno generando hierro catiónico e hidrógeno molecular.



### ***Soluciones Poro concreto***

La corrosión de barras de acero utilizadas como refuerzo en concreto se realizan frecuentemente utilizando las llamadas soluciones de poros simulados o solución poro concreto en sustitución de los ensayos realizados en probetas de concreto armado. La solución de poros es una solución salina que intenta simular las condiciones físico-químicas en que están habitualmente los refuerzos de acero en el concreto armado [33]. Estas soluciones contienen álcalis y están desarrolladas básicamente con el objetivo de simular el pH de la solución de poro real (entre 12,5 y 13,5). Se encuentran diferentes formulaciones en la literatura, pero difieren ligeramente en composición. siendo  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , KOH y NaOH los constituyentes principales [12]. Además, para estudiar el efecto del contenido de cloruro en el hormigón, normalmente se añaden iones cloruro a las soluciones de poros simulados.

### ***Potencial de circuito abierto OCP***

La técnica del potencial de circuito abierto (OCP) es un método no destructivo que se utiliza para estudiar y monitorear este problema. Esta prueba también se puede utilizar en un ambiente de laboratorio y proporciona información valiosa que respalda el proceso de selección de materiales complementarios para concretos duraderos. El objetivo principal de este método puramente cualitativo es evaluar la probabilidad de que se produzca corrosión, sin proporcionar ninguna información cuantitativa. Aunque esta técnica cualitativa se utiliza comúnmente, todavía falta consenso sobre la idoneidad de procedimientos específicos para el análisis experimental, como el tipo de electrodo de referencia y la influencia de los procedimientos de envejecimiento acelerado (adopción de ciclos de humectación/secado y nivel de inmersión de las muestras).

### *Técnicas electroquímicas utilizadas en corrosión*

Dado que la corrosión tiene una naturaleza electroquímica, se han empleado diversas estrategias electroquímicas para determinar la velocidad de este proceso. Estas técnicas se fundamentan en la ley de Faraday, que establece una conexión entre la transferencia de cargas eléctricas, el flujo de masa y la densidad de corriente eléctrica.

Los métodos electroquímicos destacan por su rapidez en las pruebas, así como por su elevada confiabilidad y capacidad para analizar el proceso de corrosión. No obstante, su principal inconveniente radica en la necesidad de perturbar el sistema mediante la aplicación de cambios en el potencial, lo que podría inducir alteraciones en el sistema. Las perturbaciones más o menos irreversibles que puede causar la polarización, dependen de la intensidad de la señal.

#### **a. Técnicas electroquímicas utilizadas en corrosión**

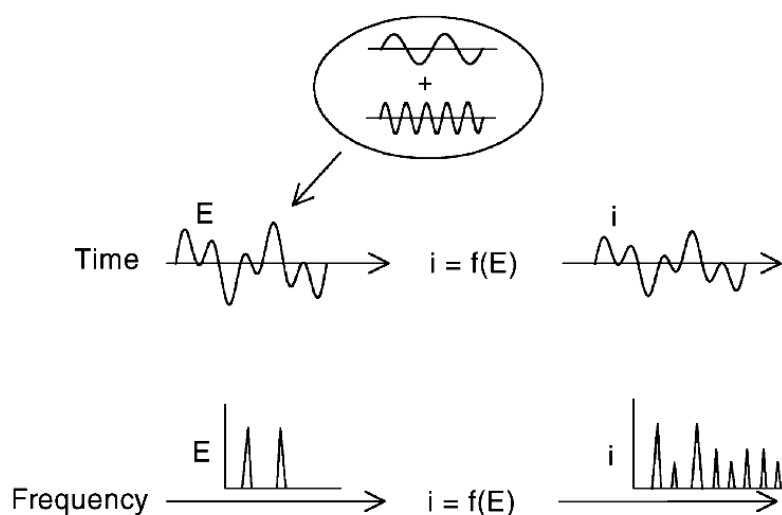
En la metodología de modulación de frecuencia electroquímica (EFM), se introduce una pequeña señal (20 mV) para perturbar el sistema corroído, y luego se registra la respuesta de corriente no lineal. La EFM presenta una ventaja significativa al evitar la aplicación de una señal de potencial considerable a la muestra, lo que ayuda a prevenir su deterioro. Además, esta técnica permite medir la velocidad de corrosión de manera instantánea sin necesidad de conocer los coeficientes de Tafel. Un beneficio adicional es la presencia de factores conocidos como Factores de Causalidad en la técnica EFM, los cuales pueden emplearse como un control interno para validar la precisión de los datos obtenidos.

##### i) Principio de la técnica de modulación de frecuencia electroquímica

En [34], nos comentan que la EFM ofrece la ventaja de validar los datos experimentales mediante el empleo de factores de causalidad y la posibilidad de elegir entre diversos modelos de corrosión. Esta técnica es aplicable en distintos entornos con diversas cinéticas de corrosión, tales como: (a) controlado por activación, (b) controlado por difusión y (c) controlado por pasivación. Cada uno de estos modelos presenta ecuaciones distintas, derivadas de diversas relaciones corriente-voltaje del proceso corrosivo. Este novedoso modelo ha sido evaluado en diversos sistemas de corrosión. [i, ii]

En la técnica de EFM, a un sistema que está en proceso corrosivo se le aplica una perturbación del potencial mediante dos ondas sinusoidales de diferentes frecuencias ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ) y la respuesta de intensidad de corriente no-lineal AC, que es producto de esta perturbación, se miden a frecuencias cero, frecuencias armónicas ( $2\omega_1$ ,  $2\omega_2$ ,  $3\omega_1$ ,  $3\omega_2, \dots$ ) y frecuencias de intermodulación ( $2\omega_1 \pm \omega_2$ ,  $\omega_1 \pm 2\omega_2, \dots$ ). Estas frecuencias son múltiplos de las frecuencias bases y suma/resta de las frecuencias bases, respectivamente. Debido a que, por su propia naturaleza, un proceso de corrosión es no lineal, las respuestas se originan en frecuencias más allá de las frecuencias de la señal aplicada.

Figura 7. Principio de la técnica de modulación de frecuencia electroquímica.



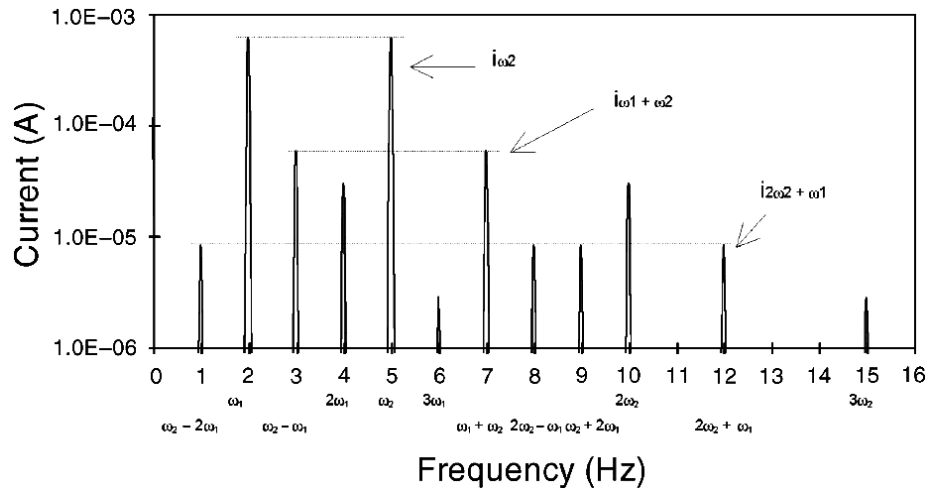
Fuente: [34].

Mediante el análisis de los picos de intensidad de corriente a frecuencias armónicas e intermodulación se obtiene la velocidad de corrosión y los parámetros de Tafel. La figura 8 nos muestra una representación esquemática de un espectro de frecuencia obtenida mediante EFM, ilustrando las diferentes frecuencias armónicas e intermodulación.

Las figuras 9 y 10 presentan resultados derivados de sistemas reales de corrosión, específicamente de un acero de bajo carbono en una solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - 0.05M. Se utilizó una señal de perturbación con una amplitud de 20 mV para ambas frecuencias y frecuencias de perturbación de 0.2 Hz y 0.5 Hz. En la figura 10, se exhibe la señal de potencial en el espectro de frecuencia, medida sobre la celda de corrosión. La Figura 1.18 muestra la respuesta correspondiente de la intensidad de corriente en el espectro de frecuencia. Los picos

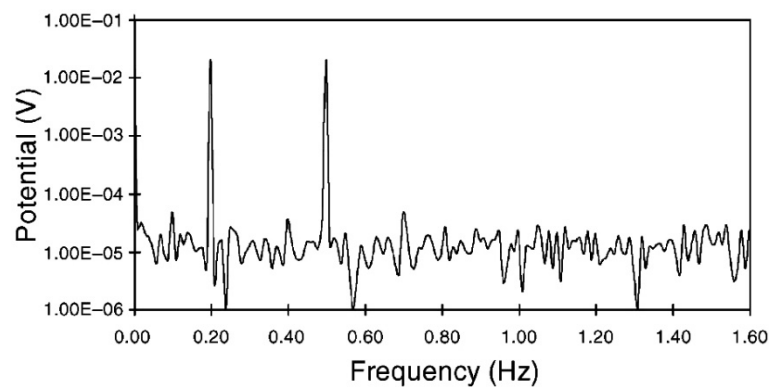
armónicos e intermodulación son claramente visibles y superan considerablemente el ruido de fondo, lo que posibilita su medición para determinar la velocidad de corrosión y los parámetros de Tafel.

Figura 8. Frecuencias armónicas e intermodulación que resultan desde las frecuencias básicas de 2 Hz y 5 Hz.



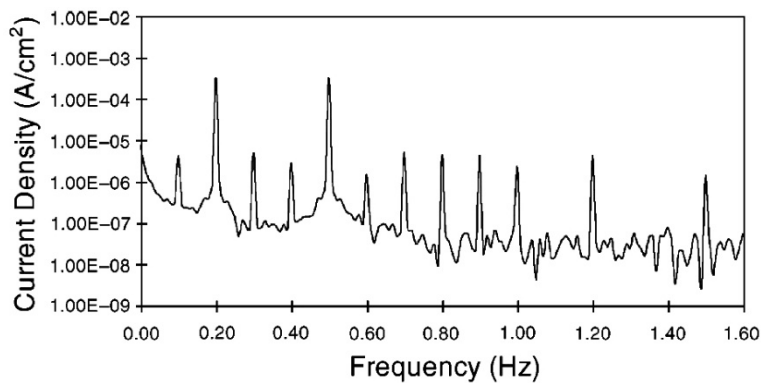
Fuente: [34]

Figura 9. Espectro de frecuencias de la señal de potencial medido para el acero dulce en 0.05 M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al potencial de corrosión.



Fuente: [34]

Figura 10. Espectro de frecuencias de la señal de intensidad de corriente medido para el acero de bajo carbono en 0.05 M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



Fuente: [34]

## b) Técnicas electroquímicas utilizadas en corrosión

Conocido los picos armónicos e intermodulación, el cálculo de los parámetros cinéticos y factores de causalidad se determinan mediante las siguientes fórmulas [34]:

Para un proceso controlado por activación:

$$i_{corr} = \frac{i_{\omega_1, \omega_2}^2}{2\sqrt{8i_{\omega_1, \omega_2}i_{2\omega_2 \pm \omega_1} - 3i_{\omega_2 \pm \omega_1}^2}}$$

$$\beta_a = \frac{i_{\omega_1, \omega_2}U_o}{i_{\omega_2 \pm \omega_1} + \sqrt{8i_{\omega_1, \omega_2}i_{2\omega_2 \pm \omega_1} - 3i_{\omega_2 \pm \omega_1}^2}}$$

$$\beta_c = \frac{i_{\omega_1, \omega_2}U_o}{-i_{\omega_2 \pm \omega_1} + \sqrt{8i_{\omega_1, \omega_2}i_{2\omega_2 \pm \omega_1} - 3i_{\omega_2 \pm \omega_1}^2}}$$

Para un proceso controlado por difusión:

$$i_{corr} = \frac{i_{\omega_1, \omega_2}^2}{2i_{\omega_2 \pm \omega_1}}$$

$$\beta_a = \frac{i_{\omega_1, \omega_2}U_o}{2i_{\omega_2 \pm \omega_1}}$$

Para un proceso controlado por pasivación:

$$i_{corr} = \frac{i_{\omega_1, \omega_2}^2}{2i_{\omega_2 \pm \omega_1}}$$

$$\beta_c = \frac{i_{\omega_1, \omega_2}U_o}{2i_{\omega_2 \pm \omega_1}}$$

Los factores de causalidad (para cualquiera de los casos evaluados anteriormente) esta dado por:

$$\text{Factor de Causalidad (2)} = \frac{i\omega_2 \pm \omega_1}{i_2\omega_1}$$

$$\text{Factor de Causalidad (3)} = \frac{i_2\omega_2 \pm \omega_1}{i_3\omega_1}$$

## Materiales y métodos

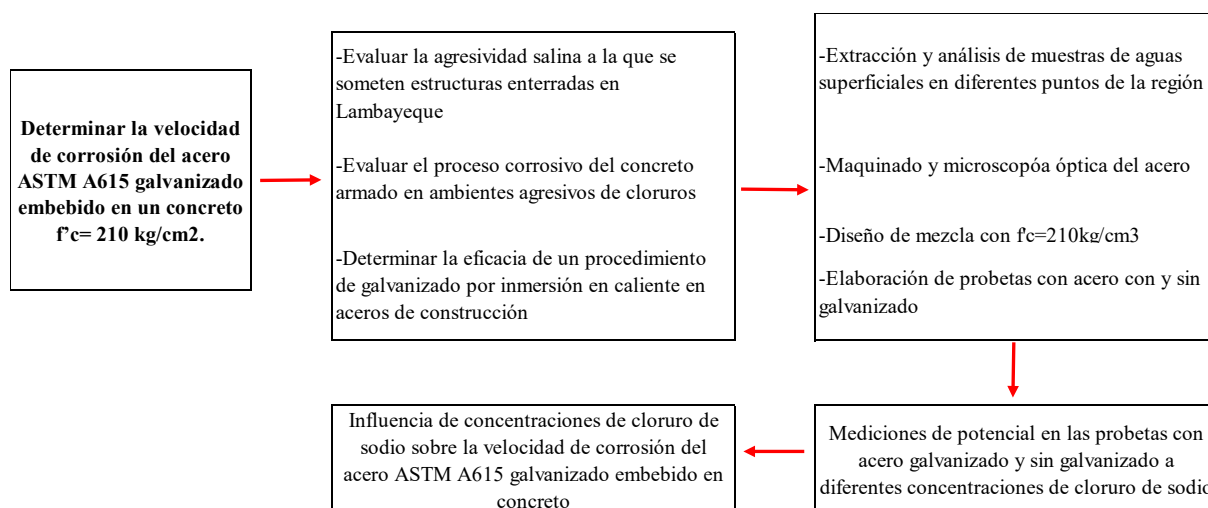
### Tipo y nivel de investigación

La presente investigación corresponde al tipo cuantitativa, debido a que se emplearán ensayos en laboratorio, donde se obtendrán datos numéricos, los cuales se podrán cuantificar de manera confiable sobre la evolución de la corrosión del acero galvanizado. El fin que se persigue en esta investigación es aplicada, puesto que en base a las teorías existentes se va a generar nuevos aportes al sector de construcción nacional, como es el entendimiento de las virtudes de la galvanización de los aceros de refuerzo para extender la vida en las estructuras en la costa peruana.

### Diseño de investigación

Esta investigación es de un tipo experimental-descriptiva, porque busca mediante ensayos de laboratorio, obtener los resultados de la velocidad de corrosión, mediante el método electroquímico de media celda para las probetas de acero embebido en concreto, sumergidas en distintas soluciones atacadas por cloruros de sodio (NaCl) químicamente puro.

#### Gráfico 1 Metodología del diseño



### Población, muestra

Está constituida por el acero corrugado estructural para construcción, específicamente por el acero ASTM A615.

Se trabajará con 42 probetas, las cuales tiene un acero corrugado de 5/8 con medidas especificadas en plano. Donde 24 de ellas tendrán un proceso de galvanizado por inmersión en caliente, y las demás representarán unas condiciones ajustadas a la realidad.

### ***Variables – operacionalización***

#### ***Variables***

##### **2) Variable independiente**

Concentración del cloruro de sodio, en diferentes cantidades.

##### **3) Variable dependiente**

Velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado

##### **4) Variable interviniente**

Cemento portland tipo 1, espesor del galvanizado, dimensiones de probeta, electrodo de referencia, diámetro del acero.

### ***Operacionalización de variables***

*Tabla 1 Operacionalización de variable independiente*

VARIABLE	INDICADOR	RANGO DE APLICACIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÓN
Independiente (x): Concentración de cloruro de sodio	Cantidad de cloruro de sodio	100%	(g/l)	Método de Mohr-NTP 400.042

*Tabla 2 Operacionalización de variable dependiente*

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNID. DE MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÓN
Dependiente(Y): Velocidad de corrosión del acero	ELECTROQUÍMICA	Potencial de corrosión	mV	Método de media celda - ASTM C876

*Tabla 3 Operacionalización de variable interviniente*

VARIABLES INTERVINIENTES	UNID. DE MEDIDA
Tipo de cemento	Tipo I
espesor del galvanizado	157 $\mu$ m
electrodo de referencia	CU/CUSO4
Largo de probeta	30 cm
Diámetro de probeta	15 cm
Largo de acero	37.5 cm
Diámetro de acero	5/8"

### *Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

#### *Material des estudio*

En esta investigación se utilizará el acero ASTM A615 grado 60, barra de construcción más comercial en edificaciones en nuestro país. En este estudio se requerirá un procedimiento de galvanizado al acero, para realizar la comparativa de la evolución de potencial de corrosión.

*Tabla 4 Composición del acero ASTM A615 grado 60*

Material	C	Si	Mn	P	S
Acero ASTM A615 grado 60	0.386%	0.200%	0.929%	0.036%	0.037%

Las dimensiones de las probetas de concreto serán de 15 cm x 30 cm.

En cada probeta se colocó una varilla de acero ASTM A615, con y sin galvanizado dependiendo a que grupo de análisis corresponda, con una longitud de 37.5 cm, estos aceros estarán en el centro de cada probeta, teniendo así un recubrimiento de 7.5 cm por lado, recreando así condiciones ajustadas a la realidad.

*Figura 11. Dimensiones de probetas*

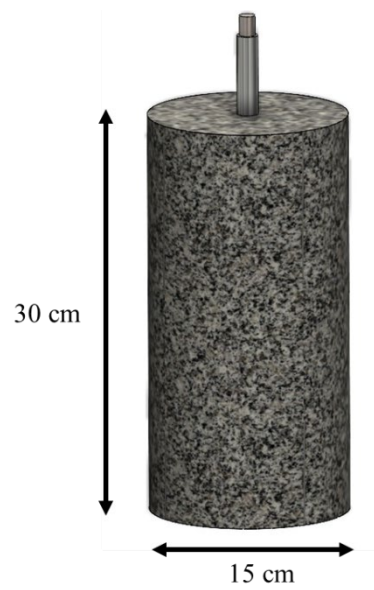


Tabla 5 Reparticiones de dosificaciones de NaCl en recipientes

Clasificación de concentraciones en probetas sin NaCl en su mezcla				
CONDICIÓN DEL ACERO	CONCENTRACIÓN DE NaCl (g/l)	DESCRIPCIÓN	Nombre de Probetas	Nº de Probetas
ACERO SIN GALVANIZAR □	0	Agua potable sin concentración de NaCl	$\hat{Y}_1$	3
			$\hat{Y}_2$	
			$\hat{Y}_3$	
	0.806 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z1	$\hat{Y}_4$	3
			$\hat{Y}_5$	
			$\hat{Y}_6$	
	78.802 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z2	$\hat{Y}_7$	3
			$\hat{Y}_8$	
			$\hat{Y}_9$	
	166.495 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z3	$\hat{Y}_{10}$	3
			$\hat{Y}_{11}$	
			$\hat{Y}_{12}$	
ACERO GALVANIZADO	0	Agua potable sin concentración de NaCl	$\hat{Y}_{13}$	3
			$\hat{Y}_{14}$	
			$\hat{Y}_{15}$	
	0.806 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z1	$\hat{Y}_{16}$	3
			$\hat{Y}_{17}$	
			$\hat{Y}_{18}$	
	78.802 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z2	$\hat{Y}_{19}$	3
			$\hat{Y}_{20}$	
			$\hat{Y}_{21}$	
	166.495 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z3	$\hat{Y}_{22}$	3
			$\hat{Y}_{23}$	
			$\hat{Y}_{24}$	
<b>TOTAL DE PROBETAS</b>				<b>24</b>

Tabla 6. Clasificación de concentraciones en recipientes en probetas con NaCl en su mezcla

Clasificación de concentraciones en probetas con NaCl en su mezcla				
CONDICIÓN DEL ACERO	CONCENTRACIÓN DE NaCl (g/l)	DESCRIPCIÓN	Nombre de Probetas	Nº de Probetas
ACERO SIN GALVANIZAR □	0.806 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z1	X1	3
			X2	
			X3	
	78.802 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z2	X4	3
			X5	
			X6	
	166.495 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z3	X7	3
			X8	
			X9	
ACERO GALVANIZADO	0.806 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z1	X10	3
			X11	
			X12	
	78.802 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z2	X13	3
			X14	
			X15	
	166.495 g/l	Concentración de cloruro de sodio de Z3	X16	3
			X17	
			X18	
<b>TOTAL DE PROBETAS</b>				<b>18</b>

Tabla 7. Dosificaciones de NaCl en probetas "X"

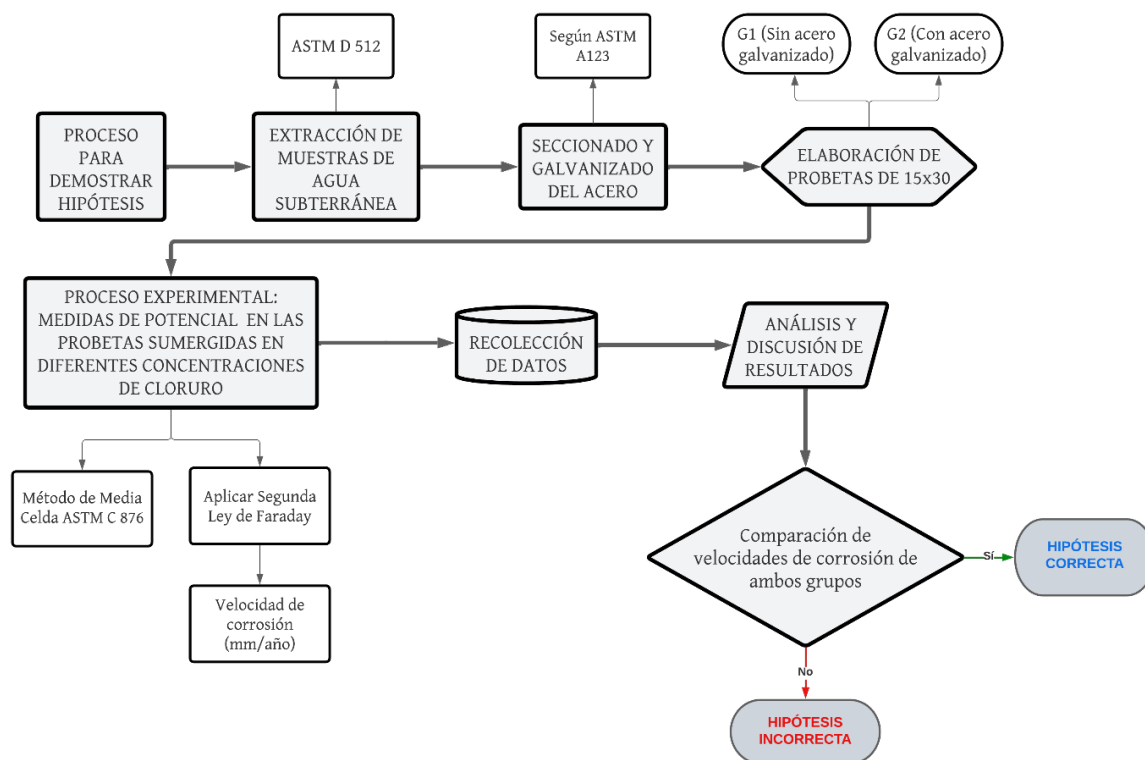
Reparticiones de dosificaciones de NaCl				
Nº de Probetas	Zona	Porcentaje (%)	Peso del cemento (kg)	Cantidad de NaCl en la mezcla (g)
2	----	0.00%	25.36	0.00
2	Z1	2.00%		50.72
2	Z2	5.00%		126.80
4	Z3	10.00%		253.60

*Matriz de consistencia*

INFLUENCIA DE CONCENTRACIONES DE CLORURO DE SODIO SOBRE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO ASTM A615 GALVANIZADO EMBEBIDO EN CONCRETO					
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE	METODOLOGÍA	
	GENERAL	GENERAL	VARIABLES INDEPENDIENTES	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	
¿En qué medida el proceso de galvanizado por inmersión en caliente, protegerá de la corrosión al acero de refuerzo de estructuras expuestas a ambientes agresivos?	Determinar la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .	Si aumentamos la concentración del cloruro de sodio, la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 sin galvanizado aumentará, pero si se le aplica un galvanizado la velocidad disminuirá de manera representativa	Concentraciones de cloruro de sodio	Investigación de tipo experimental-descriptiva	
	ESPECÍFICOS		INDICADORES	TÉCNICA: RECOLECCIÓN DE DATOS	
	Determinar las concentraciones de cloruro de sodio en aguas superficiales, a 5km, 10 km y 15 km con respecto al océano Pacífico mediante excavaciones		Velocidad de corrosión del acero	Cantidad de cloruro de sodio	Las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos fueron:
					-Análisis de documentación: se revisó tesis y artículos de revistas
					-Análisis de agua superficial: se excavó en tres puntos diferentes de Lambayeque para extraer agua superficial
	-Encuestas a especialistas: Se formularon preguntas a profesionales del laboratorio de corrosión de la Universidad Nacional de Trujillo				
	VARIABLE DEPENDIENTE		POBLACIÓN Y MUESTRA		
Mostrar tendencias de los potenciales de corrosión durante 6 meses	Velocidad de corrosión del acero	POTENCIAL DE CORROSIÓN	Está constituida por el acero corrugado estructural para construcción, específicamente por el acero ASTM A615.		
Determinar la velocidad de corrosión de los aceros ASTM A615 mediante ensayo de media celda			Se trabajará con 24 probetas, las cuales tiene un acero corrugado de 5/8 con medidas especificadas en plano.		
Analizar una comparativa entre el potencial de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado con y sin protección de galvanizado por inmersión en caliente			Donde la mitad de ellas tendrán un proceso de galvanizado por inmersión en caliente, y las demás representarán unas condiciones ajustadas a la realidad.		

## Procedimientos

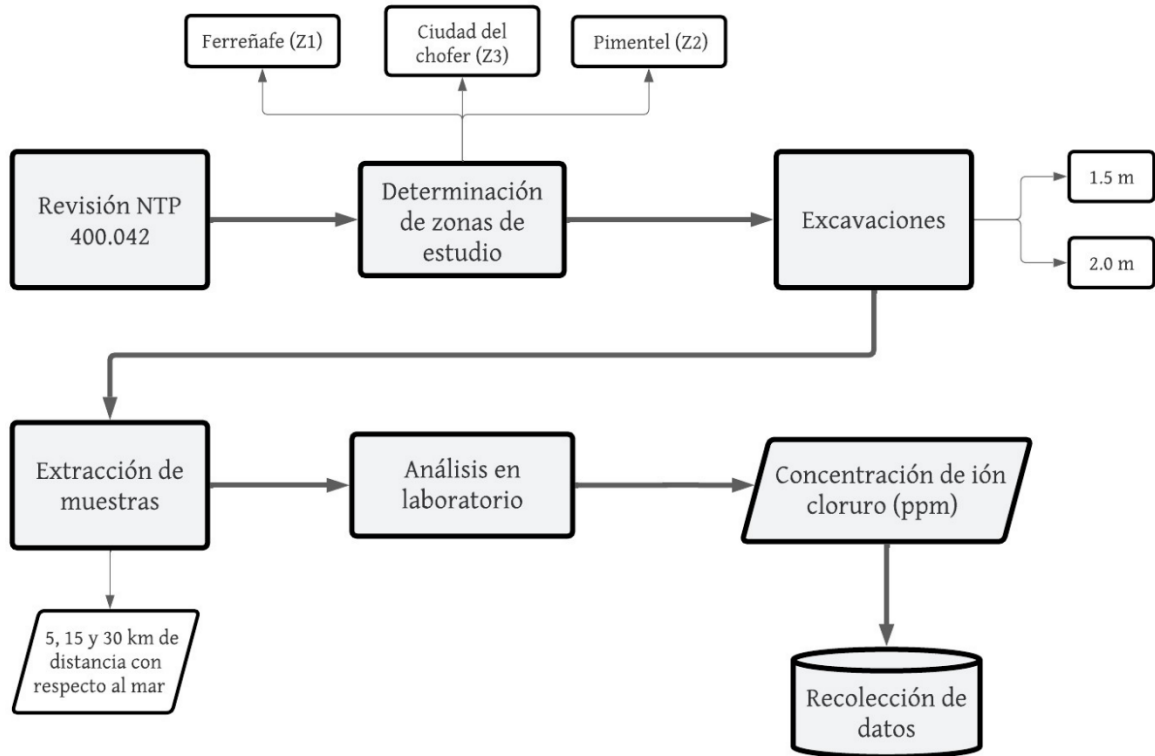
Gráfico 2 Demostración de hipótesis



## Estudios complementarios

Para comprender el fenómeno de la corrosión es necesario obtener datos e información relevante propias del lugar de estudio. Un estudio adicional que se realizó consiste en ver la concentración de cloruro de sodio en aguas superficiales en diferentes ubicaciones, es decir, a diferentes distancias con respecto al mar (5km, 15 km y 30 km). Para hacer obtener datos de concentraciones de cloruro de sodio en aguas superficiales del departamento de Lambayeque. Adquiriendo así datos referenciales con respecto a la concentración de cloruros presentes en esos lugares, donde se priorizarán zonas de expansión urbana, con el fin de que tengan las respectivas precauciones.

Gráfico 3 Proceso de estudio complementario



### Procedimiento de maquinado y galvanizado de probetas de acero

- Obtención del acero ASTM A615, verificando que no tenga alteraciones o defectos físicos.
- Luego se procede al corte del acero, a las medidas especificadas en el plano de cada muestra que se utilizará. En este proceso se tuvo que realizar un viaje hasta la Universidad Nacional de Trujillo, lugar donde se realizó el proceso del maquinado del acero, así como recibir asesorías de los equipos que se ausentan en mi universidad.

*Fotografía 1 Aceros maquinados*



- Posterior a ello, se tuvo que realizar un viaje hasta Lima, para llevarlo a la empresa metalúrgica GALVANOMETAL PERÚ S.A.C. Empresa donde se realizó el proceso del galvanizado por inmersión en caliente según la norma ASTM A-123 VERSIÓN 2015.

*Fotografía 2 Aceros galvanizados*



### *Procedimiento de recubrimiento de aceros*

- Los aceros maquinados, iban a ser colocados en las probetas de concreto, las cuales tendrían que ser curadas, es decir, tendrían que entrar en contacto con el agua, lo cual podría interferir en los resultados esperados. Por ello, se tomó la decisión de proporcionar un recubrimiento con pintura anticorrosiva, exceptuando las zonas de estudio, de modo que el agua ya no sería un agente que pueda interferir de manera significativa en los resultados finales.
- Para el recubrimiento se hizo uso de una brocha para pintar.

*Fotografía 3 Aceros con recubrimiento de pintura en base zincromato industrial*



***Procedimiento de la elaboración de las probetas de concreto con acero sin agua con cloruro de sodio en la mezcla***

- En este proceso se calculó un diseño de mezcla, para un concreto con  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .

*Fotografía 4. Peso de agregado grueso húmedo*



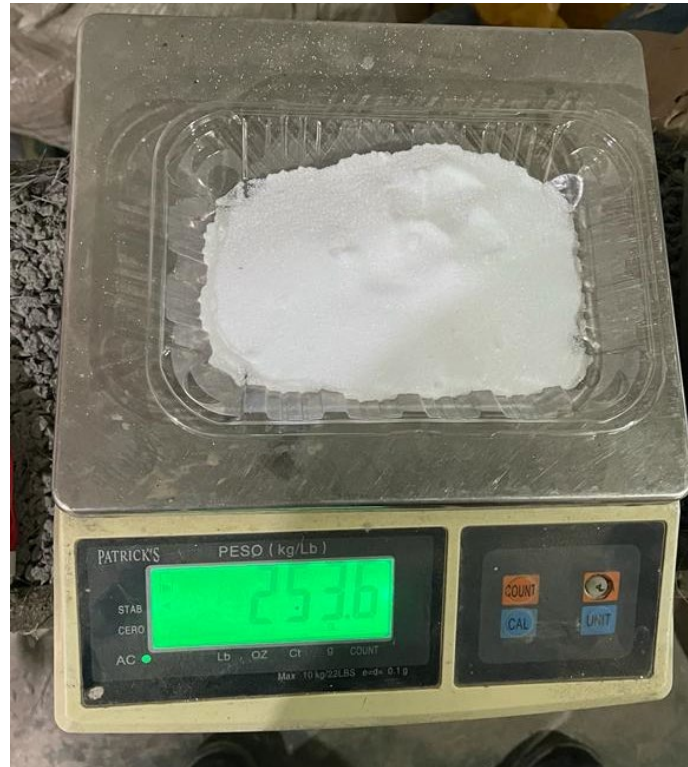
- Posterior a ello, se realizó la obtención de insumos, siendo el agregado grueso de la Cantera La Victoria – Pátapo, el fino de la Cantera Tres Tomas – Ferreñafe y el cemento azul antisalitre PACASMAYO.
- Llegado a este punto, se realizó la mezcla de concreto, y el vaciado.
- Por último, se colocarán los aceros ASTM A615 de 5/8 que han sido maquinados. En cada probeta se utilizará la barra de acero como el electrodo de trabajo, esta se ubicará en el centro, recreando así el escenario.

*Fotografía 5 Elaboración de probetas de concreto y acero*



***Procedimiento de la elaboración de las probetas de concreto con acero con cloruro de sodio en la mezcla***

- Con el objetivo de tener una variedad de resultados en los potenciales de corrosión de los aceros, y basándonos en la investigación “Electrochemical behaviour of steel in mortar and in simulated pore solutions: Analogies and differences”, se elaboraron 10 probetas con diferentes concentraciones de cloruro de sodio en la mezcla.
- Estas probetas de concreto se prepararon con adiciones de cloruro de sodio químicamente puro con un 2, 5 y 10%, con respecto al peso del cemento.



### Curado de probetas

- Se sumergió en agua en las fosas de la USAT durante 28 días.

Fotografía 6 Curado de probetas



## Obtención y análisis de muestras de aguas superficiales

- Mediante calicatas, se extrajeron muestras de aguas superficiales con un radio de 5, 15 y 30 km con respecto al agua del mar. Los puntos en específico fueron Pimentel (a espaldas del colegio Innova Schools), en Chiclayo (Ciudad del Chófer) y Ferreñafe (espaldas del museo Nacional Sicán).

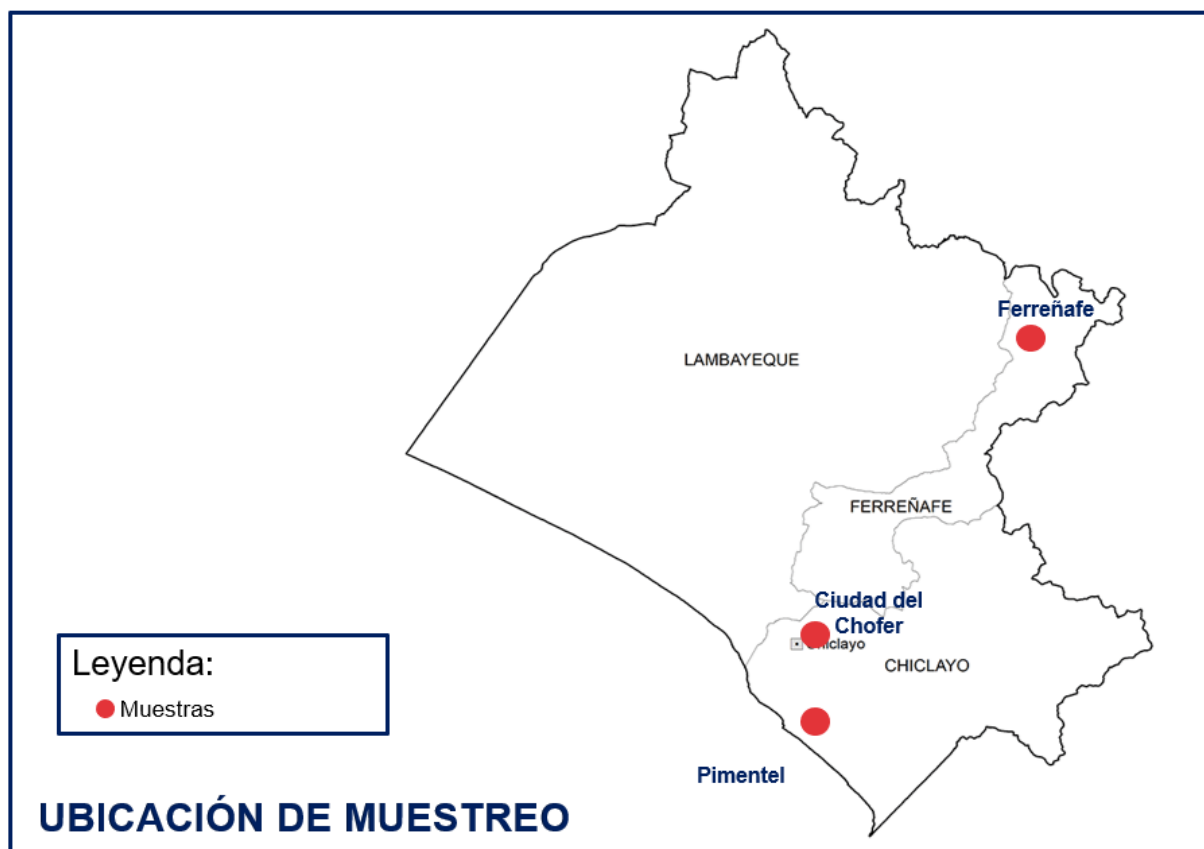
*Fotografía 8 Extracción de muestra de agua superficial en Pimentel*



*Fotografía 7 Extracción de muestra de agua superficial en Ciudad del Chofer*



Figura 12 Ubicación de muestreos



- Las muestras fueron mandadas a laboratorio de degradación de la escuela de ingeniería de materiales de la Universidad Nacional de Trujillo para que sean analizadas y determinen la concentración (ppm) de iones cloruro, iones sulfato y pH. Para ello se usaron equipos que no hay en la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

*Fotografía 9 Análisis de ph de muestra de agua superficial*



### **Inmersión de probetas en ambiente agresivo de cloruro de sodio y medición de potenciales**

- Las probetas fueron sumergidas en contenedores con agua y cloruro de sodio, teniendo como referencia la cantidad de iones cloruro que nos mostraron los previos análisis de muestras. Este acondicionamiento para las probetas asemeja a lo que sucede con las estructuras enterradas en ambientes agresivos con cloruro de sodio.
- En cada grupo (12 probetas por cada uno), se someterán a diferentes concentraciones de NaCl, las cuales se obtendrán de los análisis de aguas superficiales de las zonas escogidas (estudio complementario), donde se obtienen 3 mediciones. Sin embargo, una solución será de pura agua potable. La clasificación de la distribución de las mismas ya está especificado.
- Se harán mediciones con la media celda, donde se obtendrán el amperaje (A) y la densidad de corriente (i). Estas mediciones se harán semanalmente, durante 6 meses, de manera que se obtendrá una lista de mediciones en este tiempo establecido. Lo que se mostrará en gráficos las tendencias que muestran las densidades de corriente y así se evaluará la velocidad de corrosión de los aceros ASTM A615 galvanizados.

- Lo que posteriormente se puede transformar en velocidad de corrosión (mm/año). La velocidad de corrosión obtenida como  $i_{corr}$ , puede ser interpretada por pérdida de peso por unidad de tiempo (mm/año), usando la segunda ley de Faraday:

$$V_{corr} \left[ \frac{mm}{año} \right] = \frac{A}{cm^2} \times \frac{C}{A.s} \times \frac{P.eq.}{96487 C} \times \frac{\left[ \frac{M.A.}{z} \right] g}{P.eq} \times \frac{cm^3}{(\rho)g} \times \frac{10 mm}{1 cm} \times \frac{60 \times 60 \times 24 \times 365 s}{año}$$

Donde:

- M.A., es la masa atómica
  - $\rho$ , es la densidad del metal
  - z, es el número de equivalentes;
  - P.eq. es el peso equivalente.
- Se registró los potenciales eléctricos de media celda con una precisión de 0.01 V. Anotando todos los potenciales de media celda en voltios.

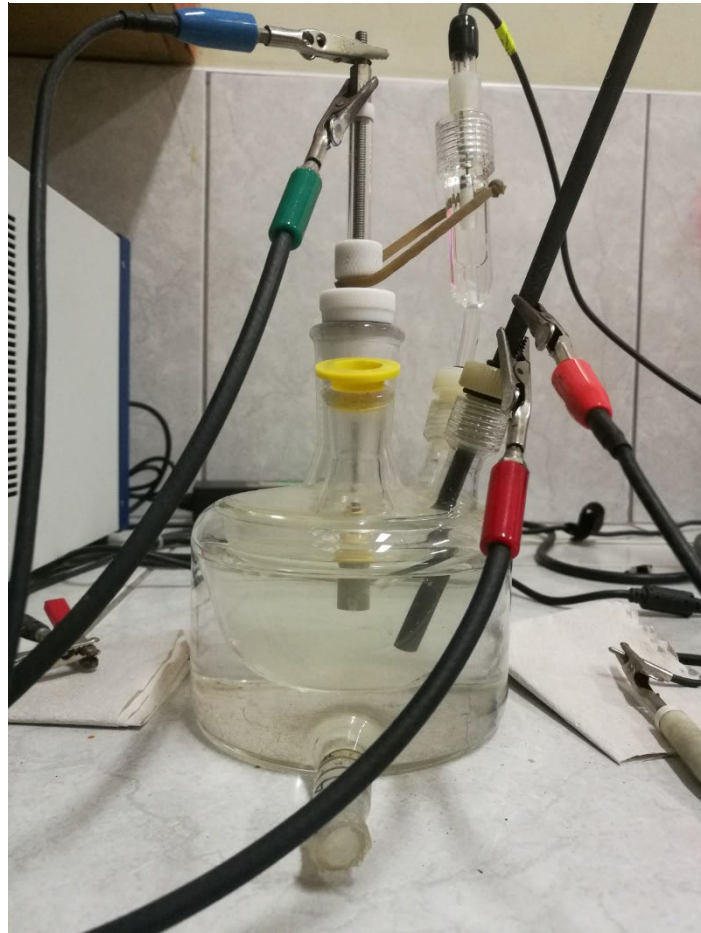
### Soluciones poro concreto

- Se utilizó una bomba de vacío, y se realiza una relación a/c de 0,5. Con ayuda del papel filtro y del matraz, se mezcla dicha relación a/c y se agrega al papel filtro. Para finalmente succionar toda el agua con la bomba de vacío que es lo que necesitamos, quedando solamente el cemento como sedimentos, lo cual se desecha.

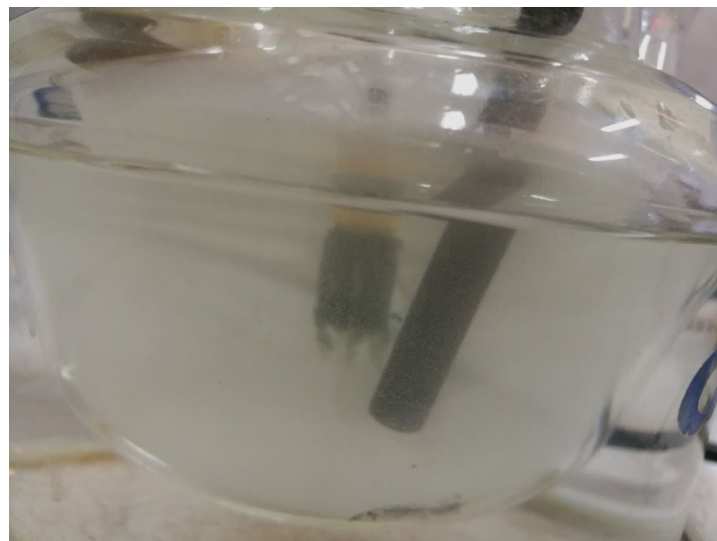
*Fotografía 10. Mezcla de relación a/c de 0.5 ingresando al matraz*



*Fotografía 11. Vista frontal de la celda de tres electrodos*



*Fotografía 12. Solución poro concreto*



## Resultados y discusión

### Resultados

#### Cotización del acero galvanizado

Hoy en día existe la incertidumbre ante el uso de ese sistema de protección a los aceros de refuerzo de nuestras estructuras, y esto es severamente influido por el tema de costos. Por lo cual, he visto necesario hacer un estudio de precios del galvanizado mediante cotizaciones de empresas metalúrgicas, teniendo como precio promedio 0.8 \$/kg, el costo del galvanizado a los aceros de 5/8". Teniendo en cuenta que el acero representa aproximadamente el 25% del costo del concreto, y a la vez el concreto representa el 30% del costo de la obra, entonces el costo del galvanizado se reduce a un 6% del costo de la obra.

Tabla 8 Cotización de acero de construcción

COTIZACIÓN DE UN ACERO CONVENCIONAL (2022)					
ACERO	MARCA	DIÁMETRO	PESO (kg/m)	LONGITUD (m)	COSTO(S/.)
Barra de construcción ASTM A615 Grado 60	Aceros Arequipa	5/8"	1.552	9	68.95

Tabla 9 Equivalencia de precio acero y concreto

EQUIVALENCIA DE PRECIOS			
GALVANIZADO EN ACERO	ACERO EN CONCRETO	CONCRETO EN OBRA	GALVANIZADO EN TOTAL
62.88%	25.00%	35.00%	5.50%

Tabla 10 Cotización de acero de construcción galvanizado

COTIZACIÓN DE ACERO GALVANIZADO (2022)					
COSTO DEL GALVANIZADO (\$/kg)	PESO DE UNA BARRA DE ACERO (5/8")	COSTO (\$)	COSTO (S/.)	COSTO TOTAL	AUMENTO DE COSTO DEL ACERO
0.8 + igv	13.97	11.17	43.36	112.31	62.88%

**Diseño de mezcla**

Tabla 11 Resumen de diseño de mezcla

<b>DISEÑO DE MEZCLA FINAL</b>		<b>F'c =</b>	<b>210 kg/cm<sup>2</sup></b>
Resultados del diseño de mezcla :			
Asentamiento obtenido	:		4 Pulgadas
Peso unitario del concreto fresco	:		2362 Kg/m <sup>3</sup>
Resistencia promedio a los 3 días	:		109 Kg/cm <sup>2</sup>
Porcentaje promedio a los 3 días	:		52 %
Resistencia promedio a los 7 días	:		172 Kg/cm <sup>2</sup>
Porcentaje promedio a los 7 días	:		82.1 %
Factor cemento por M3 de concreto	:		8.9 bolsas/m <sup>3</sup>
Relación agua cemento de diseño	:		0.6

Tabla 12 Cantidad de materiales por m<sup>3</sup>

<b>CANTIDAD DE MATERIALES POR METRO CÚBICO</b>		
Cemento	378 Kg/m <sup>3</sup>	: Cemento Tipo I
Agua	255 L	: Agua Potable de la Zona.
Agregado fino	785 Kg/m <sup>3</sup>	: Cantera La Victoria - Pátapo
Agregado grueso	944 Kg/m <sup>3</sup>	: Cantera Tres Tomas - Ferreñafe

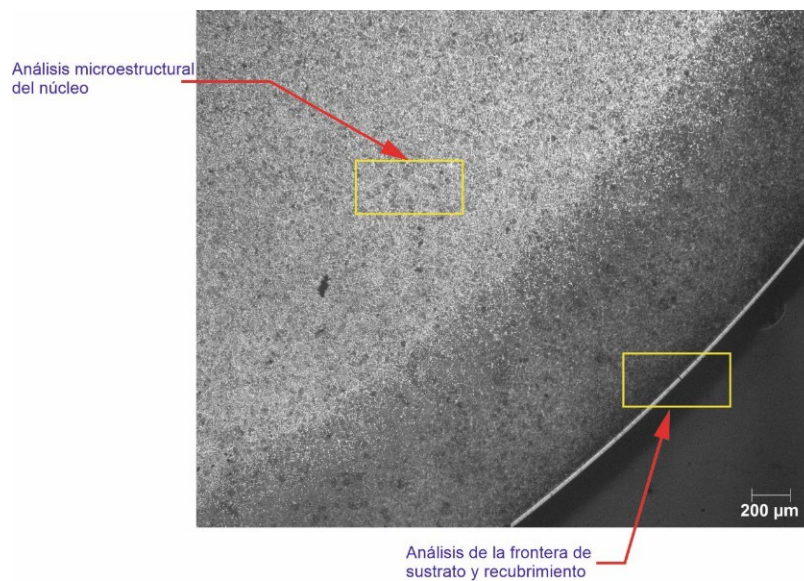
Tabla 13 Dosificación del diseño de mezcla

<b>DOSIFICACIÓN</b>					
	Cemento	Arena	Piedra	Agua	
Proporción en peso :	1	2.08	2.50	28.6	Lts/pie <sup>3</sup>
Proporción en volumen :	1	2.14	2.66	28.6	Lts/pie <sup>3</sup>

### ***Metalografía del acero***

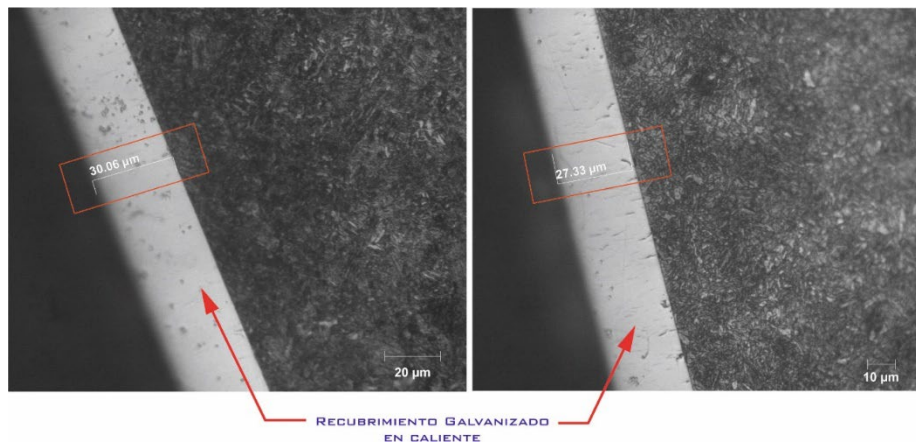
Se realizó análisis metalográfico al acero ASTM A615 grado 60 con un diámetro exterior de 5/8 de pulgada. Se aprecia la microestructura del acero con recubrimiento de zinc en caliente. Ver fotografía 13.

*Fotografía 13. Fotomicrografía de la microestructura del acero ASTM A615 grado 60, del núcleo y superficie galvanizada.*



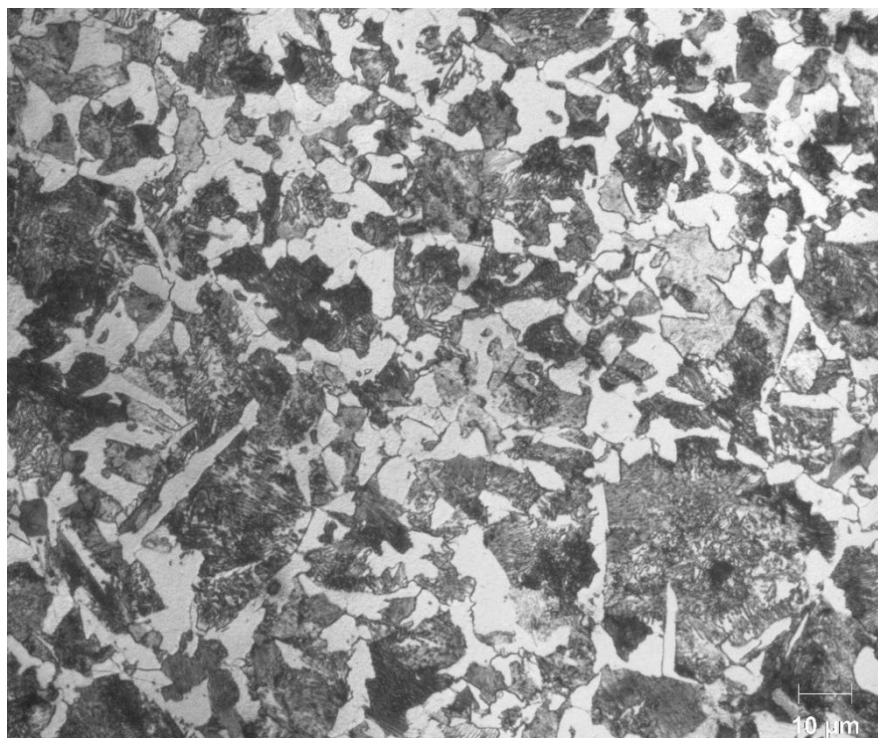
Se realizó el galvanizado por inmersión en caliente como protección anódica ya que este proceso consiste en depositar una capa en micrómetro de zinc en la superficie del sustrato (Acero A615). Terminado el proceso, se formaron varias capas superficiales de aleación zinc-ferro las cuales son más duras que la base de acero y tienen un contenido de zinc cada vez mayor a medida que se aproximan a la superficie del recubrimiento. Realizada la obtención de Fotomicrografía de la microestructura del recubrimiento se aprecia un recubrimiento con promedio de 28.695. Ver fotografía 14.

*Fotografía 14. Fotomicrografía de la microestructura del recubrimiento de galvanizado sobre el acero ASTM A615 grado 60, con espesores de 30.06  $\mu\text{m}$  y 27.33  $\mu\text{m}$ .*



La microestructura para revelar fue con nital al 3% por 30 segundos donde se puede observar una matriz de ferrita (color blando) y perlita (tonalidad oscura). La combinación de estas le da las propiedades características al acero de construcción, ver la fotografía 15.

*Fotografía 15. Fotomicrografía de la microestructura en estado de suministro del acero ASTM A615 grado 60, donde se aprecia la microestructura con un objetivo de 100x la matriz perlita y ferrita.*



### *Análisis de muestras de agua*

Se realizó un análisis de una serie de muestras, entre ellas de aguas superficiales y aguas de pozo con el objetivo de comparar las diferentes concentraciones de cloruros, sulfatos y ph. Teniendo en cuenta que se usaron como valores referenciales solamente la concentración de iones cloruro de las muestras de aguas superficiales.

#### **Análisis 1:**

*Tabla 14 Determinación de concentración de iones cloruro de muestras líquidas de análisis 1*

Nº	MUESTRA	Código de muestras replicas	Concentración de iones cloruro de muestras replicas (ppm)	Concentración promedio de iones cloruro por muestras (ppm)
1	Sector San Francisco - Carretera a Pomalca - Pozo tubular	a	446.83	<b>452</b>
		b	455.77	
		c	452.79	
2	Terminal Gacelo Pozo	a	339.59	<b>342</b>
		b	345.55	
		c	341.08	
3	Calicata Pimentel - I	a	72415.77	<b>71929</b>
		b	70467.37	
		c	72902.87	
4	Calicata Pimentel - II	a	78910.46	<b>78802</b>
		b	79559.93	
		c	77936.26	

Tabla 15 Determinación de concentración de iones sulfato de muestras líquidas de análisis 1

Nº	Muestra	Alicuota de muestra (ml)	Volumen de muestra aforada (ml)	ABS	Concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ en la muestra aforada (ppm)	Concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ en la muestra suministrada (ppm)	Concentración promedio de $\text{SO}_4^{2-}$ (ppm)
1	Sector San Francisco - Carretera a Pomalca - Pozo tubular	10	100	0.2273	33.5441	335	<b>341</b>
		10	100	0.2303	33.9852	340	
		10	100	0.2353	34.7205	347	
2	Terminal Gacelo Pozo	10	100	0.2143	31.6323	316	<b>324</b>
		10	100	0.2213	32.6617	327	
		10	100	0.2223	32.8088	328	
3	Calicata Pimentel - I	0.2	100	0.069	10.3088	5154	<b>5277</b>
		0.2	100	0.072	10.7500	5375	
		0.2	100	0.071	10.6029	5301	
4	Calicata Pimentel - II	0.2	100	0.087	12.9558	6478	<b>6551</b>
		0.2	100	0.089	13.2500	6625	
		0.2	100	0.088	13.1029	6551	

Tabla 16 Determinación del pH de muestras líquidas de análisis 1

Nº	MUESTRA	pH
1	Sector San Francisco - Carretera a Pomalca - Pozo tubular	<b>7.33</b>
2	Terminal Gacelo Pozo	<b>7.34</b>
3	Calicata Pimentel - I	<b>8.30</b>
4	Calicata Pimentel - II	<b>8.25</b>

**Análisis 2:***Tabla 17 Determinación de concentración de iones cloruro de muestras líquidas de análisis 2*

Nº	MUESTRA	Código de muestras replicas	Concentración de iones cloruro de muestras replicas (ppm)	Concentración promedio de iones cloruro por muestras (ppm)
2	Ferreñafe	a	559.18	<b>546</b>
		b	535.55	
		c	543.43	
3	USAT	a	165391.98	<b>166495</b>
		b	167282.17	
		c	166809.62	
4	Ferreñafe	a	795.46	<b>806</b>
		b	819.08	
		c	803.33	

*Tabla 18 terminación de concentración de iones sulfato de muestras líquidas de análisis 2*

Nº	Muestra	Código	Volumen de Alícuota muestra (mL)	Volumen de aforo (mL)	ABS	Concentración de SO <sub>4</sub> en la muestra aforada (ppm)	Concentración de la muestra suministrada (ppm)	Concentración promedio (ppm)
1	Ferreñafe	a	10	100	0.1630	24.09	240.90	<b>240</b>
		b	10	100	0.1650	24.39	243.88	
		c	10	100	0.1600	23.64	236.42	
2	USAT	a	2	100	0.2140	31.70	1585.07	<b>1588</b>
		b	2	100	0.2170	32.15	1607.46	
		c	2	100	0.2120	31.40	1570.15	
3	Ferreñafe	a	10	100	0.1650	24.39	243.88	<b>246</b>
		b	10	100	0.1680	24.84	248.36	
		c	10	100	0.1660	24.54	245.37	

*Tabla 19 Determinación del pH de muestras líquidas de análisis 2*

N°	MUESTRA	pH
1	Ferreñafe	7.29
2	USAT	6.65
3	Ferreñafe	7.75

### ***Ensayos de media celda***

Se realizaron las mediciones de potencial del acero embebido en concreto sumergido en agua con 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l de cloruro de sodio. Las mediciones se realizaron con un multímetro para medir el voltaje (V) y el amperaje (A), y con un electrodo de referencia Cu/CuSO<sub>4</sub>, obteniendo las mediciones de potencial de corrosión por aproximadamente 5 meses. Se puede apreciar en las gráficas una disminución del potencial en acero sin y con protección, también se puede apreciar que el acero galvanizado presenta un cambio de potencial de corrosión no muy variable.

*Gráfico 4. Gráfica de E<sub>corr</sub> sin NaCl con relación a/c = 0.60*

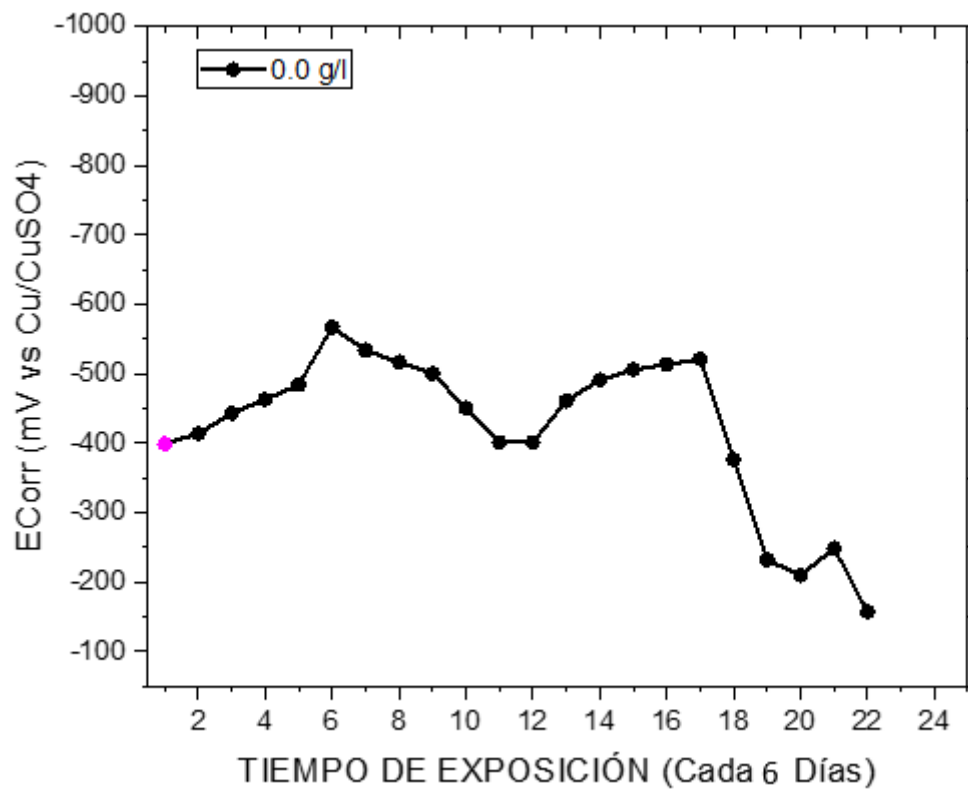
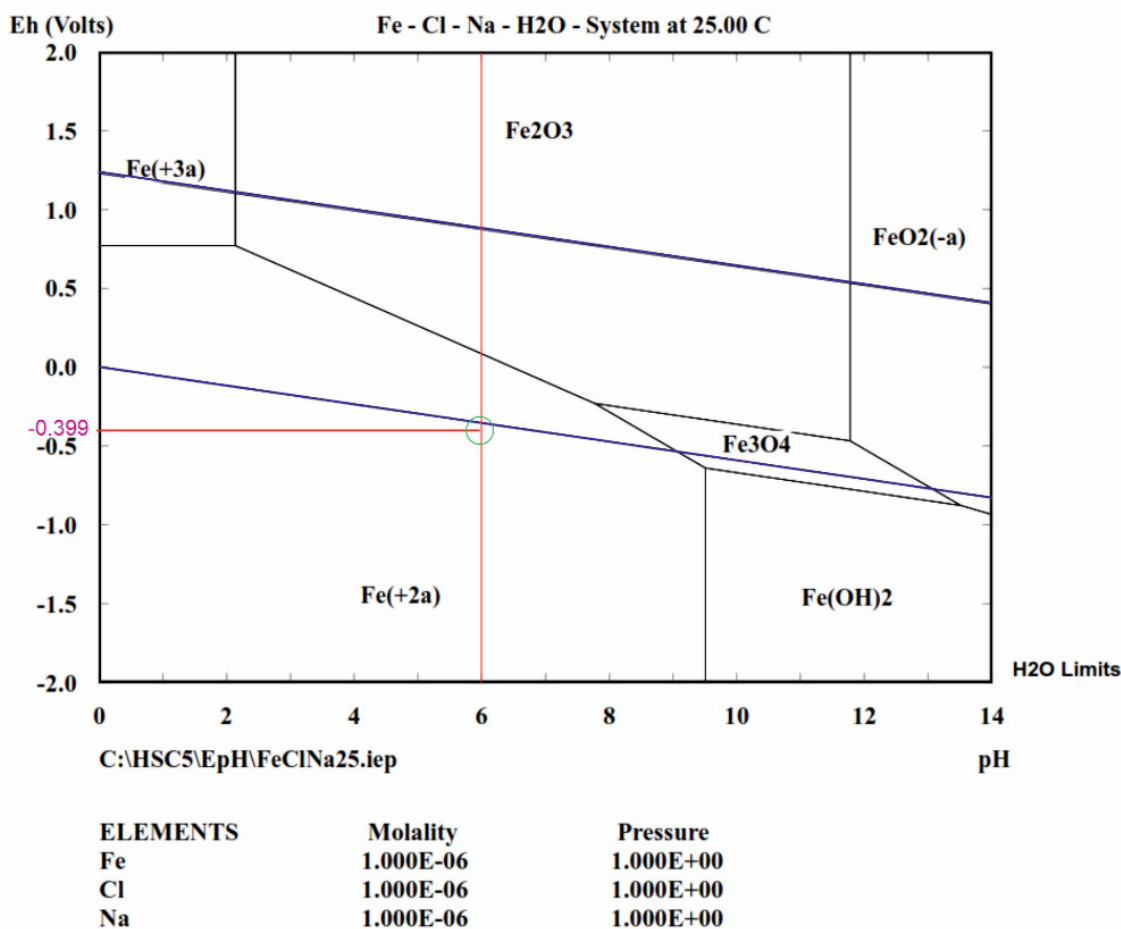


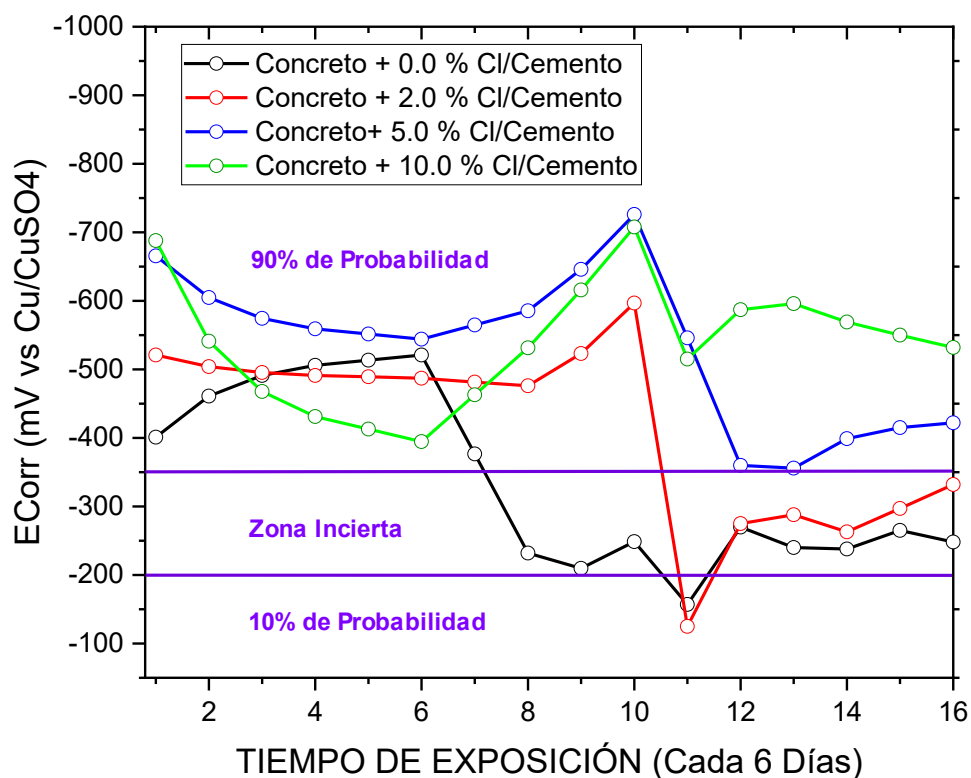
Gráfico 5. Gráfica de pourbaix del acero ASTM A615 con localización inicial de Ecorr medio acuoso sin NaCl.



En la figura donde la norma ASTM C876 indica que si los potenciales son más negativos que  $E_{corr} = -0.350 \text{ mV V CSE}$ , existe una probabilidad superior al 90 % que la corrosión del acero embebido en concreto se produzca, esto no significa que el acero se está corroyendo en estas condiciones se afirma que el medio en el que se encuentra terminara siendo perjudicial para el acero embebido. Los aceros con concentraciones 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. presentan una probabilidad superior al 90 %, además que las concentraciones de 78.802 g/l y 166.495 g/l tienen un potencial de corrosion mas bajo esto debido a la alta concentracion de cloruro de sodio en la soluciones donde fueron sumergidas los especimenes, en el día 80 se puede observar un potencial mas negativo lo cual el proceso corrosivo es mucho mas rapido. También con las concentraciones de 0.0 g/l, un potencial que no sobrepasa los -0.567 mV, y en el día 68 tiende a un potencial menos negativo. Esto significa que sin NaCl el proceso corrosivo es lento y en el caso de 0.806 g/l un potencial que no sobrepasa los -0.518 mV y en el día 80 tiende a un

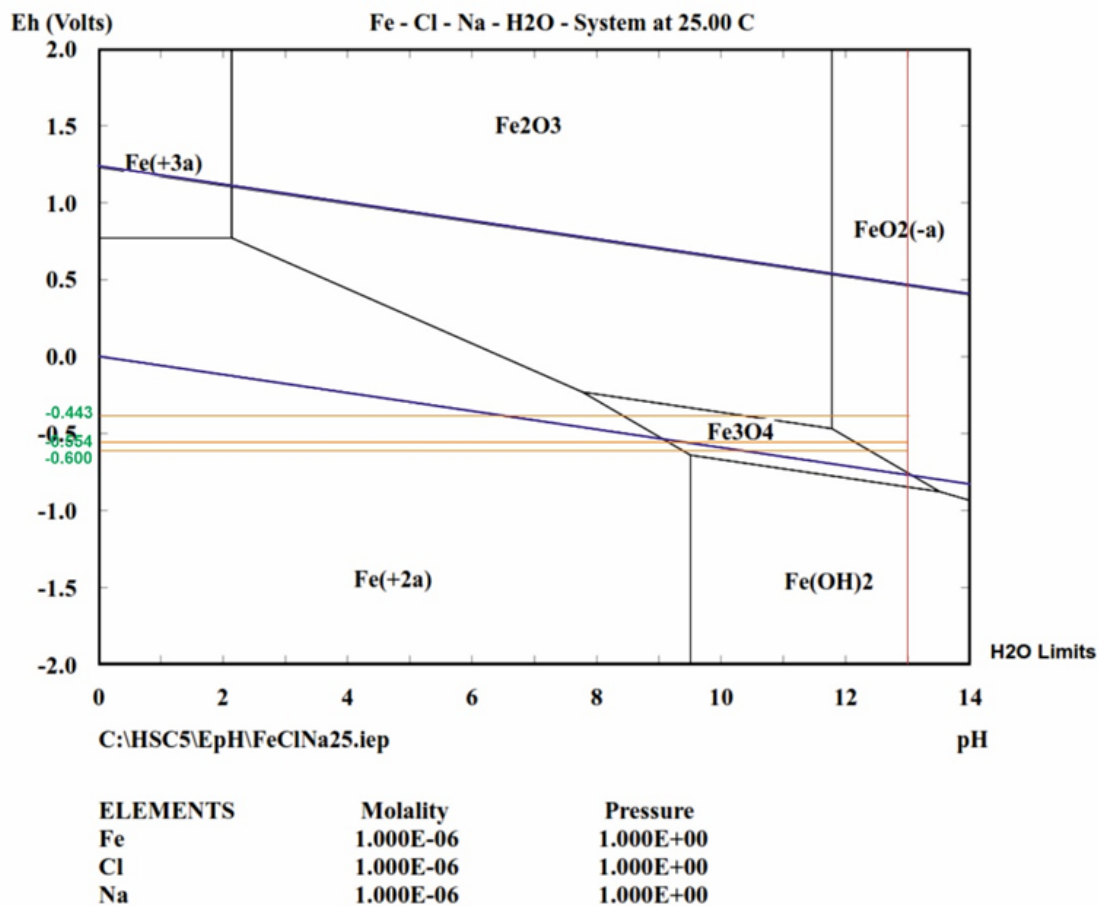
potencial mas negativo (ver gráfico 6). Podemos inferir que todas se encuentran en la zona de pasivación debido a la poca concentración de cloruros en la superficie del metal.

Gráfico 6. Gráfica de  $E_{corr}$  en concentraciones de NaCl de 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. y relación a/c = 0.60



La explicación a que el proceso corrosivo al inicio de los ensayos no está en un pH de 4 a 10 en la superficie del acero se origina una pequeña capa de óxido ferroso poroso débilmente adherido que protege al acero. La corrosión está controlada por difusión de oxígeno, en nuestros ensayos las concentraciones de oxígeno son muy bajas ya que el acero se encuentra embebido. El concreto tiene un pH de 12 a 13, lo que es un medio altamente alcalino, por consiguiente, se origina una disminución en la velocidad de corrosión debido a la formación de una capa pasiva de óxido férrico en presencia de oxígeno, lo cual protege al acero de refuerzo embebido contra la corrosión. Se requieren aproximadamente de 7,000 ppm a 8,000 ppm de cloruros para iniciar el proceso la corrosivo del acero embebido. De lo antes comentado se puede apreciar en la gráfica de Pourbaix.

Gráfico 7. Gráfica de pourbaix del acero ASTM A615 con localización inicial de  $E_{corr}$  concentraciones de NaCl de 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l.



### Ensayos de media celda para acero galvanizado

En una lectura realizando mediciones cada 6 días en la gráfica sin concentración de cloruro de sodio (0.0 g/l), se puede observar el potencial de inicio de ensayos de medición electroquímica con  $E_{corr} = -0.650$  mV. Además, podemos verificar la ubicación del potencial en el diagrama de Pourbaix, pues este potencial con un pH cercano a 6 se aprecia que está en una zona de pasivación con un desplazamiento mucho mayor que el acero sin galvanizar.

Gráfico 8. Gráfica de Ecorr sin NaCl con relación a/c = 0.60

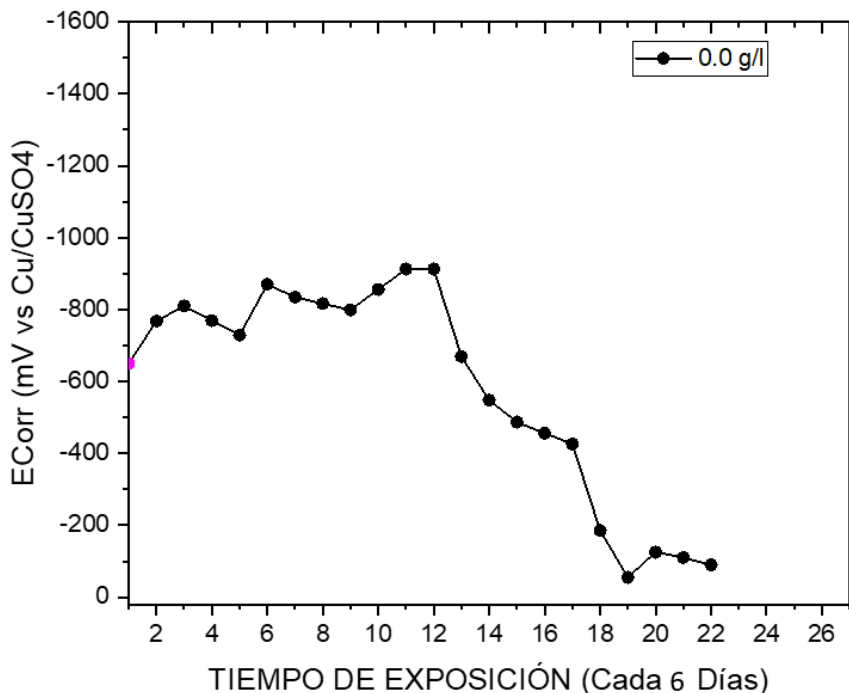
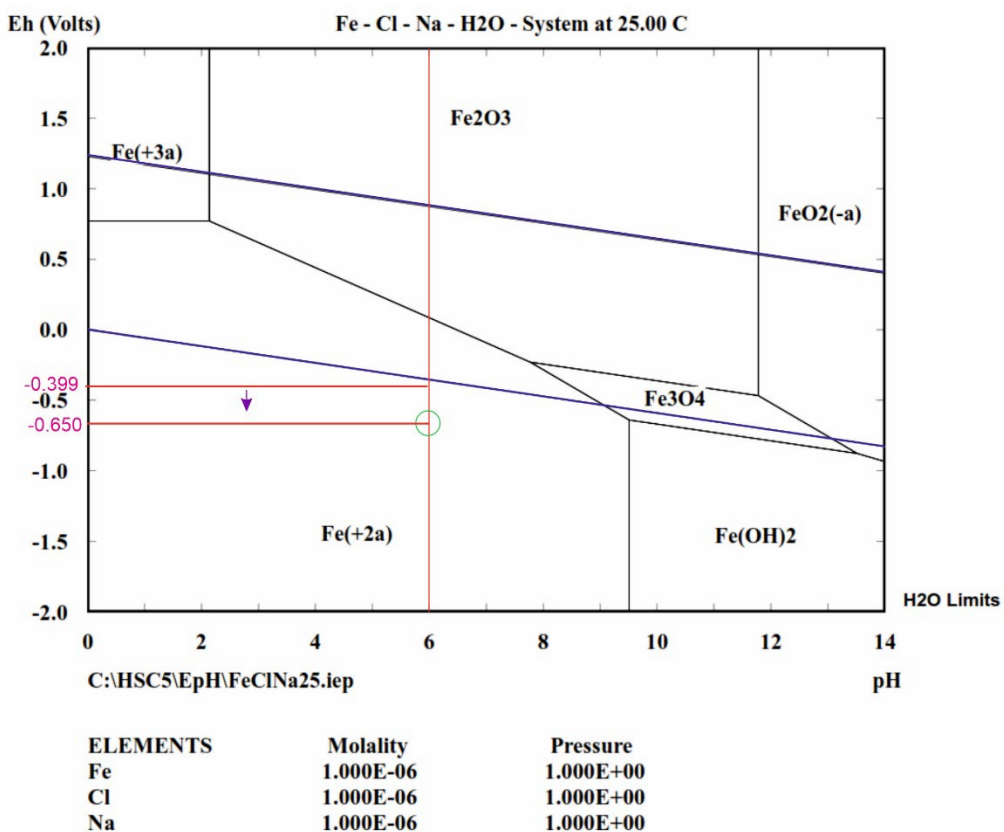
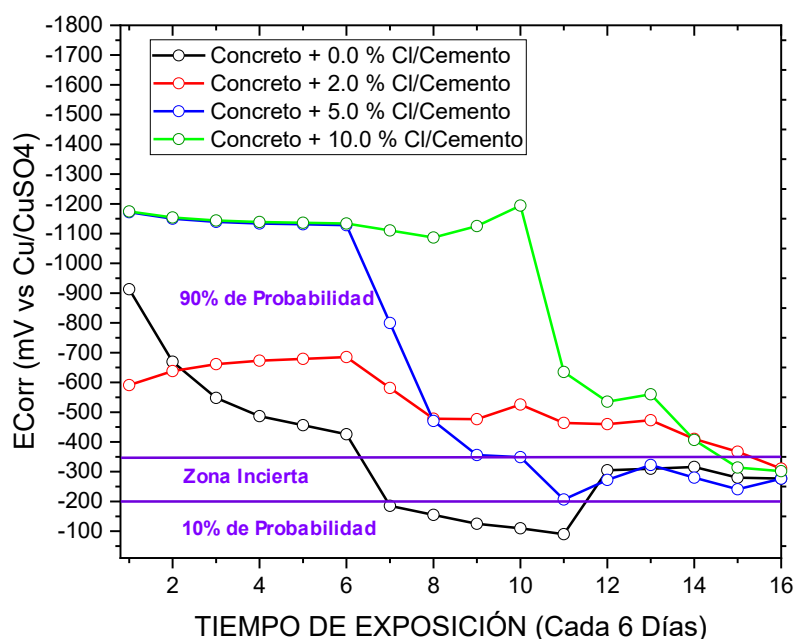


Gráfico 9. Gráfica de pourbaix del acero ASTM A615 galvanizado con localización inicial de Ecorr medio acuoso sin NaCl.



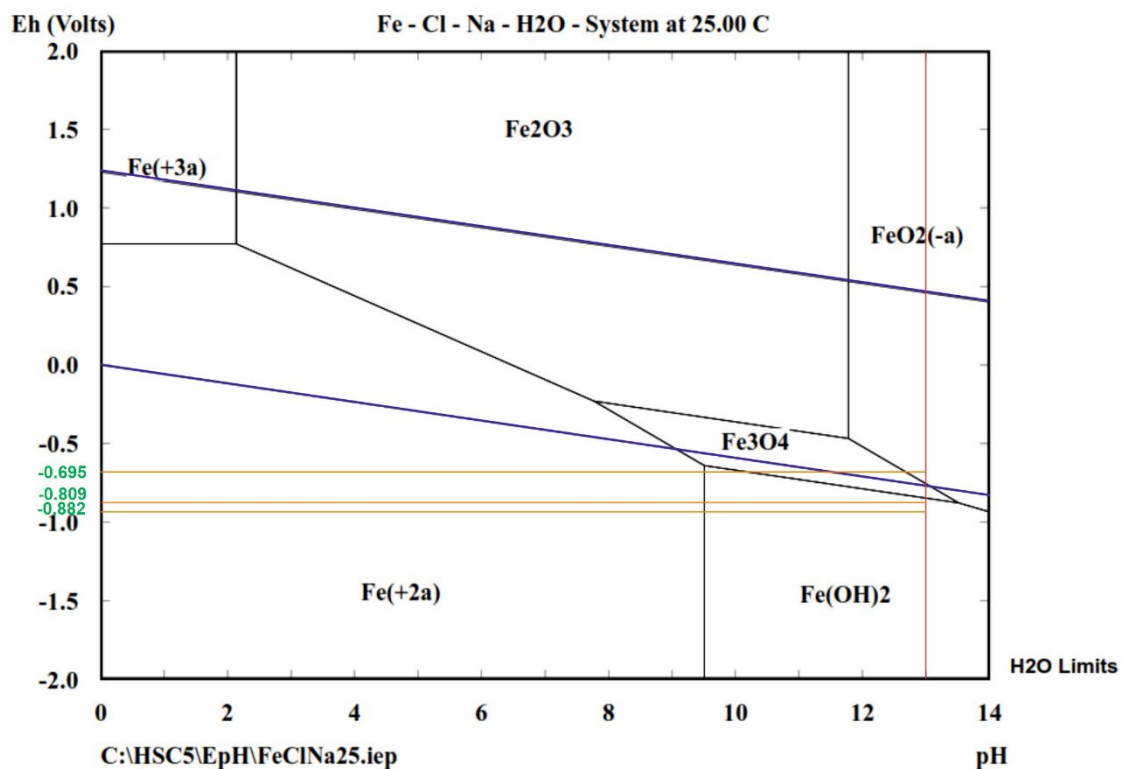
En la figura donde la norma ASTM C876 indica que si los potenciales son más negativos que  $E_{corr} = -0.650 \text{ mV vs CSE}$ , existe una probabilidad superior al 90 % que la corrosión del acero embebido en concreto se produzca, pero esto no significa que el acero se está corroyendo en estas condiciones, sino que se afirma que el medio en el que se encuentra terminara siendo perjudicial para el acero embebido. Los aceros con concentraciones 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. presentan una probabilidad superior al 90 %, además que las concentraciones de 78.802 g/l y 166.495 g/l tienen un potencial de corrosión más bajo esto debido a la alta concentración de cloruro de sodio en la soluciones donde fueron sumergidas los especímenes. En el día 68 se puede observar un potencial más negativo, por lo cual el proceso corrosivo es mucho más rapido. Tambien con las concentraciones de 0.0 g/l un potencial que no sobrepasa los  $-0.900 \text{ mV}$  y en el día 52 tiende a un potencial menos negativo. Esto significa que sin NaCl el proceso corrosivo es lento y 0.806 g/l. un potencial que no sobrepasa los  $-0.1000 \text{ mV}$  y en el día 52 tiende a un potencial menos negativo. Podemos inferir que todas se encuentran en la zona de pasivación debido que el recubrimiento de zinc es un metal más activo por lo tanto tiene potenciales más negativos y la poca concentración de cloruros en la superficie del metal.

Gráfico 10. Gráfica de  $E_{corr}$  en concentraciones de NaCl de 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. y relación a/c = 0.60



El concreto tiene un pH muy alcalino, alrededor de 12 a 13, lo que resulta en una menor velocidad de corrosión. Esto se debe a la formación de una capa protectora de óxido férrico en presencia de oxígeno, que actúa como una defensa contra la corrosión para el acero de refuerzo dentro del concreto. Además, el revestimiento de zinc hace que el acero pase a la región pasivada, aumentando aún más su resistencia a la corrosión. De lo antes comentado se puede apreciar en la gráfica de Pourbaix (ver gráfico 11).

Gráfico 11. Gráfica de pourbaix del acero ASTM A615 galvanizado con localización inicial de Ecorr concentraciones de NaCl de 0.0 g/l, 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l.



### **Aceleración la corrosión del acero en el concreto**

La entrada de iones de cloruro es un proceso complejo que implica la interacción de factores materiales (contenido y tipo de cemento, porosidad, etc.) y factores ambientales (temperatura, humedad relativa, etc.) que influyen en los diferentes procesos físicos y químicos implicados en la entrada de cloruro. [35] [36]

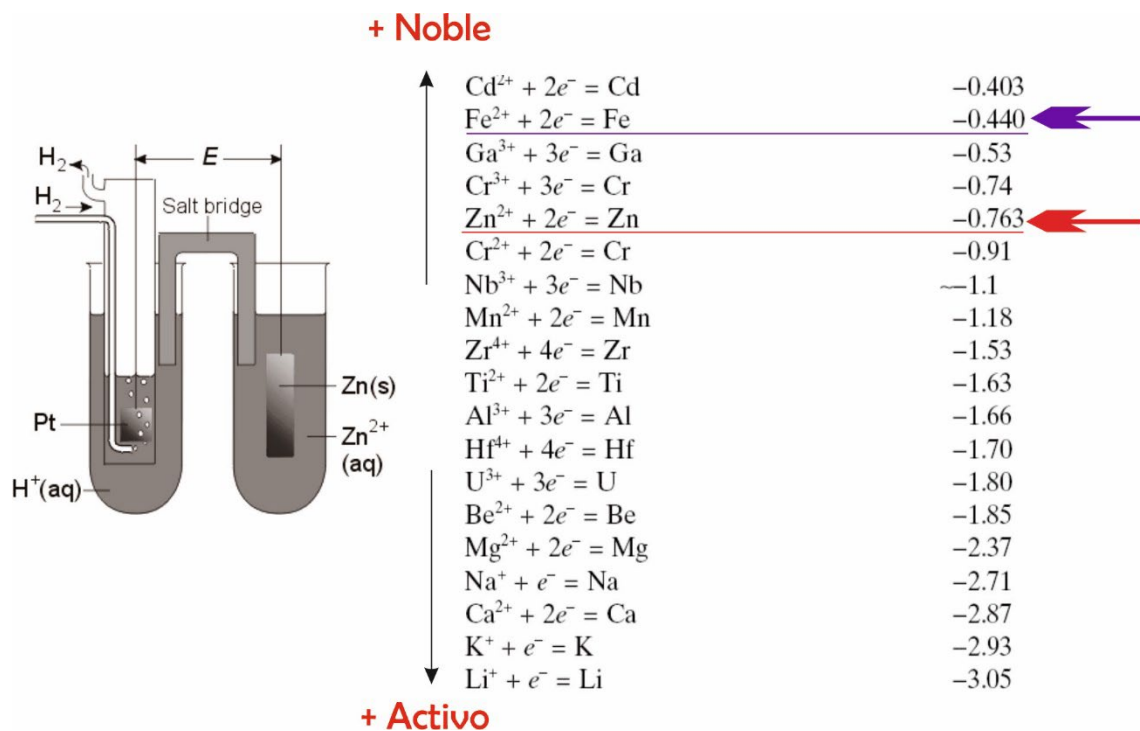
En la realidad, la infiltración de cloruros en el concreto reforzado es un proceso que se desarrolla durante un largo período de tiempo. Esto implica que el concreto tiene la oportunidad de madurar y que el acero tiene tiempo para adaptarse al entorno alcalino antes de que los cloruros alcancen al acero y comience el proceso de corrosión. Sin embargo, en el caso de experimentos de laboratorio, esperar varios años para obtener resultados no es una opción práctica [13].

El método más común para acelerar la corrosión del acero en el concreto es contaminar el concreto con cloruro al momento de mezclarlo. Este es un método completamente aceptable, por ejemplo, para determinar los límites máximos permitidos de cloruros en componentes de hormigón, etc. En este caso, Duffó nos menciona que la principal conclusión es que las soluciones poro concreto (SPS) con cloruros en su mezcla, no es completamente representativo del comportamiento del acero en el mortero. Sin embargo, los resultados que se han ido obteniendo al usar las soluciones de 0, 0.5, 1, 2, 5 y 10 % para evaluar la resistencia a la corrosión del acero en el concreto, son conservadores y, por lo tanto, útiles [25].

### **Ensayos de media celda para acero sin galvanizar**

La medición de los ensayos fue cada 6 días para evitar interrumpir el proceso de difusión de los iones cloruro en condiciones sumergidas en solución acuosa con cloruro de sodio. La orden galvánica indica que un par metálico se define un metal activo y otro noble, el metal más activo se comporta como ánodo, por lo tanto, que el metal más noble se comporta como cátodo. Se define entonces que el metal más activo es el zinc y el metal noble es el acero A615. La diferencia de los potenciales se puede apreciar en los potenciales establecidos en voltios en la figura 9.

Figura 13. Potencial de metales con tendencia más noble en hacia la parte superior y con tendencia más activa hacia la parte inferior.



Según norma ASTM C876 indica que si los potenciales son más negativos que  $E_{\text{corr}} = -0.350$  mV V CSE, existe una probabilidad superior al 90 % que la corrosión del acero embebido en concreto se produzca, esto no significa que el acero se está corroyendo en estas condiciones, sino que el medio en el que se encuentra terminara siendo perjudicial para el acero embebido. Los aceros con concentraciones 2.0%, 5.0 % y 10.0 % de NaCl en su diseño de mezcla, del día 1 al día 40 presentan un 90% de probabilidad. Se aprecia que en el día 44 presentan una caída de potencial negativo a uno más positivo el cual indica que se ha creado una primera capa pasivada (ver gráfico 12). El pH del medio es un factor importante, se puede apreciar que el pH medido es 13 el cual podemos inferir que existe una capa pasivada generada por una corrosión de la superficie del recubrimiento.

Gráfico 12. Gráfica de Ecorr en % NaCl de 2.0% y 5.0 %, 10.0 % respecto al peso de cemento

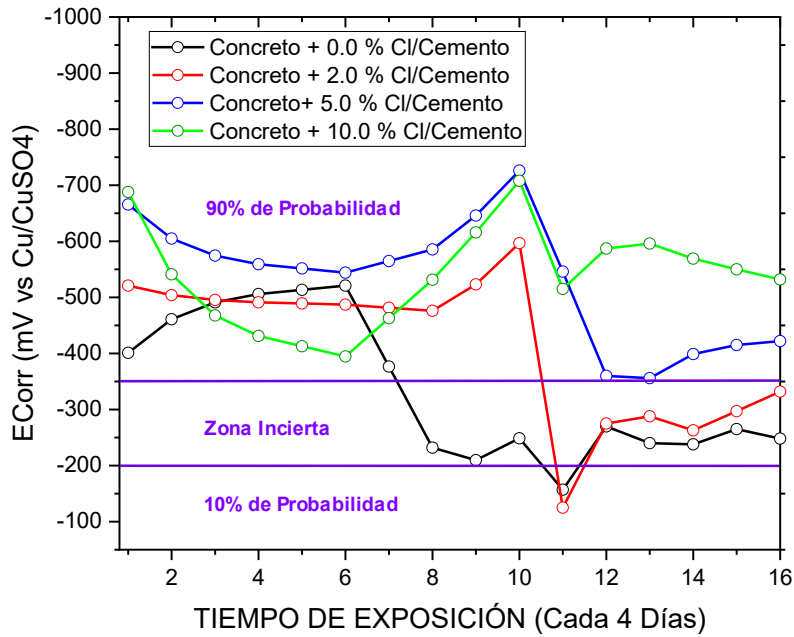
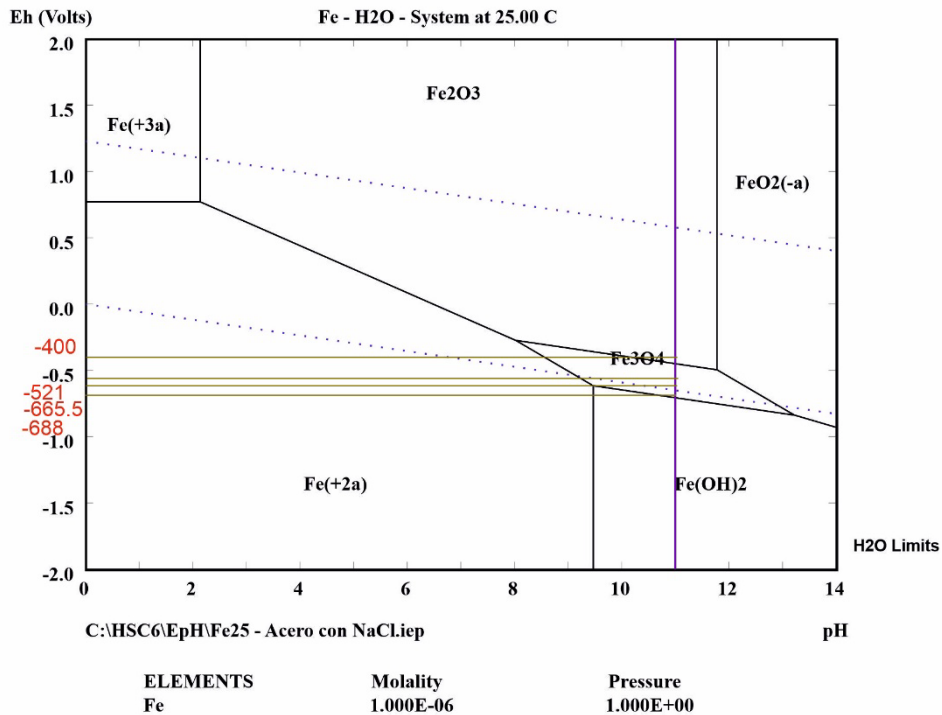
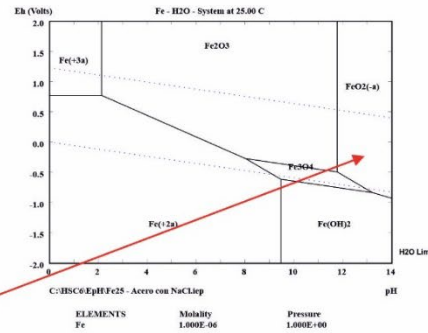
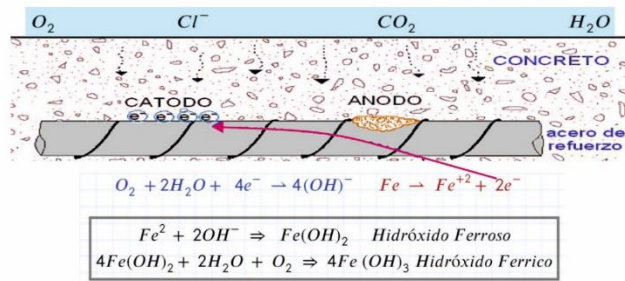


Gráfico 13. Gráfica de Pourbaix del acero ASTM A615 de Ecorr en % NaCl de 2.0% y 5.0 %, 10.0 % respecto al peso de cemento.

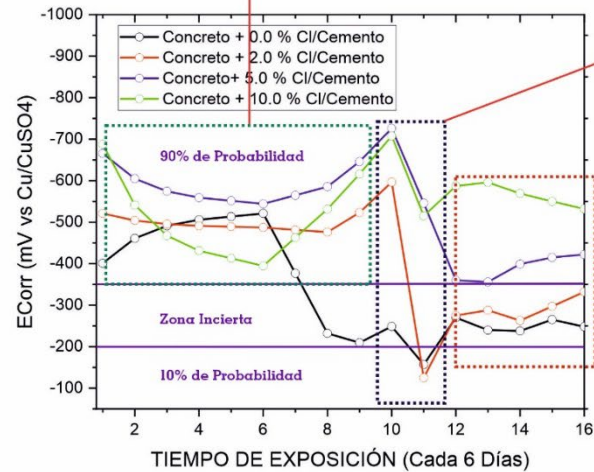


**Formación de capa pasivada**

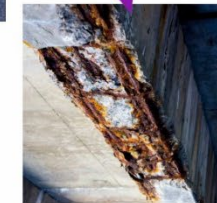
Para la creación de la capa pasivada, inicialmente el ion  $Cl^-$  ingresa por los poros del concreto hacia el nucleo de manera que al llegar a la superficie se inicia el procesos corrosivo. Generándose una capa de óxido.



Medición del pH es de 13



Se crea una capa pasiva y se detiene el proceso corrosivo.

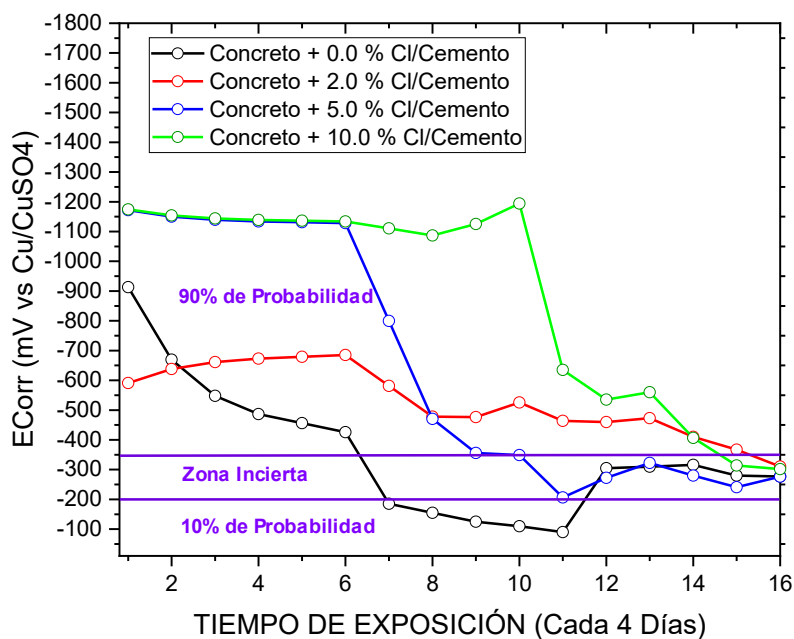


La capa pasiva se expande creando fisuraciones macroscópicas las cuales permiten el ingreso de cloruros y humedad incrementando la velocidad de Corrosión

### Ensayos de media celda para acero galvanizado

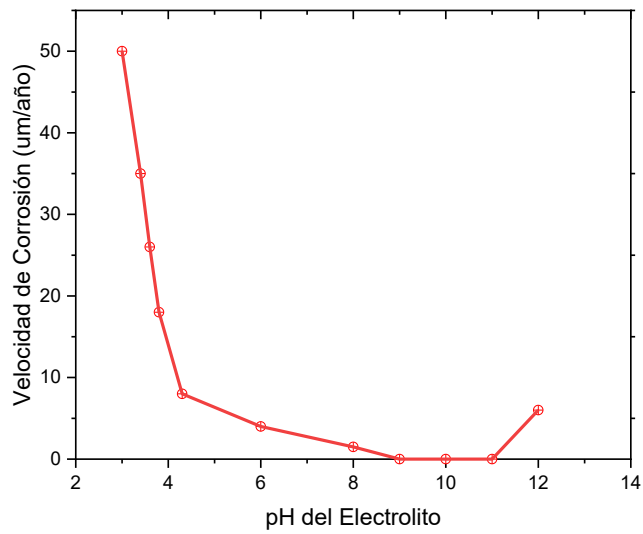
Según norma ASTM C876 indica que si los potenciales son más negativos que  $E_{corr} = -0.350$  mV V CSE, existe una probabilidad superior al 90 % que la corrosión del acero embebido en concreto se produzca, pero esto no significa que el acero se está corroyendo en estas condiciones, sino que el medio en el que se encuentra terminara siendo perjudicial para el acero embebido. Los aceros con concentraciones 2.0%, 5.0 % y 10.0 % de NaCl en su diseño de mezcla, del día 1 al día 24 presentan un 90% de probabilidad. Se aprecia que en el día 28 presentan una caída de potencial negativo a uno más positivo, lo cual indica que se ha creado una primera capa pasivada de óxido de zinc. El pH del medio es un factor importante, se puede apreciar que el pH medido es 13 el cual podemos inferir que existe una capa pasivada generada por una corrosión de la superficie del recubrimiento (ver gráfico 14).

Gráfico 14. Gráfica de  $E_{corr}$  en % NaCl de 2.0% y 5.0 %, 10.0 %, respecto al peso de cemento



Se observa la variación promedio de la velocidad de corrosión del zinc en función del pH, en valores de pH entre 6 y 14. Conforme se disminuye el pH, aumenta la velocidad de corrosión del Zn. De manera que en un pH alto como 13, el proceso de corrosión será lento y así aumentando la vida de las estructuras embebidas en concreto.

Gráfico 15. Variación de la velocidad de corrosión del zinc en función del pH del electrolito.

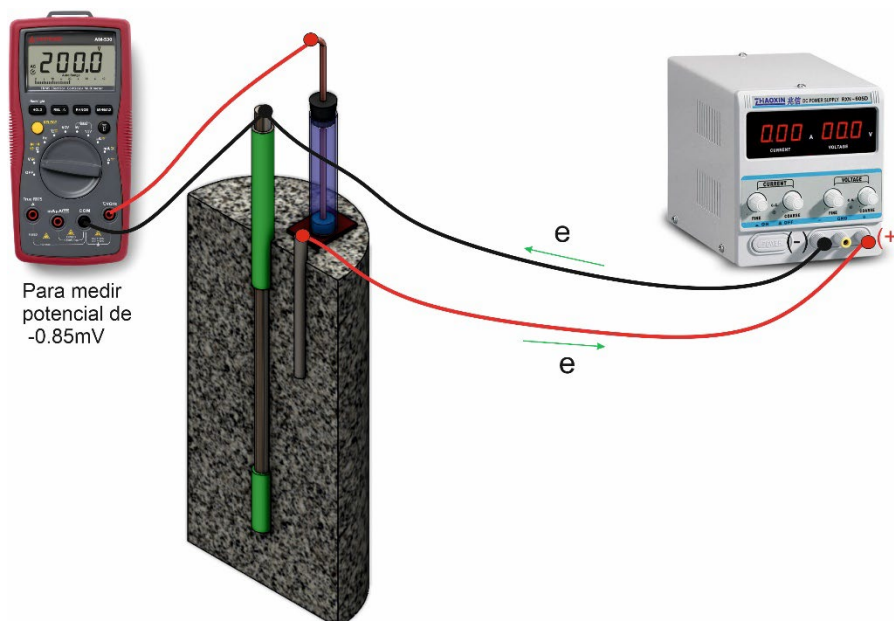


### Medición del amperaje y voltaje del acero ASTM A615 Grado 60

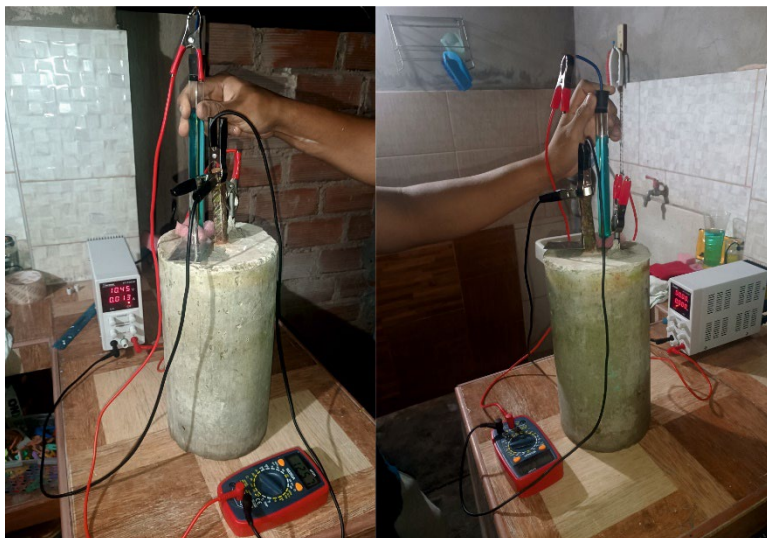
Para suministrar el amperaje de la parte expuesta de la probeta a NaCl es necesario medir su área:

$$(2\pi \times (0.6) \times 16\text{cm}) - 2(\pi \times 0.6^2) = 58.056 \text{ cm}^2$$

Figura 14. Diseño de celda de tres electrodos para acero A516 con concreto embebido.



Fotografía 16. Medición de amperaje y voltaje para acero A516 con concreto embebido.



Al aplicar un incremento de amperajes a la fuente de poder podemos obtener valores promedios para cada concentración o calcular la densidad de corriente para luego encontrar la velocidad de corrosión en mm/año.

Tabla 20. Velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 en NaCl en g/l a diferentes concentraciones medidos con amperímetro.

Concentraciones de NaCl (g/l)	Densidad corriente mA / cm <sup>2</sup>	Potencial en mV vs CuSO <sub>4</sub>	Área expuesta (cm <sup>2</sup> )	V <sub>corr</sub> (mm/año)
0.000	200	-1243	58.059	0.02916
0.806	230	-1229	58.058	0.03059
78.802	260	-1160	58.057	0.03202
166.495	290	-1149	58.056	0.03173

Tabla 21. Velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 galvanizado en contacto con NaCl en g/l a diferentes concentraciones con amperímetro.

Concentraciones de NaCl (g/l)	Densidad corriente mA / cm <sup>2</sup>	Potencial en mV vs CuSO <sub>4</sub>	Área expuesta (cm <sup>2</sup> )	V <sub>corr</sub> (mm/año)
0.000	320	-1322	58.063	0.00743
0.806	350	-1301	58.062	0.00972
78.802	380	-1287	58.061	0.02573
166.495	410	-1255	58.060	0.02916

Teniendo los valores de V<sub>corr</sub> ya definidos, se puede verificar una significativa diferencia sobre todo en las concentraciones de 78.802 y 166.495, debido a que justamente el ambiente es más agresivo. Por lo cual se realizó un análisis de efectividad del recubrimiento teniendo en cuenta los valores obtenidos.

Tabla 22. Comparativa entre la velocidad de corrosión en milímetros por año de los aceros en contacto con NaCl en g/l a diferentes concentraciones

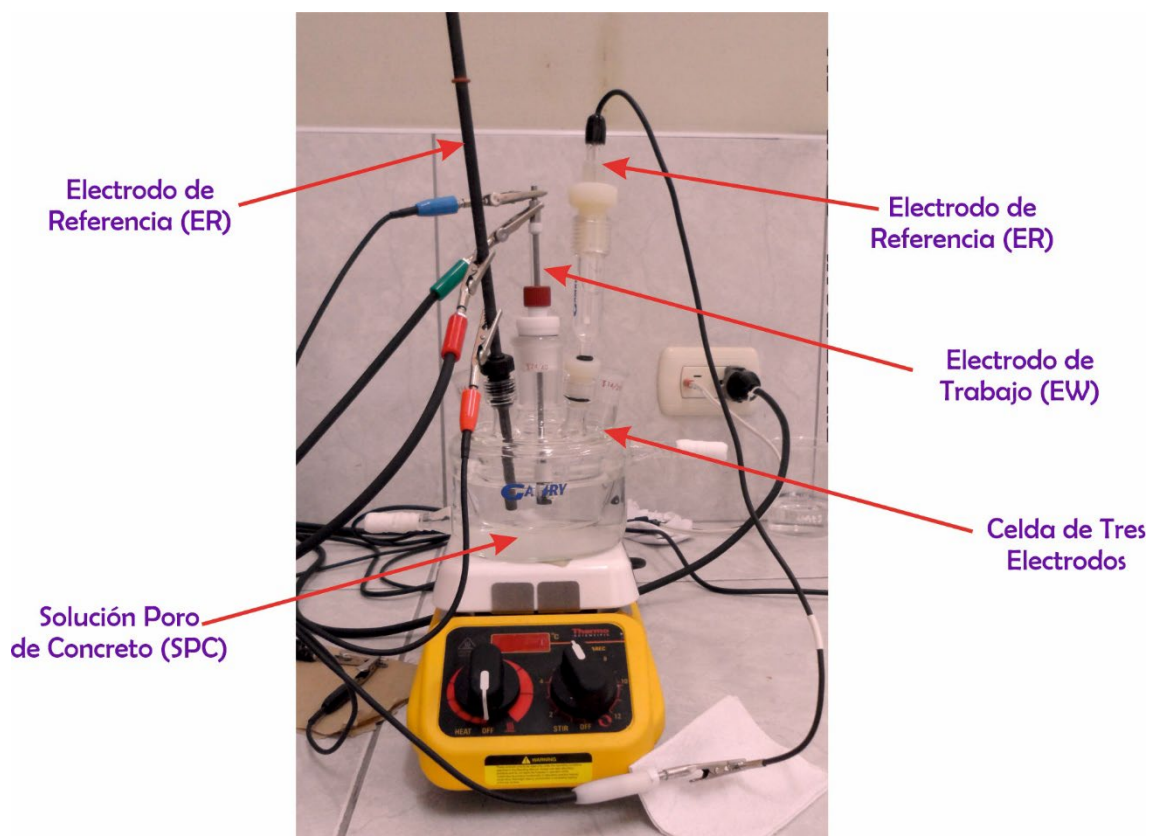
Concentraciones de NaCl (g/l)	Comparativa				
	V <sub>corr</sub> (mm/año)		Datos		
	Comercial	Galvanizado	Diferencia	Efectividad	Efectividad promedio
0.000	0.02916	0.00743	0.02173	74.52%	42.62%
0.806	0.03059	0.00972	0.02087	68.22%	
78.802	0.03202	0.02573	0.00629	19.64%	
166.495	0.03173	0.02916	0.00257	8.10%	

## Estudios Complementarios

### Ensayos electroquímicos con solución poro de concreto

Las soluciones fueron inicialmente mezcladas con cemento mochica anti-salitre en relación agua /cemento (0.5) y luego filtradas en una bomba de vacío con un papel filtro grado 40, con su respectiva medición de Ph arrojando como resultado un Ph>12.

*Figura 15. Arreglo de celda de tres electrodos y solución poro de concreto (SPC).*



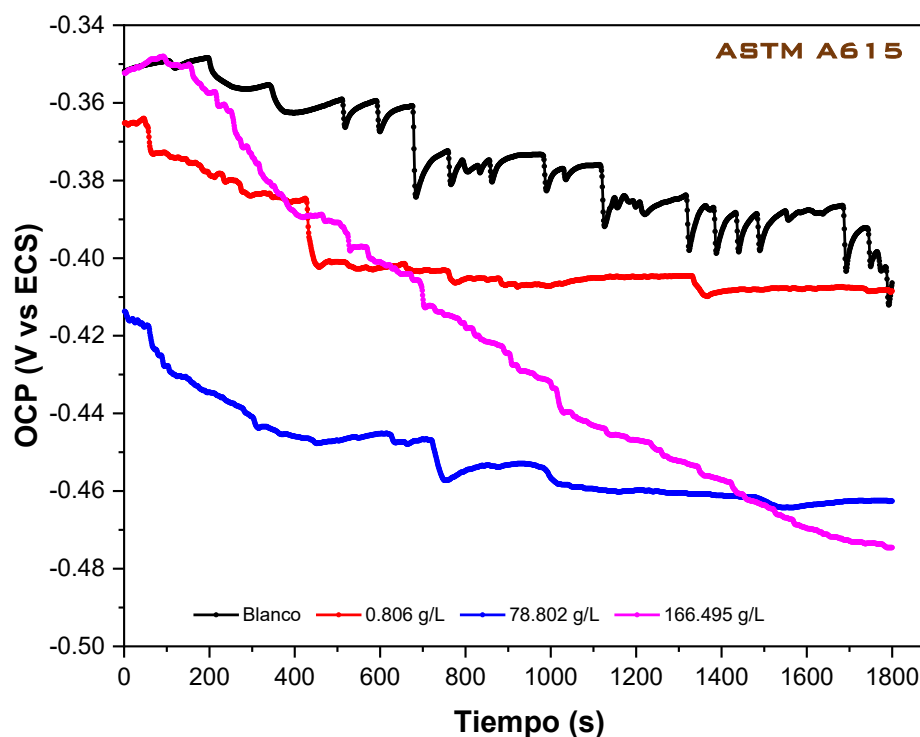
Los ensayos electroquímicos se realizaron en celda convencional de tres electrodos de vidrio de 150 cm<sup>3</sup> de capacidad. La celda consistió en un electrodo de trabajo cilíndrico del acero ASTM A615 Grado 60 en estudio con un área entre 3 cm<sup>2</sup> a 4.5 cm<sup>2</sup>, un electrodo de calomel conteniendo cristales de cloruro de potasio saturado como electrodo de referencia y una varilla de grafito como contraelectrodo. En el montaje se incluyó un capilar de Luggin, acondicionado cerca de la superficie del electrodo de trabajo para minimizar la caída de voltaje.

Todos los ensayos electroquímicos de EFM con el fin de evaluar la reproducibilidad de estos, utilizando el potenciostato Gamry Reference 3000 de fabricación en USA. El electrodo de trabajo se mantuvo por un tiempo de 30 minutos en las soluciones poro de concreto antes

del inicio de las mediciones para lograr un valor cuasi estacionario para el potencial de circuito abierto. Este primer ensayo sirve para estabilizar el potencial con respecto al medio y nos indica el cambio de este respecto al tiempo. El potencial en todas las concentraciones es mayor a los 350 mV, lo cual nos indica que la tendencia encontrada en la medición mediante el electrodo de referencia de  $\text{CuSO}_4$  indica que hay un 90% de probabilidad de corrosión.

Respecto a la concentración de 0.0 g/l y 0.806 g/l de NaCl se aprecia que la caída que no es pronunciada manteniendo potenciales constantes. Esto se traduce en una baja agresividad del NaCl debido a la nula y baja concentración de este elemento, ver figura 16.

*Gráfico 16. Potencial de corrosión del acero ASTM A615 en solución poro de concreto (SPC) con diferentes concentraciones de NaCl.*

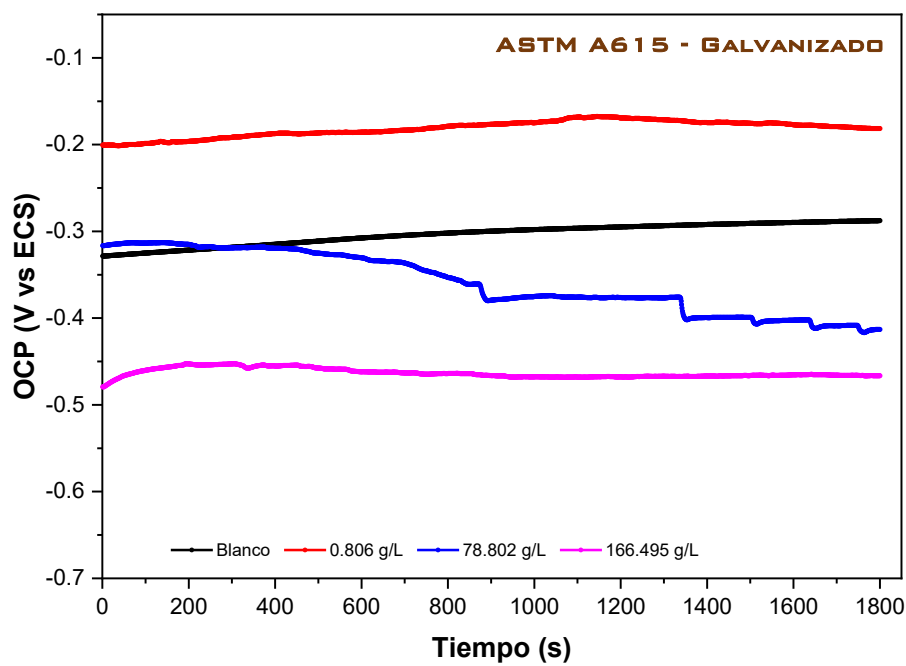


Hablando del acero galvanizado, presenta una resistencia a la corrosión mucho mayor, presenta potenciales de corrosión mayores a los 200 mV esto indica que se tiene incertidumbre del proceso de corrosión debido a la presencia de cloruros que se desplazaron a través de la porosidad del concreto llegando al acero.

Respecto a la concentración de 0.0 g/l y 0.806 g/l de NaCl se aprecia que la caída que no es pronunciada manteniendo potenciales constantes. Esto se traduce en una baja agresividad del NaCl debido a la nula y baja concentración de este elemento en el acero A615 con recubrimiento galvanizado. También es importante recalcar que la concentración de 78.802 g/l

y 166.495 g/l de NaCl también se presentan un comportamiento constante de potencial, ver figura 17.

*Gráfico 17. Potencial de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado en solución poro de concreto (SPC) con diferentes concentraciones de NaCl.*



### Técnica de modulación de frecuencia electroquímica (EFM)

La gráfica es un espectro de respuesta de la corriente como una función de la frecuencia. Conocido en electroquímica como espectro de intermodulación. Los espectros contienen respuestas de corriente asignados a los picos de corrientes armónicas y de intermodulación. Para procesar los datos se utilizó el software EFM140TM de Gamry, el cual utiliza los picos con mayor altura para calcular la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), las pendientes para la curva Tafel ( $\beta_c$  y  $\beta_a$ ) y los valores de causalidad CF-2 y CF-3. A continuación podemos apreciar las gráficas de intermodulación.

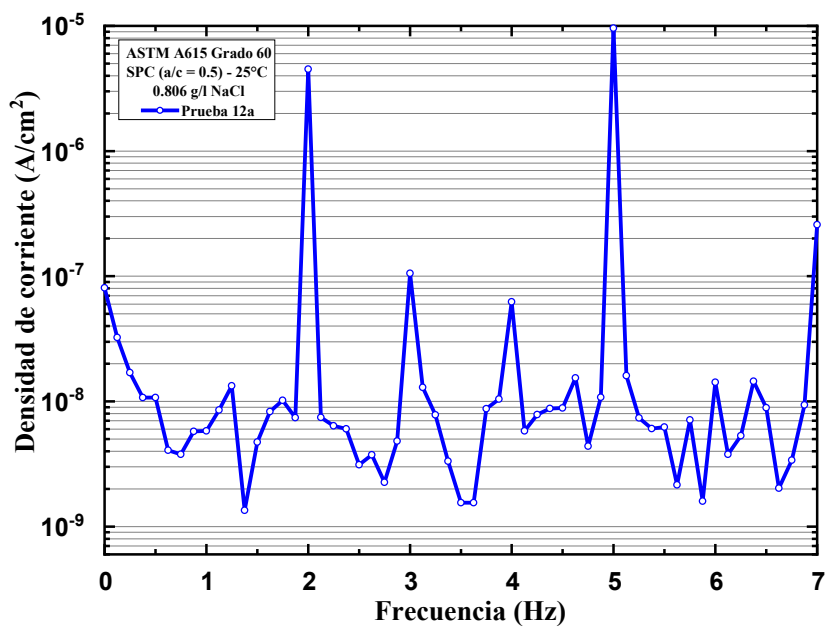
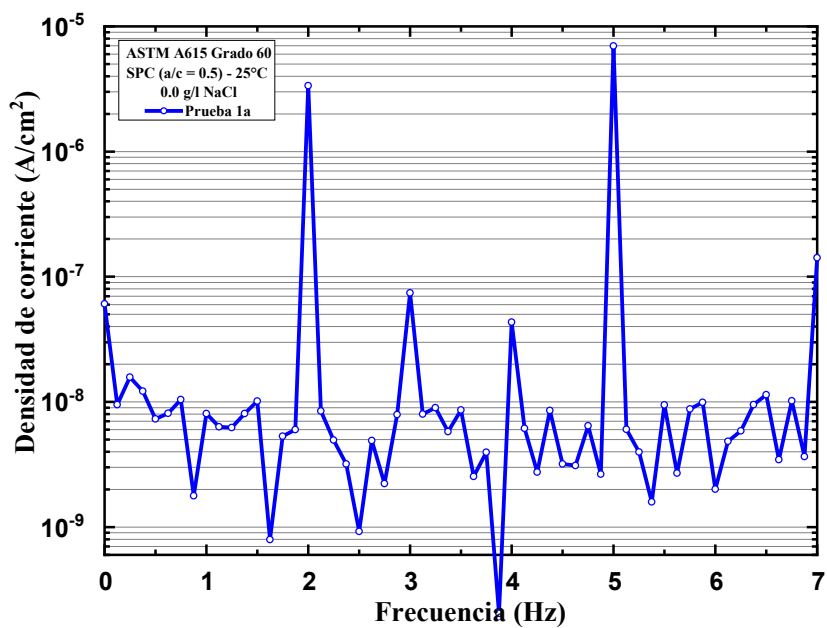


Gráfico 18. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 en NaCl 0.0 g/l y 0.806 g/l.

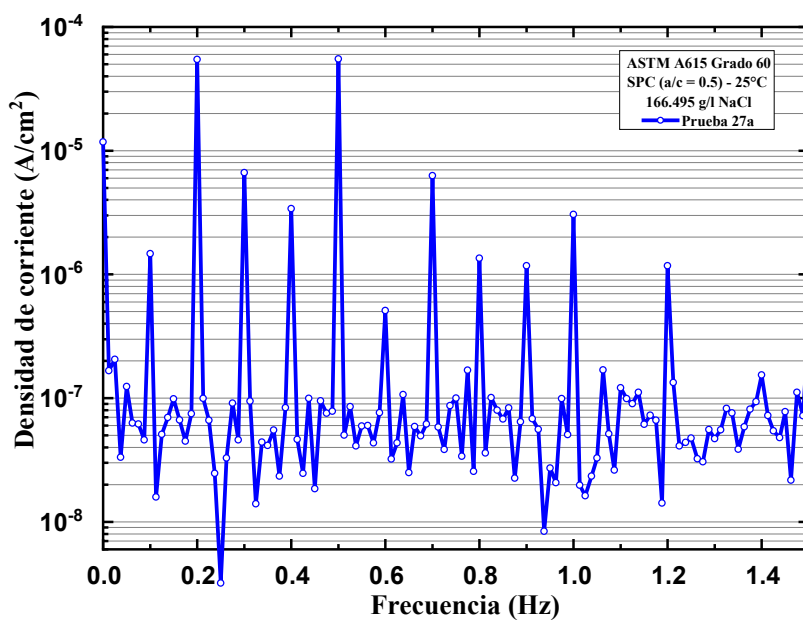
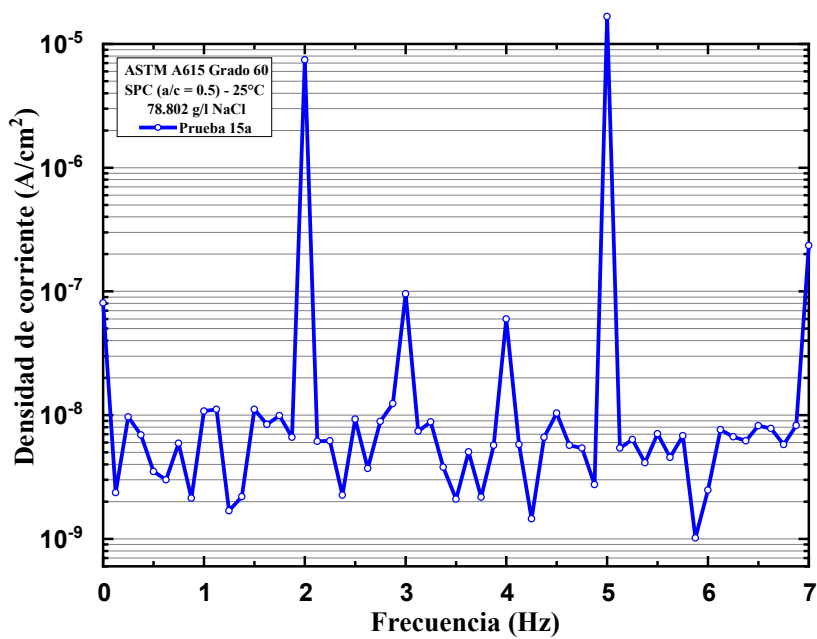


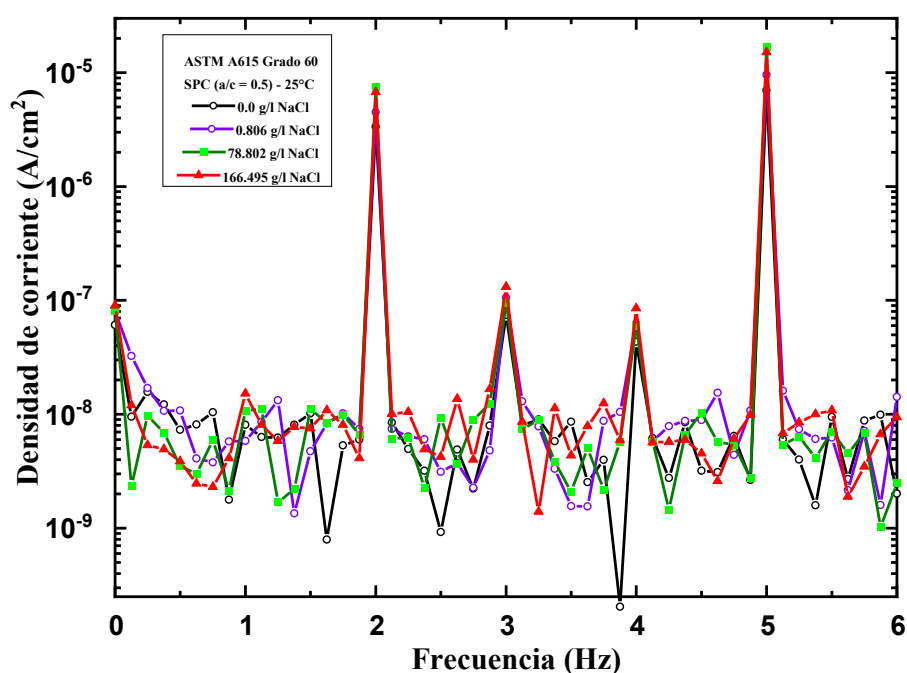
Gráfico 19. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 en NaCl 78.802 g/l y 166.495 g/l.

Tabla 23. Velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 en NaCl en g/l a diferentes concentraciones.

Prueba	T C	NaCl g/l	Area	Icorr uA	icorr (b) uA/cm2	Ba mV	Bc mV	Vcorr mm/año	CF(2)	CF(3)
1 <sup>a</sup>	25	0	3.741	63.24	16.9	0.187	0.247	0.1960	1.835	3.508
1b	25	0	3.741	63.85	17.07	0.194	0.248	0.1980	1.491	3.811
4 <sup>a</sup>	25	0	3.923	45.72	11.65	0.226	0.252	0.1350	1.056	3.962
12 <sup>a</sup>	25	0.806	3.882	84.69	21.82	0.174	0.24	0.253	1.53	1.429
12b	25	0.806	3.882	74.84	19.28	0.156	0.211	0.224	1.436	2.015
13 <sup>a</sup>	25	0.806	3.749	75.02	20.01	0.184	0.215	0.232	1.753	3.65
15 <sup>a</sup>	25	78.802	3.817	144.3	37.8	0.188	0.223	0.439	1.34	2.738
15b	25	78.802	3.817	136	35.63	0.178	0.208	0.414	1.314	1.61
16 <sup>a</sup>	25	78.802	3.762	136	36.15	0.178	0.208	0.420	1.314	1.61
27 <sup>a</sup>	25	166.495	4.026	288.5	71.66	0.06498	0.01228	0.832	2.01	2.707
27b	25	166.495	3.856	283.9	73.63	0.0651	0.0121	0.855	1.955	3.026
28b	25	166.495	3.784	282.7	74.71	0.06478	0.0121	0.867	1.982	3.11

Si observamos la tabla de datos podemos identificar que conforme aumenta la concentración de NaCl, la velocidad de corrosión se incrementa, por lo cual son directamente proporcionales, también es necesario recalcar los valores de las pendientes anódica y catódica ( $\beta_c$  y  $\beta_a$ ), para asegurar la calidad de los ensayos se presentan los factores de causalidad con valores que fluctúan entre 2 y 3.

Gráfico 20. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 en diferentes concentraciones de NaCl en g/l.



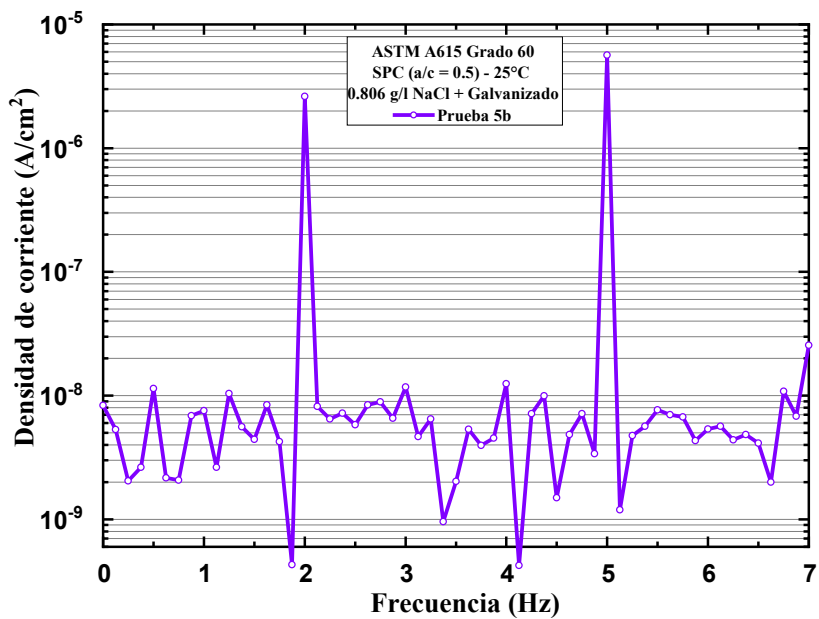
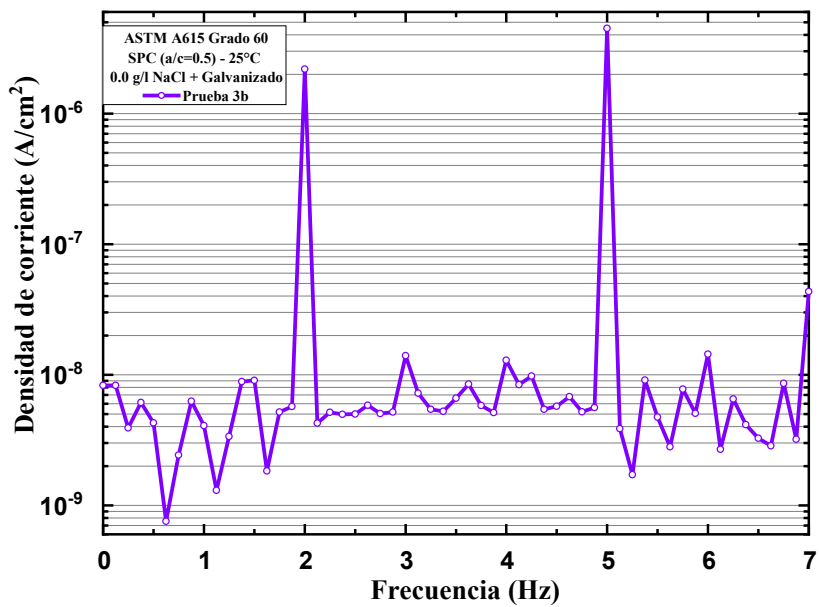


Gráfico 21. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 galvanizado en NaCl 0.0 g/l y 0.806 g/l.

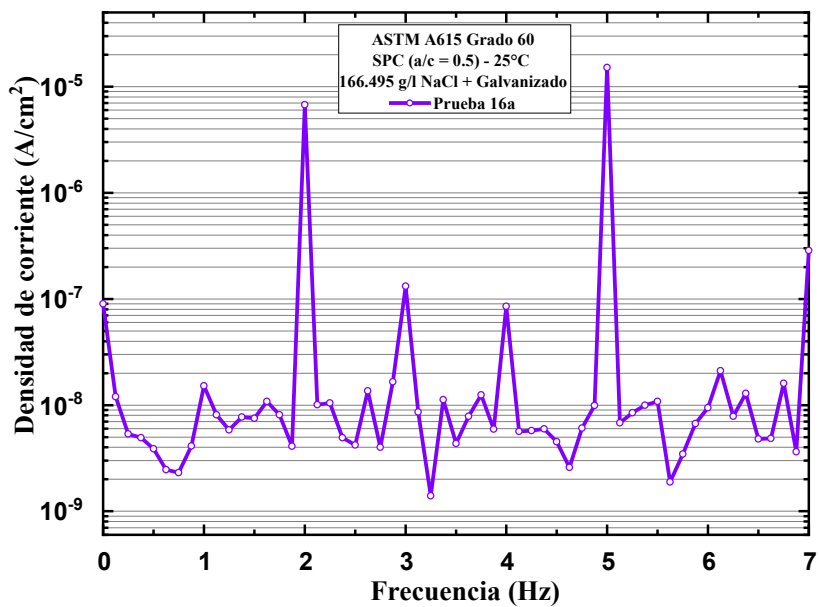
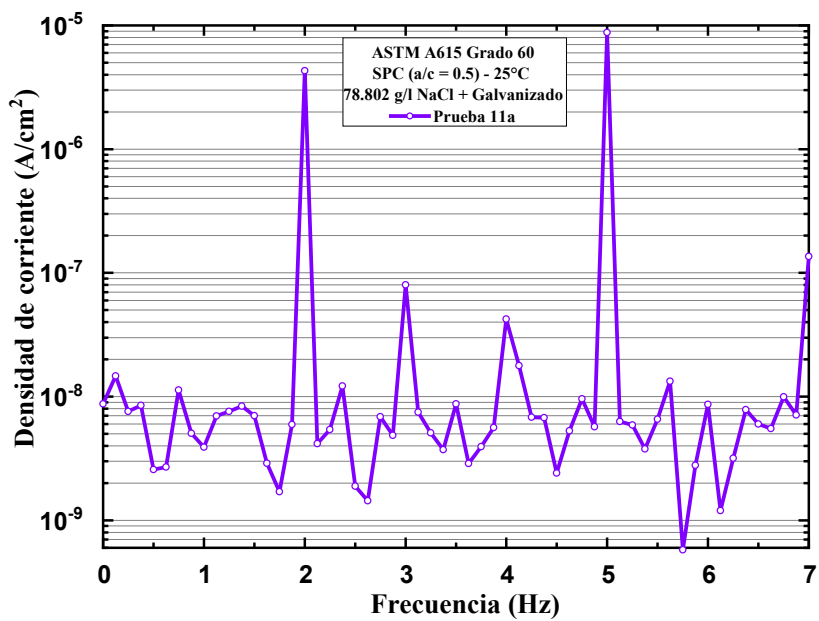


Gráfico 22. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 galvanizado en NaCl 78.802 g/l y 166.495 g/l.

Tabla 24. Velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 en NaCl en g/l a diferentes concentraciones.

Prueba	T C	NaCl g/l	Area	Icorr uA	88cor (b) uA/cm2	Ba mV	Bc mV	Vcorr mm/año	CF(2)	CF(3)
3b	25	0	3.835	43.18	11.26	0.207	0.233	0.1310	1.42	1.012
4b	25	0	3.923	43.77	11.16	0.217	0.24	0.1300	1.035	2.498
5 <sup>a</sup>	25	0	3.891	43.77	11.25	0.217	0.24	0.1310	1.035	2.498
5b	25	0.806	3.891	63.54	16.33	0.248	0.267	0.1900	1.255	1.423
6 <sup>a</sup>	25	0.806	3.876	63.36	16.35	0.22	0.249	0.1900	1.355	2.56
6b	25	0.806	3.876	63.48	16.38	0.22	0.251	0.1900	1.539	2.952
11 <sup>a</sup>	25	78.802	3.806	111.6	29.32	0.254	0.343	0.340	1.745	1.233
11b	25	78.802	3.806	95.97	25.22	0.223	0.287	0.293	1.689	2.377
13b	25	78.802	3.749	95.07	25.36	0.227	0.282	0.294	1.535	1.256
16 <sup>a</sup>	25	166.495	3.762	136	36.15	0.178	0.208	0.420	1.314	1.61
17 <sup>a</sup>	25	166.495	4.026	125.1	31.07	0.231	0.275	0.361	1.547	1.815
17b	25	166.495	4.026	131.8	32.74	0.223	0.293	0.380	1.521	1.278

Se identifica un aumento en la concentración de NaCl, entonces la velocidad de corrosión aumenta, también es necesario recalcar los valores de las pendientes anódica y catódica ( $\beta_c$  y  $\beta_a$ ), para asegurar la calidad de los ensayos se presentan los factores de causalidad con valores que fluctúan entre 2 y 3. Comparando los valores del acero con recubrimiento de galvanizado la velocidad de corrosión es menor (ver tabla 22). El zinc en el proceso de galvanización se adhiere metalúrgicamente al acero, de manera que capas sucesivas de aleación Zn-Fe se originan en la superficie y debido a esto el proceso de corrosión del zinc es mucho más lento que el del acero ya que forma una capa pasiva.

Figura 16. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 galvanizado

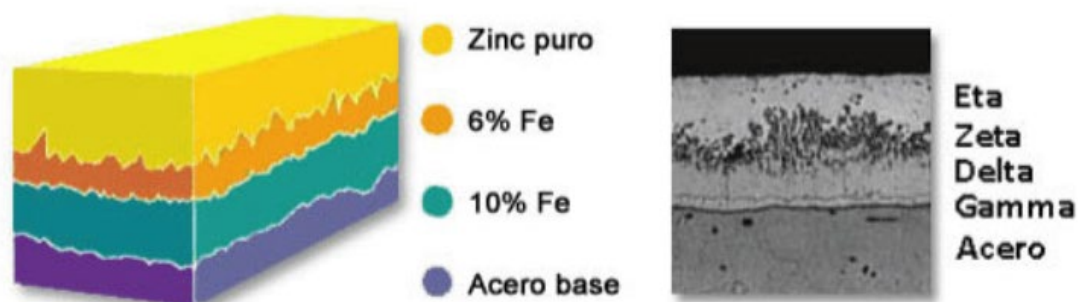


Gráfico 23. Espectro de intermodulación del acero ASTM A615 galvanizado en diferentes concentraciones de NaCl en g/l.

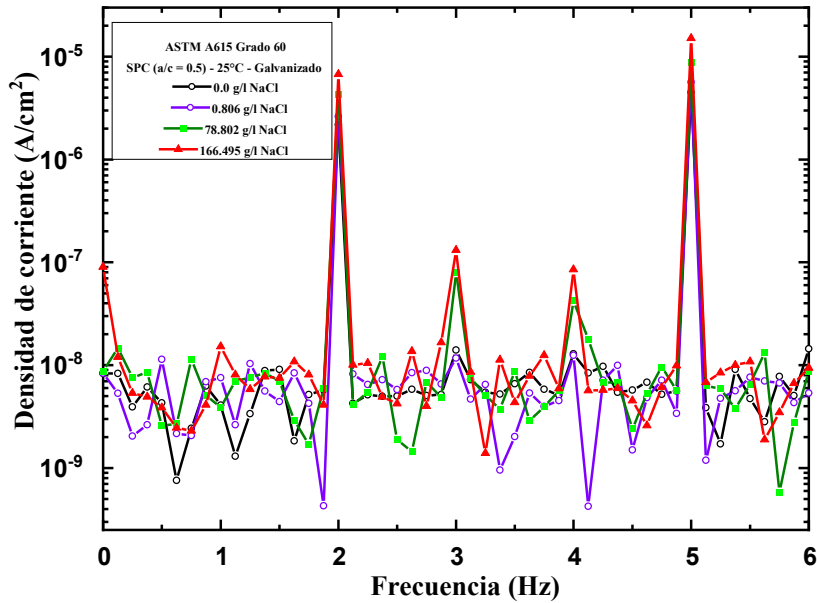


Tabla 25. Comparativa de la velocidad de Corrosión en milímetros por año del acero ASTM A615 en NaCl en g/l a diferentes concentraciones

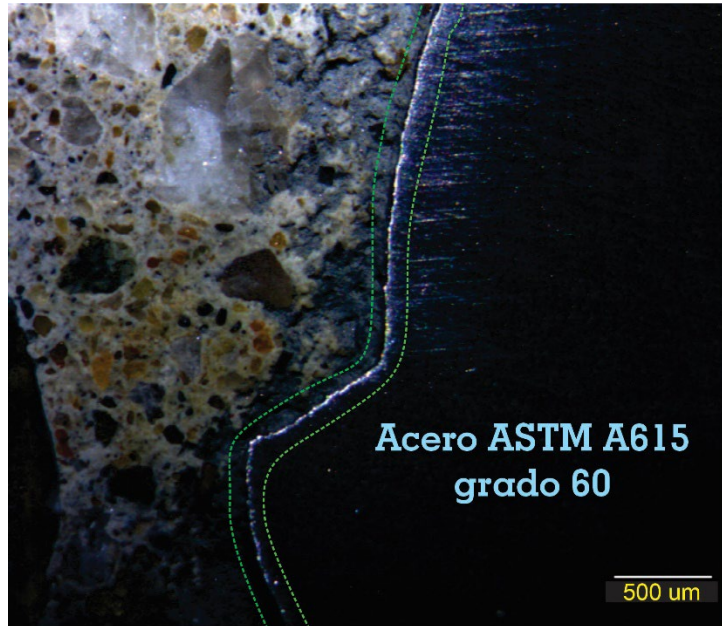
T	NaCl	Vcorr	Vcorr	Diferencia de Vcorr	Efectividad de recubrimiento	Efectividad promedio
C	g/l	mm/año	mm/año			
25	0	0.1960	0.1310	0.0650	33.16%	31.16%
25	0	0.1980	0.1300	0.0680	34.34%	
25	0	0.1350	0.1310	0.0040	2.96%	
25	0.806	0.253	0.1900	0.0630	24.90%	
25	0.806	0.224	0.1900	0.0340	15.18%	
25	0.806	0.232	0.1900	0.0420	18.10%	
25	78.802	0.439	0.340	0.0990	22.55%	
25	78.802	0.414	0.293	0.1210	29.23%	
25	78.802	0.420	0.294	0.1260	30.00%	
25	166.495	0.832	0.420	0.4120	49.52%	
25	166.495	0.855	0.361	0.4940	57.78%	
25	166.495	0.867	0.380	0.4870	56.17%	

Es importante recalcar que el acero forma una capa pasivada respecto al tiempo la cual sirve como protección, esto se puede verificar realizando un corte a la probeta. De manera transversal y verificándolo en el estereoscopio. Probablemente, esto explicaría el comportamiento de los potenciales y las velocidades de corrosión; la capa pasivada es más pronunciada sin presencia de cloruros y en bajas concentraciones de NaCl. Ver fotografía 17 y 18.

*Fotografía 17. Concreto con acero ASTM A615, corte transversal con aumento x2.76*



*Fotografía 18. Concreto con acero ASTM A615, corte transversal, verificación de capa pasivada.*



## Conclusiones

La investigación presentada en este artículo examina la evolución de los potenciales de corrosión en el acero ASTM A615 convencionales y con recubrimiento de zinc. Las probetas tuvieron un recubrimiento aproximado de 7.5 cm por lado, tal y como lo dictamina la norma como recubrimiento mínimo en cimentaciones o estructuras enterradas. Las conclusiones se han basado en los resultados presentados anteriormente:

- Las zonas con mayor concentración de cloruro de sodio no son necesariamente las más cercanas al mar, ya que podemos observar condiciones más agresivas en la ciudad de Chiclayo que en Pimentel, esto debido a depósitos de sal en el subsuelo.
- Realizada la obtención de Fotomicrografía de la microestructura del recubrimiento se aprecia un recubrimiento con promedio de 28.695  $\mu\text{m}$ .
- Los aceros sin galvanizar con concentraciones de 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. presentan una probabilidad superior al 90 %. En el día 80 se puede observar un potencial más negativo, por lo cual el proceso corrosivo es mucho más rápido. También con las concentraciones de 0.0 g/l un potencial que no sobrepasa los -0.567 mV y en el día 68 tiende a un potencial menos negativo esto significa que sin NaCl el proceso corrosivo es lento y 0.806 g/l. un potencial que no sobrepasa los -0.518 mV y en el día 80 tiende a un potencial más negativo.
- Los aceros galvanizados por inmersión en caliente, con concentraciones 0.806 g/l, 78.802 g/l y 166.495 g/l. presentan una probabilidad superior al 90 % de corroerse, además que las concentraciones de 78.802 g/l y 166.495 g/l tienen un potencial de corrosión más bajo, esto debido a la alta concentración de cloruro de sodio en las soluciones donde fueron sumergidas los especímenes, en el día 80 se puede observar un potencial más negativo lo cual el proceso corrosivo es mucho más rápido. También, las concentraciones de 0.0 g/l tienen un potencial que no sobrepasa los -0.567 mV y en el día 68 tiende a un potencial menos negativo. Lo cual significa que sin NaCl el proceso corrosivo es lento y 0.806 g/l. un potencial que no sobrepasa los -0.518 mV y en el día 80 tiende a un potencial más negativo.
- En general, podemos ver al final de la proyección de potenciales de corrosión, los aceros tienden ir para la parte inferior, es decir, para la zona donde hay un 10% de probabilidad de corrosión, sobre todo en las probetas que tienen poco o nada de cloruro de sodio en su ambiente. Esto sucede porque se comienza a generar la capa pasiva que es inherente en el concreto armado, y esto ocurre más rápido en los aceros convencionales debido a

que no hay un recubrimiento que impida el proceso. Caso contrario en el acero galvanizado.

- El ph del electrolito se establece entre 12 y 13, por lo cual podemos inferir que, el proceso corrosivo en realidad será lento, si lo dejamos a la intemperie.
- La  $V_{corr}$  medida, con ayuda del amperímetro, nos muestra una clara brecha entre el acero galvanizado y el acero comercial, siendo más notorio en las concentraciones de 78.802 g/l y 166.495 g/l. Sin embargo se evalúa una efectividad promedio de 42.62% del recubrimiento.
- Para los ensayos EFM, se obtiene lo esperado, es directamente proporcional la velocidad de corrosión con respecto a la concentración de NaCl, y se calcula una efectividad del recubrimiento mayor al 30%.
- Para los ensayos electroquímicos de OPC, respecto a la concentración de 0.0 g/l y 0.806 g/l de NaCl se aprecia que la caída que no es pronunciada manteniendo potenciales constantes. Esto se traduce en una baja agresividad del NaCl debido a la nula y baja concentración de este elemento. También es importante recalcar que la concentración de 78.802 g/l y 166.495 g/l de NaCl también se presentan un comportamiento constante de potencial sobre todo en los aceros galvanizados producto de la protección del recubrimiento mismo.

## Referencias

- [1] M. S. Dewi, P. Sancharoen, P. Klomjit, y S. Tangtermsirikul, «Effects of Zinc alloy layer on corrosion and service life of galvanized reinforcing steels in chloride-contaminated concrete», *J. Build. Eng.*, vol. 68, p. 106153, jun. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.106153.
- [2] J. G. Cabrera, «Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 18, n.º 1, pp. 47-59, ene. 1996, doi: 10.1016/0958-9465(95)00043-7.
- [3] H. Qu *et al.*, «Enhancing the carbonation and chloride resistance of concrete by nano-modified eco-friendly water-based organic coatings», *Mater. Today Commun.*, vol. 37, p. 107284, dic. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107284.
- [4] S. Rossi, M. Pinamonti, y M. Calovi, «Influence of soil chemical characteristics on corrosion behaviour of galvanized steel», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, p. e01257, dic. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01257.
- [5] L. Dudi, S. Krishnan, y S. Bishnoi, «Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride», *J. Build. Eng.*, vol. 79, p. 107867, nov. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107867.
- [6] O. O. Joseph, O. O. Joseph, J. O. Dirisu, y A. E. Odedeji, «Corrosion resistance of galvanized roofing sheets in acidic and rainwater environments», *Heliyon*, vol. 7, n.º 12, p. e08647, dic. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08647.
- [7] X. Guan y J. Shi, «Protection of galvanized steel using benzotriazole as a corrosion inhibitor in simulated concrete pore solution and alkali-activated fly ash solution», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 136, p. 104880, feb. 2023, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104880.
- [8] A. Al-Negheimish, R. R. Hussain, A. Alhozaimy, y D. D. N. Singh, «Corrosion performance of hot-dip galvanized zinc-aluminum coated steel rebars in comparison to the conventional pure zinc coated rebars in concrete environment», *Constr. Build. Mater.*, vol. 274, p. 121921, mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121921.
- [9] G. Roventi, T. Bellezze, G. Giuliani, y C. Conti, «Corrosion resistance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete: effect of wet–dry cycles in tap water and in chloride solution on the passivating layer», *Cem. Concr. Res.*, vol. 65, pp. 76-84, nov. 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.07.014.
- [10] A. Królikowska, L. Komorowski, y P. L. Bonora, «Pitting Corrosion of Hot-Dip Galvanized Coatings», *Materials*, vol. 13, n.º 9, Art. n.º 9, ene. 2020, doi: 10.3390/ma13092031.

- [11] P. Pokorný, P. Tej, y M. Kouřil, «Evaluation of the impact of corrosion of hot-dip galvanized reinforcement on bond strength with concrete – A review», *Constr. Build. Mater.*, vol. 132, pp. 271-289, feb. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.096.
- [12] G. S. Duffó y S. B. Farina, «Electrochemical behaviour of steel in mortar and in simulated pore solutions: Analogies and differences», *Cem. Concr. Res.*, vol. 88, pp. 211-216, oct. 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.07.007.
- [13] A. Poursaeed y C. M. Hansson, «Potential pitfalls in assessing chloride-induced corrosion of steel in concrete», *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, n.º 5, pp. 391-400, may 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.01.015.
- [14] C. Li, Q. Chen, R. Wang, M. Wu, y Z. Jiang, «Corrosion assessment of reinforced concrete structures exposed to chloride environments in underground tunnels: Theoretical insights and practical data interpretations», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 112, p. 103652, sep. 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103652.
- [15] W. Feng, A. Tarakbay, S. Ali Memon, W. Tang, y H. Cui, «Methods of accelerating chloride-induced corrosion in steel-reinforced concrete: A comparative review», *Constr. Build. Mater.*, vol. 289, p. 123165, jun. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123165.
- [16] T. A. Hemkemeier, F. C. R. Almeida, A. Sales, y A. J. Klemm, «Corrosion monitoring by open circuit potential in steel reinforcements embedded in cementitious composites with industrial wastes», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e01042, jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01042.
- [17] I. B. Obot y I. B. Onyeachu, «Electrochemical frequency modulation (EFM) technique: Theory and recent practical applications in corrosion research», *J. Mol. Liq.*, vol. 249, pp. 83-96, ene. 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2017.11.006.
- [18] «Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.astm.org/a0615\\_a0615m-22.html](https://www.astm.org/a0615_a0615m-22.html)
- [19] «UNE-EN ISO 9223:2012 (Ratificada) Corrosión de los metales y a...» Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0048941>
- [20] «G3 - 89(2010) | Normas AENOR». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.aenor.com/norma-astm-g3-89-2010-073471>
- [21] «Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/g0015-07.html>

- [22] «D512 Métodos de prueba estándar para iones de cloruro en agua (retirado en 2021)». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d0512-12.html>
- [23] «Standard Test Method for Sulfate Ion in Water». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d0516-16.html>
- [24] «Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/c0876-15.html>
- [25] N. R. Jarrah, O. S. B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, O. A. Ashiru, y A. I. Al-Mana, «Electrochemical behaviour of steel in plain and blended cement concretes in sulphate and/or chloride environments», *Constr. Build. Mater.*, vol. 9, n.º 2, pp. 97-103, abr. 1995, doi: 10.1016/0950-0618(95)00002-W.
- [26] J. Williamson y O. B. Isgor, «The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar», *Corros. Sci.*, vol. 106, pp. 82-95, may 2016, doi: 10.1016/j.corsci.2016.01.027.
- [27] E. M. Pérez, «COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DEL ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO».
- [28] J. Y. Hu, S. S. Zhang, E. Chen, y W. G. Li, «A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures», *Constr. Build. Mater.*, vol. 325, p. 126718, mar. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126718.
- [29] «Diseño de estructuras de concreto armado - Teodoro Harmsen», Fondo Editorial PUCP. Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fondoeditorial.pucp.edu.pe/ciencias-e-ingenieria-/613-diseno-de-estructuras-de-concreto-armado.html>
- [30] «pt182.pdf». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt182.pdf>
- [31] Universidad de Alicante, Alicante, España y P. Garcés Terradillos, «Recomendaciones Técnicas», Alconpat Internacional, sep. 2020. doi: 10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/.
- [32] «Unidad 12. Fundamentos de corrosión y protección». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12\\_2.html](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12_2.html)
- [33] M. Vazquez, «CORROSION DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN EN SOLUCIÓN SIMULADA DE PORO», *Mater.-Samorgar*, Accedido: 28 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/894019/CORROSION\\_DE\\_ACERO\\_DE\\_CONSTRUCCI%C3%93N\\_EN\\_SOLUCI%C3%93N\\_SIMULADA\\_DE\\_PORO](https://www.academia.edu/894019/CORROSION_DE_ACERO_DE_CONSTRUCCI%C3%93N_EN_SOLUCI%C3%93N_SIMULADA_DE_PORO)

- [34] R. W. Bosch, J. Hubrecht, W. F. Bogaerts, y B. C. Syrett, «Electrochemical Frequency Modulation: A New Electrochemical Technique for Online Corrosion Monitoring», *CORROSION*, vol. 57, n.º 1, pp. 60-70, ene. 2001, doi: 10.5006/1.3290331.
- [35] I.-S. Yoon, E. Schlangen, M. R. De Rooij, y K. Van Breugel, «The effect of cracks on chloride penetration into concrete», *Key Eng. Mater.*, vol. 348-349, pp. 769-772, 2007, doi: 10.4028/0-87849-448-0.769.
- [36] W. A. Al-Khaja, «Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes», *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, n.º 1, pp. 9-13, feb. 1997, doi: 10.1016/S0950-0618(97)00004-4.

## Anexos

ANEXO 01: Validación de ensayos de laboratorio

**UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL AMBIENTAL**  
**LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIENTOS**

INFORME N° LEM USAT 032-2023-II

FECHA: 27 de octubre 2023

## VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

**ESTUDIANTE:** LEANDRO MUÑOICO ORTIZ

**TITULO DE LA TESIS:** Influencia de la concentración de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en concreto

El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil Ambiental, verifica y da conformidad que los siguientes ensayos de laboratorio realizados por el indicado estudiante se han efectuado en las instalaciones de la USAT, asimismo valida los ensayos realizados fuera de nuestras instalaciones siempre que no se puedan realizar en esta universidad:

- Contenido de humedad
- Granulometría de Agregado Fino
- Granulometría de Agregado Grueso
- Pesos unitarios
- Peso específico y absorción
- Resistencia a la compresión

Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.

Observación: Adjunto

Henry Rivadeneyra Oblitas  
 Responsable de Lab Ing. Civil Ambiental

*Henry Rivadeneyra Oblitas*  
 RIVADENEYRA OBLITAS HENRY  
 TÉCNICO DE LABORATORIO




**ANEXO 01: Ensayo de los agregados****Contenido de Humedad**

USAT UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO		FIGHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD : N.T.P. 339.185</b>					
<b>Formato Interno</b>					
<b>Título</b>	: Influencia de concentraciones de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en concreto				
<b>Tesista</b>	: Leandro Muñoz Ortiz				
<b>Asesor</b>	: Elmer Rolando Polo Briceño				
<b>Universidad</b>	: UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO				
<b>Ubicación</b>	: Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.				
<b>Fecha de emisión</b>					
<b>Arena <math>((A+B)/2)/(1+(C.H./100))</math></b>		<b>Grava</b>			
1.- Peso de la muestr. húmeda	413.7	413.7	1.- Peso de la muestr. húmeda	5395.2	5395.2
2.- Peso de la muestra seca	407.2	407.2	2.- Peso de la muestra seca	5378.3	5378.3
3.- Cont. Humedad	1.60	1.60	3.- Cont. Humedad	0.31	0.31
4.- Promedio		1.60	4.- Promedio		0.31

OBSERVACIONES :

- El presente documento no deberá ser reproducido sin la autorización escrita del laboratorio.


  
 LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO Y ENSAYOS DE MATERIALES

Rueda de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo  
**TÉCNICO DE LABORATORIO**



**FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

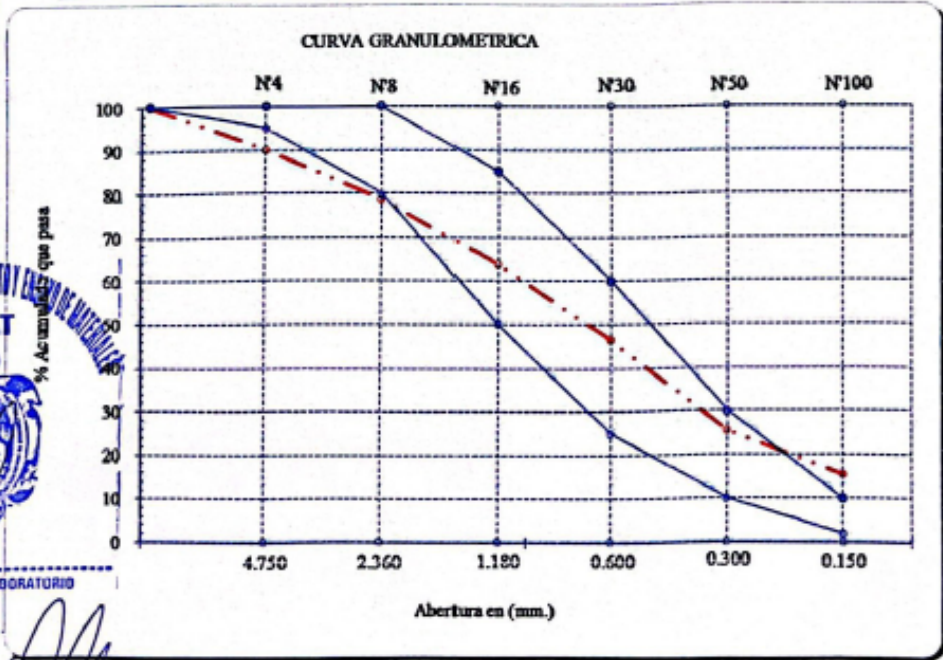
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO (ASMT C136, NTP 400.037)**

**Formato Interno**

Título : Influencia de concentraciones de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado  
 Tesista : Leandro Muñoz Ortiz  
 Asesor : Elmer Rolando Polo Briceño  
 Universidad : UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 Ubicación : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.  
 Fecha de emisión :

Cantera : Cantera La Victoria - Pát P. Inicial H. 500.0  
 P. Inicial S. 492.2 % = 1.6

Malla		Peso Ret.	(% Ret.)	(% Acum. Ret.)	(% Acum. Que Pasa)	Especificaciones:	
Pulg.	(mm.)						
1/2"	12.700	0	0.0	0.0	100.0	100	100
3/8"	9.500	1.1	0.2	0.2	99.8	100	100
Nº 04	4.750	48	9.8	10.0	90.0	95	100
Nº 08	2.360	56.1	11.4	21.4	78.6	80	100
Nº 16	1.180	72.6	14.8	36.1	63.9	50	85
Nº 30	0.600	86.2	17.5	53.6	46.4	25	60
Nº 50	0.300	102.4	20.8	74.4	25.6	10	30
Nº 100	0.150	50.1	10.2	84.6	15.4	2	10
Fondo		75.7	15.4	100.0	0.0		
Módulo de Fineza				2.804			
Abertura de malla de referencia				9.500			



**OBSERVACIONES :**

El presente documento no deberá ser reproducido sin la autorización escrita del laboratorio.

Rivadeneiro Jolitas Henry  
 TÉCNICO DE LABORATORIO



**FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

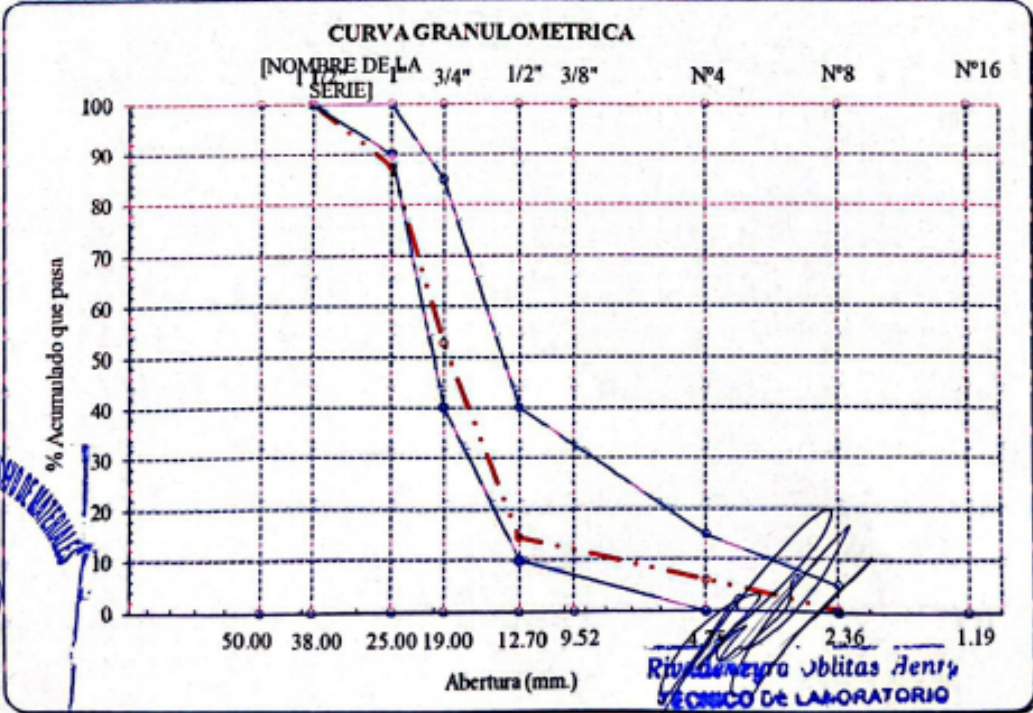
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO (ASMT C136, NTP 400.037)**

**Formato Interno**

Título : Influencia de concentraciones de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado  
 Tesista : Leandro Muñoz Ortiz  
 Asesor : Elmer Rolando Polo Briceño  
 Universidad : UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 Ubicación : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.  
 Fecha de emisión :

Cantera : Cantera Tres Tomas - Ferreñafe P. Inicial H. 5395.2  
 P. Inicial S. 5378.3 % = 0.31

Malla		Peso	(%)	(%) Acum.	(%) Acum.	Especificaciones
Pulg.	(mm.)	Ret.	Ret.	Ret.	Que Pasa	
2"	50.00	0.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2"	38.00	0.0	0.0	0.0	100.0	
1"	25.00	673.0	12.5	12.5	87.5	
3/4"	19.00	1861.1	34.6	47.1	52.9	
1/2"	12.70	2069.9	38.5	85.6	14.4	
3/8"	9.52	446.7	8.3	93.9	6.1	
Nº 04	4.75	311.7	5.8	99.7	0.3	
Nº 08	2.36	7.1	0.1	99.8	0.2	
Nº 16	1.19	0.0	0.0	99.8	0.2	
Fondo		8.8	0.2	100.0	0.0	
Tamaño Maximo			1"	38.00		
Tamaño Maximo Nominal			3/4"	25.00		



**OBSERVACIONES :**

El presente documento no deberá ser reproducido sin la autorización escrita del laboratorio.

## Pesos unitarios



## FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

PESO UNITARIO : N.T.P. 400.017

## Formato Interno

Título : Influencia de concentraciones de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en concreto

Testista : Leandro Muñoz Ortiz

Asesor : Elmer Rolando Polo Briceño

Universidad : UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

Ubicación : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.

Fecha de emisión

SUELTO	A	B
- Peso de la muestra húmeda	3123	3146
- Volumen del molde		0.00212
- Peso unitario suelto húmedo		1476
- PESO UNIT. SUELTO SECO		1453
<b>COMPACTADO</b> $\left(\frac{((A+B)/2)/V}{1000}\right) / (1+(C.H./100))$		
- Peso de la muestra húmeda	3565	3561
- Volumen del molde		0.002123
- Peso unitario suelto húmedo		1678
- PESO UNIT. COMPACTADO SECO		1652

SUELTO		
- Peso de la muestra húmeda	7645	7726
- Volumen del molde		0.00544
- Peso unitario suelto húmedo		1412
- PESO UNIT. SUELTO SECO		1407
<b>COMPACTADO</b>		
- Peso de la muestra húmeda	8494	8435
- Volumen del molde		0.00544
- Peso unitario suelto húmedo		1555
- PESO UNIT. COMPACTADO SECO		1550

## OBSERVACIONES

- El presente documento no deberá ser reproducido sin la autorización escrita del laboratorio.

Rolando Polo Briceño  
TÉCNICO DE LABORATORIO



TÉCNICO DE LABORATORIO


**FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS**
**PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN : N.T.P. 400.021 (Arena) / N.T.P. 400.022 (Piedra)**
**Formato Interno**

Título : Influencia de concentraciones de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en concreto

Tesista : Leandro Muñoz Ortiz

Asesor : Elmer Rolando Polo Briceño

Universidad : UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

Ubicación : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.

Fecha de emisión

1.- Peso de la Muest. Sat. Sup. Seca.	g	500.0	500.0	500.0
2.- Peso de la Muest. Sat. Sup. Seca + Peso frasco + Peso del agua.	g	992.7	992.7	
3.- Peso de la Muest. Sat. Sup. Seca + Peso del frasco.	(1+5) g	684.0	684.0	
4.- Peso del Agua.	(2-3) g	308.7	308.7	308.7
5.- Peso del Frasco	g	184.0	184.0	
6.- Peso de la Muest. secada ahorno + Peso del frasco.	(5+7) g	679.3	679.2	
7.- Peso de la Muest. seca en el horno.	g	495.3	495.2	495.3
8.- Volumen del frasco.	cm <sup>3</sup>	500.0	500.0	500.0

**B.- Resultados**
**Promedio**

A.- PESO ESPECIFICO DE LA ARENA.	7/(8-4)	g/cm <sup>3</sup>	2.589	2.589	2.589
B.- PESO ESPECIFICO DE LA MASA S.S.S.	7/(7-4)	g/cm <sup>3</sup>	2.614	2.614	2.614
C.- PESO ESPECIFICO APARENTE	7/((8-4)-(8-7))	g/cm <sup>3</sup>	2.654	2.655	2.655
D.- PORCENTAJE DE ABSORCIÓN.	((1-7)/7)*100	%	0.95	0.97	0.96

**A.- Datos de la grava**

1.- Peso de la muestra seca al horno	g	1291	1291	1291.0
2.- Peso de la muestra saturada superficialmente seca	g	1304	1304	1304.0
3.- peso de la muestra saturada dentro del agua + peso de la canastilla	g	1600	1600	
4.- Peso de la canastilla	g	791	791	
5.- Peso de la muestra saturada dentro del agua	(3-4) g	809	809	809.0

**B.- Resultados**
**Promedio**

A.- PESO ESPECIFICO DE LA GRAVA.	1/(2-5)	g/cm <sup>3</sup>	2.608	2.608	2.608
B.- PESO ESPECIFICO DE LA MASA S.S.S.	2/(2-5)	g/cm <sup>3</sup>	2.634	2.634	2.634
C.- PESO ESPECIFICO APARENTE	1/(1-5)	g/cm <sup>3</sup>	2.678	2.678	2.678
D.- PORCENTAJE DE ABSORCIÓN.	((2-1)/1)*100	%	1.01	1.01	1.01

  
**Rivaldo Obitias Henry**  
 TÉCNICO DE LABORATORIO


LABORATORIO DE VIDRIO, CONCRETO Y CEMENTO DE MATERIAS  
**USAT**


**OBSERVACIONES :**

- El presente documento no deberá ser reproducido sin la autorización escrita del laboratorio.

TÉCNICO DE LABORATORIO

**ANEXO 03: Resistencia a la compresión**

 <b>FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b>					
<b>Tesista</b>	: Muñico Ortiz Leandro				
<b>Atención</b>	: Escuela de Ingeniería Civil Ambiental				
<b>Tesis</b>	: "Influencia de concentraciones de cloruro de sodio sobre la velocidad de corrosión del acero ASTM A615 galvanizado embebido en concreto"				
<b>Lugar</b>	: Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.				
<b>Fecha de emisión</b>	: Chiclayo, 13 de Mayo del 2023				
Código : N.T.P. 339.034 - 2008 / ASTM C-39/39M - 05 Título : HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas					
Muestra Nº	Denominación ó descripción del vaciado	Fecha de Vaciado	Fecha de Ensayo	Dias	f <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>
01	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	01/04/2023	7	126
02	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	01/04/2023	7	111
03	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	01/04/2023	7	116
04	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	08/04/2023	14	189
05	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	08/04/2023	14	174
06	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	08/04/2023	14	184
07	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	22/04/2023	28	223
08	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	22/04/2023	28	210
09	CONCRETO 210 kg/cm <sup>2</sup>	25/03/2023	22/04/2023	28	202
<b>OBSERVACIONES :</b> - Muestreo realizados por el solicitante.  - El presente documento no deberá ser reproducido sin la autorización escrita del laboratorio.					

*[Firma]*  
 RIVERA Obdilia Henry  
 TÉCNICO DE LABORATORIO



**ANEXO 04: Metalografía**

Universidad Nacional de Trujillo

Análisis Metalográfico

**INFORME DE ENSAYO****Solicitado por:** Leandro Muñoz Ortiz**Fecha de Emisión:** 16-05-2023

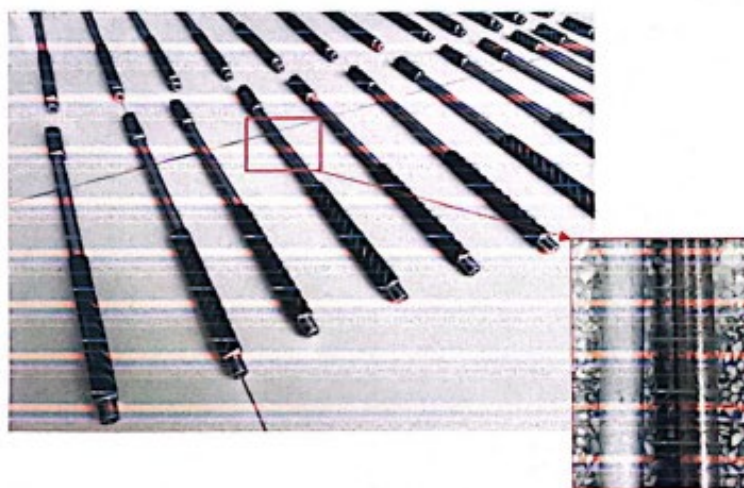
*Dr. Néstor Emerson Zavalata Gutiérrez*  
Dr. Néstor Emerson Zavalata Gutiérrez

**1. CONDICIONES DE ENSAYO**

- **Tipo de ensayo:** Metalográfico
- **Fecha de ejecución:** 10-05-2023
- **Material:** Acero ASTM A615 Galvanizado y sin Galvanizar

**2. TOMA DE MUESTRAS**

- Las muestras ensayadas fueron proporcionadas por el solicitante



*Rivendreyro Oblitas Henry*  
Rivendreyro Oblitas Henry  
TECNICO DE LABORATORIO

Laboratorio de corrosión y protección de metales

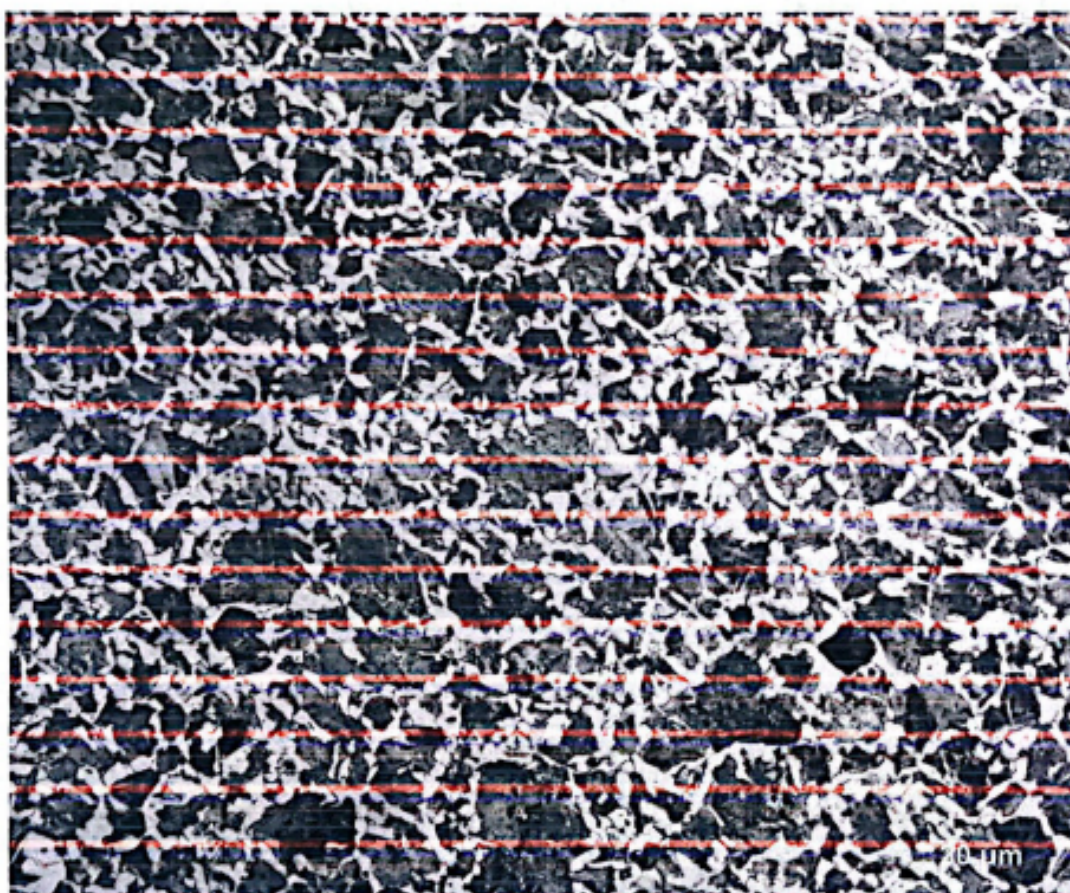


### ENSAYO METALGRÁFICO

**MUESTRA 1:** Observación de acero de medio carbono (0.386%C-0.200%Si-0.929%Mn-0.036%P-0.037%S). Según la composición proporcionada por solicitante estaría dentro de la norma ASTM A615.

**Reactivo de Ataque:** Nital 3%

**FECHA DE EJECUCIÓN:** 10-05-2023



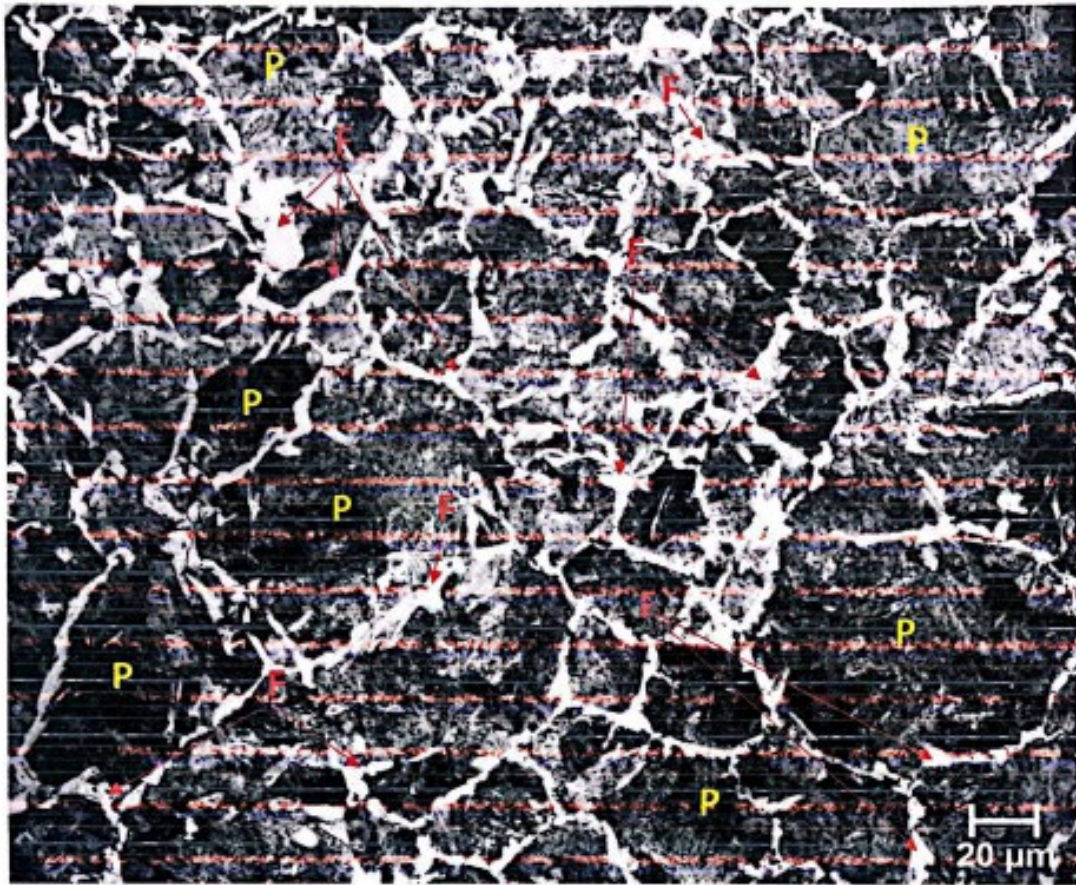
**Microestructura:** Fotomicrografía de la microestructura del acero ASTM A615 grado 60, aumento de 10x



*Rivadeneiro Oblitas Henry*  
**Rivadeneiro Oblitas Henry**  
 TÉCNICO DE LABORATORIO



*gpe*  
Dr. Villegas Emerson Zavaleta Gutiérrez



**Microestructura: (F): Ferrita ( $\alpha$ ) y (P): Perlita ( $\text{Fe}_3\text{C} + \alpha$ ), aumento de 50x**



*Riviera*  
Riviera Obilitas Henry  
TÉCNICO DE LABORATORIO

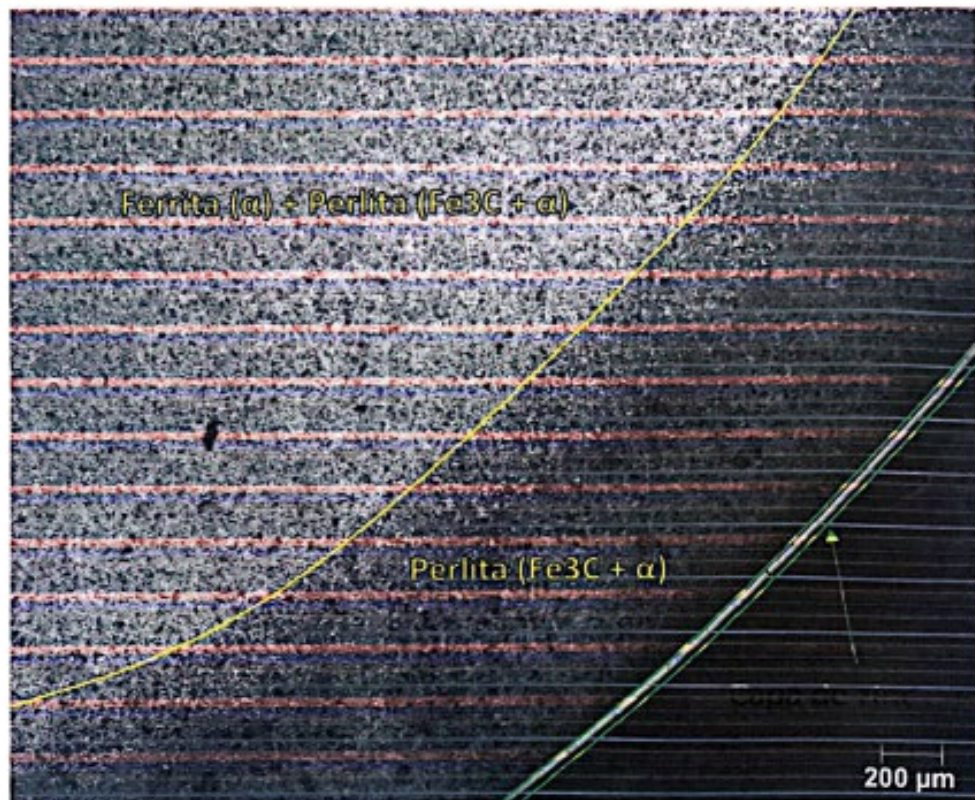


### ENSAYO METALGRÁFICO

**MUESTRA 2:** Observación de acero de medio carbono, galvanizado en caliente (0.386%C-0.200%Si-0.929%Mn-0.036%P-0.037%S).

**Reactivo de Ataque:** Nital 3%

**FECHA DE EJECUCIÓN:** 10-05-2023



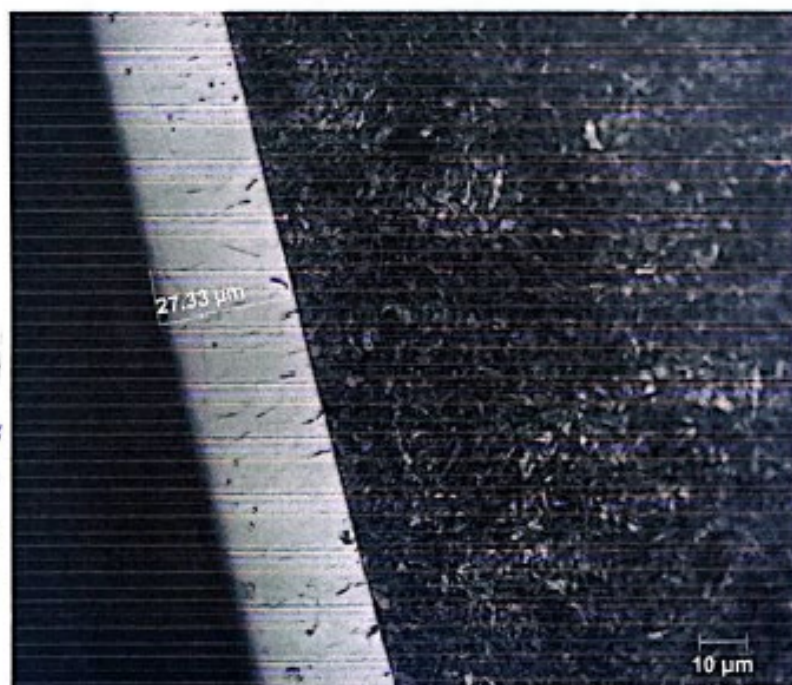
**Galvanizado en Caliente:** Se aprecia la capa del recubrimiento sobre el sustrato, aumento de 5x



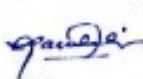
*[Handwritten Signature]*  
 Ronda para el área de  
 TECNOLÓGICO DE TRUJILLO




**Microestructura:** Fotomicrografía de la microestructura del acero ASTM A615 grado 60, aumento de 10x, tiempo de ataque 30 segundos para identificación del sustrato.



**Microestructura:** Fotomicrografía de la microestructura del acero ASTM A615 grado 60, aumento de 10x, tiempo de ataque 1 minuto para identificación del recubrimiento.

  
 Dr. Nilthon E. Zavaleta Gutiérrez  
 Laboratorio de Corrosión - UNT

  
 Ricardo José Ables Jents  
 Laboratorio de Corrosión y protección de metales

ANEXO 04: Análisis de iones cloruro, iones sulfato y PH



**ANALISIS DE IONES CLORURO, IONES  
SULFATO Y pH**

29 de abril del 2023

  
Rivaldo Neyro Oblitas Henry  
TÉCNICO DE LABORATORIO



**1. SERVICIO:**

- Determinar la concentración (ppm) de iones cloruro, iones sulfato y pH en tres muestras líquidas.

**2. MÉTODOS APLICABLES:**

- ASTM D 512: Métodos de prueba estándar para ion de cloruro en agua
- ASTM D 516: Método de prueba estándar para iones sulfato en agua

**3. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO:**

- 18-21 de abril del 2023.

**4. EQUIPO:**

- Espectrofotómetro UV-Visible, +580 PG Instruments Ltd.
- pHmetro Metrohm 827 pH lab.

**5. RESULTADOS Y OBSERVACIONES**

- **Tabla 01.** Determinación de concentración de iones cloruro de muestras líquidas suministradas.

Nº	MUESTRA	Código de muestras replicas	Concentración de iones cloruro de muestras replicas (ppm)	Concentración promedio de iones cloruro por muestras (ppm)
1	Sector San Francisco - Carretera a Pomalca - Pozo tubular	a	446.83	452
		b	455.77	
		c	452.79	
2	Terminal Gacelo Pozo	a	339.59	342
		b	345.55	
		c	341.08	
3	Calicata Pimentel - I	a	72415.77	71929
		b	70467.37	
		c	72902.87	
4	Calicata Pimentel - II	a	78910.46	78802
		b	79559.93	
		c	77936.26	



*Rhianeyra Jbítas Henry*  
TÉCNICO DE LABORATORIO



- **Tabla 02.** Determinación de concentración de iones sulfato de muestras líquidas suministradas.

Nº	Muestra	Alicuota de muestra (ml)	Volumen de muestra aforada (ml)	ABS	Concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ en la muestra aforada (ppm)	Concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ en la muestra suministrada (ppm)	Concentración promedio de $\text{SO}_4^{2-}$ (ppm)
1	Sector San Francisco - Carretera a Pomalca - Pozo tubular	10	100	0.2273	33.5441	335	341
		10	100	0.2303	33.9852	340	
		10	100	0.2353	34.7205	347	
2	Terminal Gacelo Pozo	10	100	0.2143	31.6323	316	324
		10	100	0.2213	32.6617	327	
		10	100	0.2223	32.8088	328	
3	Calicata Pimentel - I	0.2	100	0.069	10.3088	5154	5277
		0.2	100	0.072	10.7500	5375	
		0.2	100	0.071	10.6029	5301	
4	Calicata Pimentel - II	0.2	100	0.087	12.9558	6478	6551
		0.2	100	0.089	13.2500	6625	
		0.2	100	0.088	13.1029	6551	

- **Tabla 03.** Determinación del pH de muestras líquidas suministradas.

Nº	MUESTRA	pH
1	Sector San Francisco - Carretera a Pomalca - Pozo tubular	7.33
2	Terminal Gacelo Pozo	7.34
3	Calicata Pimentel - I	8.30
4	Calicata Pimentel - II	8.25



Ruindey...  
TÉCNICO DE LABORATORIO

## ANEXOS:



**Figura 1.** Medición del pH de la muestra Sector San Francisco - Carretera a Pomalca - Pozo tubular (1), en el equipo Metrohm 827 pH lab.



**Figura 2.** Medición del pH de la muestra Terminal Gacelo Pozo (2), en el equipo Metrohm 827 pH lab.



*Rivendeyra Jblitas Henry*  
TÉCNICO DE LABORATORIO

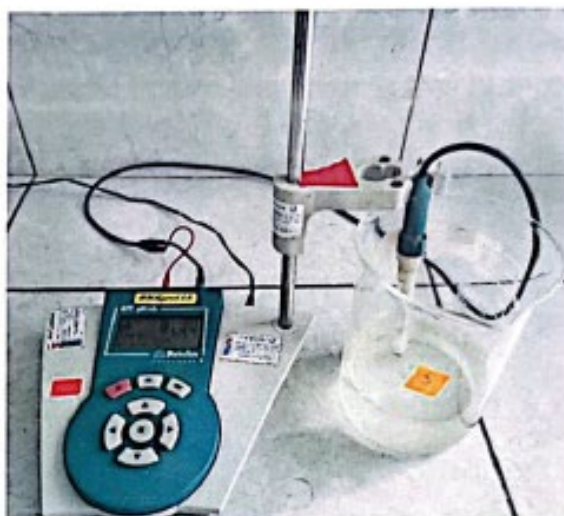



Figura 3. Medición del pH de la muestra Calicata Pimentel - I (3), en el equipo Metrohm 827 pH lab.

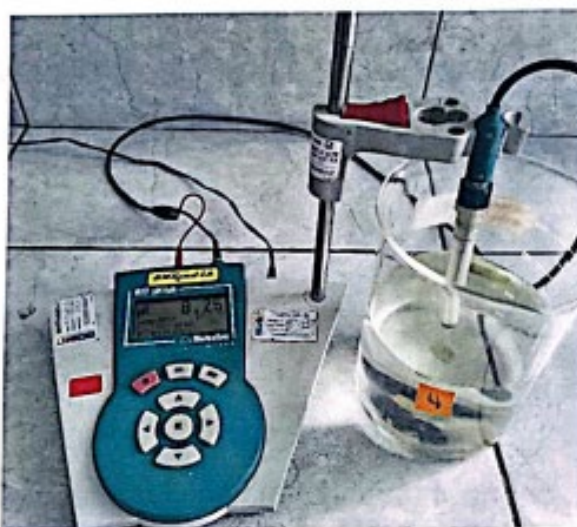


Figura 4. Medición del pH de la muestra Calicata Pimentel - II (4), en el equipo Metrohm 827 pH lab.



*Rivendreyra Jbilitas Jenny*  
 TÉCNICO DE LABORATORIO



Figura 5. Medición de la absorbancia en el espectrofotómetro UV-V T80+, PG Instruments Ltd.

Santos Dionicio Otiniano Méndez  
Ingeniero de Materiales



Rivas Castro Obdilas Henry  
TÉCNICO DE LABORATORIO

**ANEXO 05: Certificado de calidad de recubrimiento en los aceros**

**EMPRESA:** MUÑOICO ORTIZ LEANDRO  
**REFERENCIAS :** OT 10022369  
**N° DE CERTIFICADO :** 000001482023  
**FECHA DE INSPECCIÓN:** 7 de Febrero de 2023  
**CANTIDAD DE PIEZAS:** 12 piezas metálicas  
**ENSAYOS REALIZADOS:** ACEROS  
 Medición de Espesor de Recubrimiento  
 Prueba de Adherencia  
**EQUIPO UTILIZADO:** Medidor de Espesores Marca Elcometer. Serie: TH23796  
 N° de Certificado de Calibración: MT-5222-2022

**RESULTADOS OBTENIDOS:**

Descripción del material	Control Superf.	Control de Recubrt. (µm)			Prom. Gen. Re- pubt. (µm)	(g/m2)	Prue. Adher.
		Prom. 1	Prom. 2	Prom. 3			
ACEROS 5/8	C	156.67	159.67	157.33	157.89	1115.60	C

**CERTIFICADO DE CALIDAD DEL ZINC:**

N° de Lote: 2211C38319

**LEYENDA:**

LEYENDA: C: Conforme

**PROFUNDIMIENTOS APLICADOS:**

Norma: ASTM A-123 VERSIÓN 2015



*Rivadeneira Oblitas Henry*  
**TÉCNICO DE LABORATORIO**

Galvanometal Perú S.A.C.  
*Alexis Arce Quispe*  
**ALEXIS ARCE QUISPE**  
 Supervisor de Control de Calidad

Este certificado es válido para garantizar el espesor de recubrimiento conforme a la norma ASTM A-123; aspecto superficial siempre y cuando cumplan con las condiciones de ingreso adecuadas para un óptimo galvanizado según formato Lista de verificación de ingreso - OP-009-FOOP y cotización respectiva.

Este certificado no es válido para materiales que han sido modificados (cortes, soldadura, perforado, doblés, etc.) después de galvanizado.

Mz. "E" Lt. 3 (Entre Calle 7 y 14) Urb. Las Vertientes - Villa El Salvador - Lima - Perú

Telfs.: 715 - 0546 / 715 - 0547 / RPE: 981 568 319 / 981 568 331

✉: [ventas@galvanometalperu.com](mailto:ventas@galvanometalperu.com) / Web: [www.galvanometalperu.com](http://www.galvanometalperu.com)

ANEXO 06: Certificado de calibración – Patrón de espesor

**INACAL**  
Instituto Nacional  
de Calidad  
Metrología

**Certificado de Calibración****LLA - 456 - 2021****Laboratorio de Longitud y Angulo**

Página 1 de 4

Expediente	1045098	<p>Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)</p> <p>La Dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrológicas a solicitud de los interesados, promueve el desarrollo de la metrología en el país y contribuye a la difusión del Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú. (SLUMP).</p> <p>La Dirección de Metrología es miembro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y participa activamente en las Intercomparaciones que éste realiza en la región.</p> <p>Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.</p>
Solicitante	METRINDUST S.A.C.	
Dirección	Calle Los Jazmines Mz.g Lt.13 Co. Talavera De La Reyna- El Agustino	
Instrumento de Medición	PATRÓN DE ESPESOR	
Valor Nominal	23,2 $\mu\text{m}$ ; 50,5 $\mu\text{m}$ ; 122,5 $\mu\text{m}$ ; 253,2 $\mu\text{m}$ ; 484 $\mu\text{m}$ ; 968 $\mu\text{m}$	
Marca	ELCOMETER	
Modelo	T99022255-1 ( * )	
Número de Serie	LA-12 ( ** )	
Fecha de Calibración	2021-11-30 al 2021-12-01	

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de Metrología del INACAL. Certificados sin firma digital y sello carecen de validez.

	Responsable del área	Responsable del laboratorio
		
	Dirección de Metrología	Dirección de Metrología

Instituto Nacional de Calidad - INACAL  
Dirección de Metrología  
Calle Los Cameros 17, San Isidro, Lima - Perú  
Tel.: (01) 611-0227 Anexo 1501  
Email: metrologia@inacal.gob.pe  
Web: www.inacal.gob.pe

TÉCNICO DE LABORATORIO

Puede verificar el número de certificado en la página:  
<https://aplicaciones.inacal.gob.pe/dm/verificar/>

*Rafael Obilias Henry*  
TÉCNICO DE LABORATORIO



**INACAL**  
Instituto Nacional  
de Calidad

Metrología

Laboratorio de Longitud y Ángulo

## Certificado de Calibración LLA – 456 – 2021

Página 2 de 4

### Método de Calibración

Determinación del error de medición del instrumento de medición por el método de comparación.

### Lugar de Calibración

Laboratorio de Longitud y Ángulo  
Calle De La Prosa N° 150 - San Borja, Lima

### Condiciones Ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental	19,7 °C	20,0 °C

### Patrones de referencia

Trazabilidad metrológica	Patrón de medición	Documento de calibración
Patrones de Trimos Laser 5519A	Comparador Horizontal de Longitud LA 05 027 con incertidumbre de 0,2 $\mu\text{m}$ + 0,78 $\mu\text{m}/\text{m}$	N° 41319 2017-10-10

### Observaciones

Con fines de identificación se ha colocado una etiqueta autoadhesiva de color verde INACAL-DM.

(\*) Dato dado en el estuche que los contiene.

(\*\*) El instrumento de medición no tiene número de serie. Esta identificación se encuentra pintada sobre el estuche que los contiene.

Rivudo Aguirre  
TÉCNICO DE LABORATORIO



Instituto Nacional de Calidad - INACAL  
Dirección de Metrología  
Calle Las Camelias N° 817, San Isidro, Lima - Perú  
Telf: (01) 640-8820 Anexo 1501  
email: metrologia@inacal.gob.pe  
WEB: www.inacal.gob.pe

TÉCNICO DE LABORATORIO



**INACAL**  
Instituto Nacional  
de Calidad

Metrología

Laboratorio de Longitud y Angulo

## Certificado de Calibración LLA – 456 – 2021

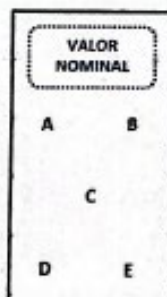
Página 3 de 4

### Resultados de Medición

DETERMINACIÓN DE LOS ESPESORES DE LOS PATRONES										
NÚMERO DE SERIE	VALOR NOMINAL ( $\mu\text{m}$ )	VALOR MEDIDO EN CADA POSICIÓN ( $\mu\text{m}$ )					VALOR PROMEDIO MEDIDO ( $\mu\text{m}$ )	ERROR DE MEDICIÓN ( $\mu\text{m}$ )	INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN ( $\mu\text{m}$ )	ERROR MÁXIMO PERMITIDO (***) $\pm$ ( $\mu\text{m}$ )
		A	B	C	D	E				
VA09812	23,2	23,0	23,2	23,1	23,0	23,2	23,1	0,1	0,34	0,5
XB25269	50,5	50,3	50,7	50,5	50,4	50,5	50,4	0,1	0,34	0,5
VA10062	122,5	122,5	121,7	122,0	122,7	124,0	122,6	-0,1	0,62	1,2
UL25352	253,2	251,7	251,5	251,6	251,6	251,4	251,5	1,7	0,38	2,5
UL24627	484	482,2	483,8	483,0	484,6	485,2	483,8	0,2	0,79	4,8
XB32806	966	965,4	965,7	967,0	967,2	966,7	966,4	1,6	0,74	0,6

(\*\*\*) Los patrones de espesores tienen un error máximo permitido de  $\pm 1\%$ . Los patrones de espesores con valores menores a  $50\ \mu\text{m}$  tiene un error máximo permitido de  $\pm 0,5\ \mu\text{m}$ ; según especificaciones del fabricante.

#### GRÁFICO REFERENCIAL DE LAS POSICIONES MEDIDAS EN EL PATRÓN DE ESPESOR



*Rivandero Juntas Jentz*  
TÉCNICO DE LABORATORIO



ANEXO 07: Certificado de calibración – Medidor de espesor de recubrimiento

**LABORATORIO DE CALIBRACIÓN  
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD  
NTP-ISO/IEC 17025**

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN**

EXPEDIENTE : EXP - 0438 - 2022

SOLICITANTE : GALVANOMETAL PERU S.A.C

Dirección : Cal. Entre Calle 7 Y 14 Mza. E Lote. 3 Coa. Las  
Vertientes Lima - Lima - Villa El Salvador

**INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : MEDIDOR DE ESPESOR DE  
RECUBRIMIENTO**

Marca : Elcometer  
Modelo : 456S  
N° de serie : TH23796  
Alcance de indicación : 60 mils/thou  
División de escala : 0,01 mils/thou / 0,1 mils/thou  
Tipo de indicación : Digital  
Código de identificación : No indica  
Procedencia : Gran Bretaña  
Ubicación : No indica

**FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN**

Fecha de calibración : 2022 - 08 - 31  
Fecha de emisión : 2022 - 08 - 31  
Lugar de calibración : Laboratorio de Longitud /  
METRINDUST S.A.C.

**MÉTODO DE CALIBRACIÓN**

Para la calibración se tomo como referencia los procedimientos PC-029  
"Procedimiento para la calibración de medidores de espesores por ultrasonido"  
Primera edición 2019 INACAL - DM.

**N° DE CERTIFICADO****MT - 5222 - 2022**

METRINDUST S.A.C. Departamento de Metrología realiza calibraciones y certificaciones en metrología según procedimientos de calibración validados o normalizados.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al cliente recalibrar sus instrumentos y equipos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

METRINDUST S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este equipo, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados. El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.



*Dennis Gamboa Rodríguez*  
Dennis Gamboa Rodríguez  
Gerente Técnico

*Rivadeneira*  
Rivadeneira  
TÉCNICO DE LABORATORIO

Página 1 de 2

www.metrindust.com.pe

informes@metrindust.com.pe

Calle Los Jazmines Mz. G Lt. 13  
El Agustino, Lima

915972598 | 917607794  
998699562 | 925033922 | 945111762

**CCL** ASOCIADO  
CÁMARA DE COMERCIO - AIMA

Certificado : MT - 5222 - 2022

**CONDICIONES AMBIENTALES**

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
Temperatura	20,1 °C	20,1 °C
Humedad Relativa	56,0 %hr	56,0 %hr

**TRAZABILIDAD**

TRAZABILIDAD	PATRÓN DE TRABAJO	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Patrones de referencia de INACAL - DM	Láminas patrón	LLA - 456 - 2021

**RESULTADOS DE MEDICIÓN**

VALOR REFERENCIAL ( milésimos )	INDICACIÓN DEL EQUIPO ( milésimos )	CORRECCIÓN ( milésimos )	INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN ( milésimos )
0,91	0,93	-0,02	0,02
1,99	1,95	0,04	0,02
4,82	4,81	0,01	0,05
9,97	9,9	0,07	0,05
19,06	18,9	0,16	0,06
38,11	38,3	-0,19	0,09

**OBSERVACIONES**

La sonda del equipo tiene de tipo: F1, Serie: XH00209; Alcance: 63 milésimos.

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva (CALIBRADO).

**INCERTIDUMBRE**

La incertidumbre expandida reportada es la incertidumbre combinada multiplicada por el factor de cobertura ( $k = 2$ ) de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %.

\*\* FIN DEL DOCUMENTO \*\*



*Rivadeneira Julietta Jenny*  
TÉCNICO DE LABORATORIO

Página 2 de 2

***ANEXO 07: Registro de mediciones de potencial promedio por ambiente***

<b>PARA LAS Y (sin NaCl en su diseño de mezcla)</b>				
<b>CuSO<sub>4</sub></b>				
<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>TIEMPO DE EXPOSICIÓN</b>
mV vs Cu/CuSO4	mV vs Cu/CuSO4	mV vs Cu/CuSO4	mV vs Cu/CuSO4	cada 6 Días
0.0 g/l (Y1,Y2,Y3)	0.806 g/l (Y4,Y5,Y6)	78.802 g/l (Y7,Y8,Y9)	166.495 g/l (Y10,Y11,Y12)	
-399	-443	-601	-555	1
-414	-416	-619	-639	2
-443	-518	-648	-651	3
-463	-441	-632	-630	4
-484	-363	-616	-609	5
-567	-441	-658	-657	6
-534	-468	-654	-653	7
-517	-481	-652	-651	8
-500	-495	-651	-649	9
-451	-498	-658	-658	10
-401	-502	-665	-667	11
-401	-502	-665	-667	12
-461	-453	-648	-587	13
-491	-429	-640	-547	14
-506	-417	-636	-527	15
-514	-411	-634	-517	16
-521	-405	-632	-507	17
-377	-393	-618	-517	18
-232	-381	-604	-527	19
-210	-424	-647	-581	20
-249	-496	-718	-659	21
-157	-243	-370	-533	22
-270	-125	-433	-460	23
-240	-190	-360	-520	24
-238	-180	-390	-490	25
-265	-182	-372	-482	26
-248	-170	-410	-538	27

<i>PARA LAS Y (sin NaCl en su diseño de mezcla)</i>				
<b>CuSO<sub>4</sub></b>				
<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>TIEMPO DE MEDICIÓN</b>
mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	cada 6 Días
0.0 g/l (Y13,14,15)	0.806 g/l (Y16,17,18)	78.802 g/l (Y19,20,21)	166.495 g/l (Y22,23,24)	
-650	-696	-809	-883	1
-768	-688	-872	-946	2
-810	-980	-1076	-1042	3
-770	-808	-1054	-998	4
-729	-635	-1032	-955	5
-870	-951	-1083	-1004	6
-835	-845	-1000	-963	7
-817	-792	-958	-943	8
-799	-739	-917	-923	9
-856	-916	-991	-743	10
-913	-1094	-1065	-563	11
-913	-1094	-1065	-563	12
-670	-658	-885	-724	13
-548	-440	-795	-805	14
-487	-331	-750	-846	15
-456	-277	-728	-866	16
-426	-223	-706	-886	17
-186	-356	-642	-795	18
55	-490	-578	-703	19
125	-607	-596	-707	20
110	-715	-655	-759	21
-90	-625	-876	-490	22
-305	-425	-876	-490	23
-310	-445	-604	-503.5	24
-316	-485	-502.5	-527	25
-280	-533	-585	-544.5	26
-277	-450	-661	-610	27

<i>PARA LAS X (con NaCL en su diseño de mezcla)</i>				
<b>CuSO<sub>4</sub></b>				
<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>TIEMPO DE EXPOSICIÓN</b>
mV vs Cu/CuSO4	mV vs Cu/CuSO4	mV vs Cu/CuSO4	mV vs Cu/CuSO4	cada 6 Días
0.0 g/l (no hay)	0.806 g/l (X1,2,3)	78.802 g/l (X4,X5,X6)	166.495 g/l (X7,X8,X9)	
-	-	-	-	1
-	-	-	-	2
-	-	-	-	3
-	-	-	-	4
-	-	-	-	5
-	-	-	-	6
-	-	-	-	7
-	-	-	-	8
-	-	-	-	9
-	-	-	-	10
-	-	-	-	11
-	-521	-666	-688	12
-	-504	-605	-541	13
-	-496	-574	-468	14
-	-491	-559	-431	15
-	-489	-552	-413	16
-	-487	-544	-395	17
-	-482	-565	-463	18
-	-476	-586	-532	19
-	-523	-646	-616	20
-	-597	-726	-708	21
-	-125	-546	-515	22
-	-275	-360	-587	23
	-288	-356	-596	24
	-263	-399	-569	25
	-297	-415	-550	26
	-332	-422	-532	27

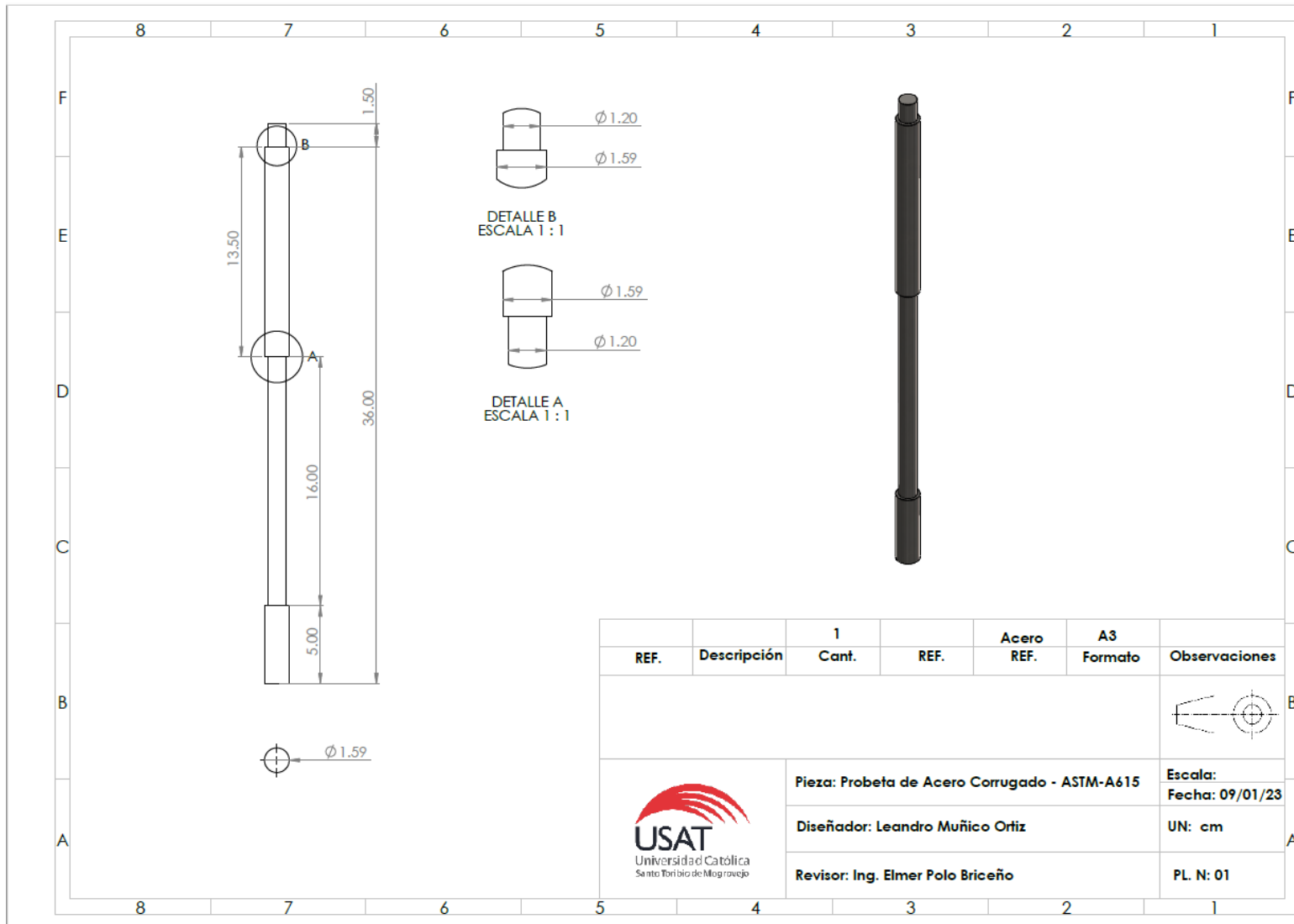
<i>PARA LAS X (con NaCL en su diseño de mezcla)</i>				
<b>CuSO<sub>4</sub></b>				
<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>ECorr</b>	<b>TIEMPO DE EXPOSICIÓN</b>
mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	cada 6 Días
0.0 g/l (no hay)	0.806 g/l (X10,11,12)	78.802 g/l (X13,14,15)	166.495 g/l (X16,17,18)	
-	-	-	-	1
-	-	-	-	2
-	-	-	-	3
-	-	-	-	4
-	-	-	-	5
-	-	-	-	6
-	-	-	-	7
-	-	-	-	8
-	-	-	-	9
-	-	-	-	10
-	-	-	-	11
-	-591	-1172	-1175	12
-	-638	-1150	-1154	13
-	-662	-1139	-1144	14
-	-673	-1134	-1139	15
-	-679	-1131	-1137	16
-	-685	-1129	-1134	17
-	-582	-800	-1111	18
-	-478	-471	-1087	19
-	-476	-356	-1125	20
-	-525	-349	-1194	21
-	-464	-607	-635	22
-	-460	-273	-635	23
	-473	-322.5	-560	24
	-410	-280	-406.5	25
	-367	-241	-314	26
	-310.5	-276.5	-302	27

**ANEXO 08: Registros de mediciones de potencial general**

															CUS04
	Probeta	19/05/2023	25/05/2023	31/05/2023	06/06/2023	12/06/2023	18/06/2023	24/06/2023	30/06/2023	06/07/2023	12/07/2023	18/07/2023	24/07/2023	30/07/2023	05/08/2023
0.0 g/l	Y <sub>1</sub>	399	414	443	463	484	567	534	517	500	451	401	401	461	491
	Y <sub>2</sub>	400	411	439	457	477	559	529	510	491	446	399	399	458	485
	Y <sub>3</sub>	398	417	447	469	491	575	539	524	509	456	403	403	464	497
0.806 g/l	Y <sub>4</sub>	458	481	548	474	400	522	553	569	584	564	544	544	523	513
	Y <sub>5</sub>	428	351	488	407	326	359	383	394	406	433	459	459	384	346
	Y <sub>6</sub>	443	416	518	441	363	441	468	481	495	498	502	502	453	429
78.802 g/l	Y <sub>7</sub>	633	592	650	644	638	647	653	655	658	658	658	658	642	634
	Y <sub>8</sub>	568	646	645	620	594	668	656	649	643	658	672	672	655	646
	Y <sub>9</sub>	601	619	648	632	616	658	654	652	651	658	665	665	648	640
166.495 g/l	Y <sub>10</sub>	566	636	646	625	603	655	656	656	656	660	663	663	554	499
	Y <sub>11</sub>	543	639	655	630	615	657	650	651	641	658	671	667	621	547
	Y <sub>12</sub>	555	641	651	635	609	658	653	645	649	656	667	671	587	595
0.0 g/l	Y <sub>13</sub>	650	768	810	770	729	870	835	817	799	856	913	913	670	548
	Y <sub>14</sub>	654	772	812	776	731	878	842	824	802	863	914	918	677	552
	Y <sub>15</sub>	646	764	808	764	727	862	828	810	796	849	912	908	663	544
0.806 g/l	Y <sub>16</sub>	714	676	980	818	656	850	744	691	638	850	1062	1062	703	524
	Y <sub>17</sub>	677	688	980	808	614	951	946	792	840	916	1125	1094	613	440
	Y <sub>18</sub>	696	700	980	797	635	1051	845	893	739	983	1094	1125	658	357
78.802 g/l	Y <sub>19</sub>	809	872	1076	1054	1032	1083	1000	958	917	991	1065	1065	885	795
	Y <sub>20</sub>	856	1094	1098	1064	1030	1094	1002	955	909	1000	1090	1090	950	880
	Y <sub>21</sub>	762	650	1054	1044	1033	1072	998	961	924	982	1040	1040	821	711
166.495 g/l	Y <sub>22</sub>	883	946	1042	998	955	1004	963	943	923	743	563	563	724	805
	Y <sub>23</sub>	875	914	975	944	913	979	942	924	905	698	490	490	747	875
	Y <sub>24</sub>	890	978	1108	1052	996	1028	985	963	941	788	635	635	702	736
0.806 g/l	X1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	523	507	502
	X2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	521	504	496
	X3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	519	501	490
78.802 g/l	X4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	661	635	622
	X5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	670	575	527
	X6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	666	605	574
166.495 g/l	X7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	693	554	485
	X8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	683	529	451
	X9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	688	541	468
0.806 g/l	X10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	591	638	662
	X11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	596	645	666
	X12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	586	631	658
78.802 g/l	X13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1175	1146	1131
	X14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1169	1155	1148
	X15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1172	1150	1139
166.495 g/l	X16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1175	1154	1144
	X17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1188	1143	1120
	X18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1161	1166	1169

11/08/2023	17/08/2023	23/08/2023	29/08/2023	04/09/2023	10/09/2023	16/09/2023	22/09/2023	28/09/2023	04/10/2023	10/10/2023	16/10/2023	22/10/2023
506	514	521	377	232	210	249	157	270	237	232	260	246
500	509	513	368	227	203	243	153	267	240	238	265	248
512	519	529	386	237	217	255	161	273	243	244	270	250
507	505	502	468	434	467	534	285	145	194	186	188	175
327	317	308	318	327	382	459	200	105	190	180	182	170
417	411	405	393	381	424	496	243	125	186	174	176	165
630	628	626	619	612	659	732	370	410	357	385	365	407
641	639	637	616	595	635	704	370	455	360	390	372	410
636	634	632	618	604	647	718	370	433	363	395	379	413
471	458	444	489	533	605	691	465	420	516	484	476	533
583	517	570	517	520	581	626	533	500	520	490	482	538
527	576	507	545	527	558	659	600	460	524	496	488	543
487	456	426	186	-55	-125	-110	90	305	307	308	275	274
490	461	428	189	-50	-118	-107	98	310	310	316	280	277
484	451	424	183	-60	-132	-113	82	300	313	324	285	280
434	389	344	397	450	527	615	540	390	437	476	528	443
229	277	101	356	530	607	816	625	460	445	485	533	450
331	165	223	316	490	687	715	710	425	453	494	538	457
750	728	706	642	578	596	655	876	876	610	507	588	665
845	828	810	685	560	548	591	750	544	604	502.5	585	661
656	628	601	598	595	644	718	1002	455	598	499	582	657
846	866	886	795	703	707	759	490	490	507	531	551	616
939	971	1003	784	565	506	526	500	435	501	523	539	604
752	761	769	805	841	909	993	480	410	504	527	545	610
497	494	495	491	481	530	603	129	278	288	263	297	332
491	489	487	482	476	523	597	125	275	296	268	300	338
485	484	479	473	471	516	591	121	272	280	258	294	326
616	612	609	611	613	664	740	632	270	359	403	421	428
503	491	479	519	558	628	713	460	450	353	395	409	416
559	552	544	565	586	646	726	546	360	356	399	415	422
450	432	415	484	552	636	728	550	630	603	572	558	537
413	393	374	443	511	595	687	480	544	596	569	550	532
431	413	395	463	532	616	708	515	587	589	566	542	527
673	679	685	582	478	476	525	464	460	473	410	367	311
676	684	687	585	483	483	528	472	465	470	404	362	309
670	674	683	579	473	469	522	456	455	476	416	372	313
1123	1120	1116	788	460	346	339	804	130	327	283	245	283
1145	1143	1141	811	481	366	359	409	415	323	280	241	277
1134	1131	1129	800	471	356	349	607	273	319	277	237	271
1139	1137	1134	1111	1087	1125	1194	635	635	564	413	320	307
1108	1103	1097	1069	1041	1077	1145	540	696	560	407	314	302
1170	1170	1171	1152	1133	1174	1244	730	340	556	401	308	297

**ANEXO 09: Plano de diseño de los aceros:**



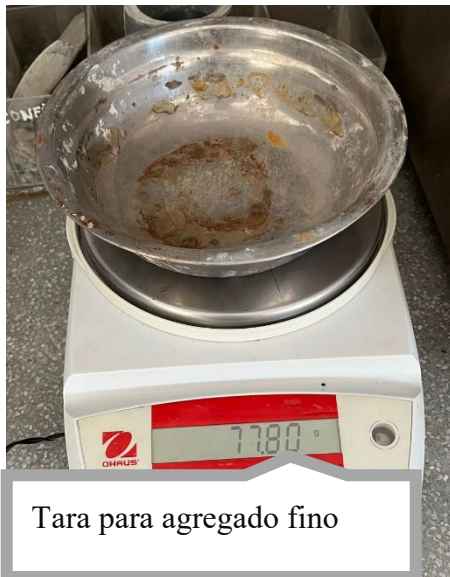
REF.	Descripción	1 Cant.	REF.	Acero REF.	A3 Formato	Observaciones
						
						<b>Escala:</b> Fecha: 09/01/23
						UN: cm
						PL. N: 01



Pieza: Probeta de Acero Corrugado - ASTM-A615  
 Diseñador: Leandro Muñico Ortiz  
 Revisor: Ing. Elmer Polo Briceño

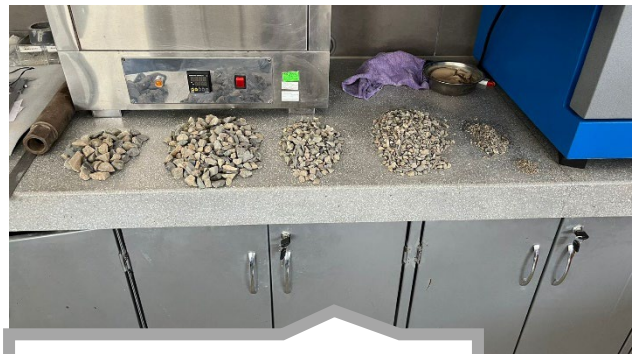
**Panel Fotográfico**

**ANEXO 10: Evidencia fotográfica de ensayos de agregados**





Contenido de tamices para el agregado fino



Contenido de tamices para el agregado grueso



Peso unitario suelto del agregado fino



Peso unitario compactado del agregado fino



Peso unitario suelto del agregado grueso



Peso unitario compactado del agregado grueso

***ANEXO 11: Evidencia fotográfica de obtención y análisis de muestras de agua superficiales***



Pozo de terminal “La Gacela”



Calicata ubicada en Pimentel, a espaldas de Innova Schools



Calicata ubicada en Ciudad del Chofer



Calicata ubicada en Ferreñafe



Medición del pH de la muestra Sector San Francisco-Carretera a Pomalca en el equipo Metrohm 827



Medición del pH de la muestra Terminal Gacela Pozo, en el equipo Metrohm 827.



Medición del pH de la muestra Calicata Pimentel - I, en el equipo Metrohm 827 pH



Medición del pH de la muestra Ferreñafe, en el equipo Metrohm 827 pH.



Medición del pH de la muestra USAT, en el equipo Metrohm 827 pH.



Medición del pH de la muestra Ferreñafe, en el equipo Metrohm 827 pH.



***ANEXO 12:*** Evidencia fotográfica de proceso de recubrimiento con pintura de base zincromato industrial en las zonas que no son de estudio



Brocha a usar para el recubrimiento a los aceros

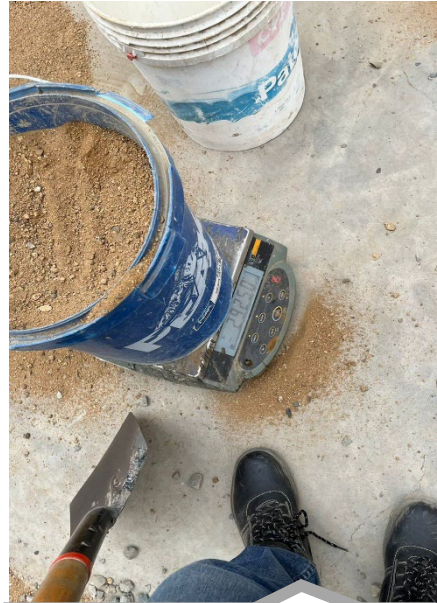


Mezcla de la pintura anticorrosiva con tñer

***ANEXO 13: Evidencia fotográfica de vaciado y curado de probetas***



Pesaje de grava para la  
mezcla



Pesaje de arena para la  
mezcla



Vaciado de la mezcla en  
moldes de 15x30cm



Chuzado de la mezcla



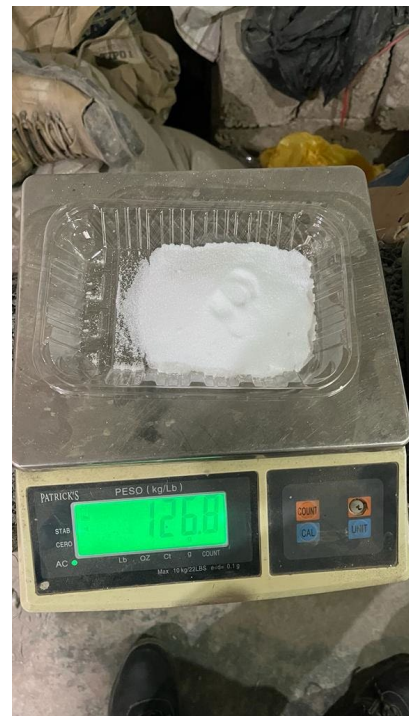
Probetas listas con acero  
incrustado en el centro



Curado de probetas en fosas  
de la USAT



Elaboración de probetas con  
NaCl en su diseño de  
mezcla



**ANEXO 13:** Evidencia fotográfica de rotura de probetas



Probetas listas para ensayo a compresión



Probeta ensayada

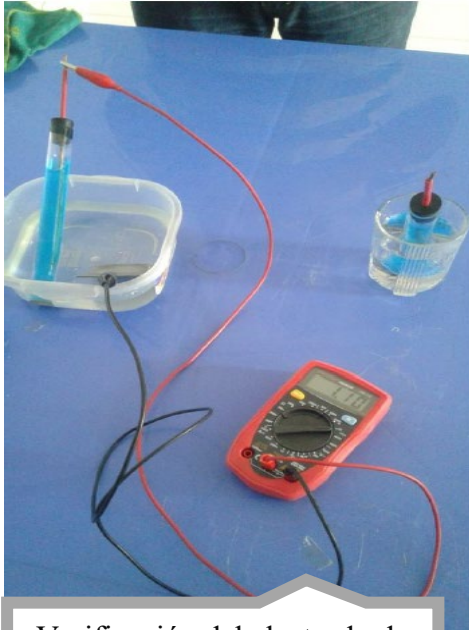


Probetas listas para ensayo a compresión



Probeta ensayada

**ANEXO 14:** Evidencia fotográfica de mediciones de potencial



Verificación del electrodo de referencia



Medición de potencial de probetas



Medición del ph