Universidad Católica de Santa María

## Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

## Escuela Profesional de Ingeniería Civil

# Estudio comparativo de la corrosión del acero de refuerzo pasivado con el acero galvanizado en el concreto armado de construcciones cerca del Lago Titicaca


Tesis presentada por:

**Cordova Jaime, Benjamin Manuel**

**ORCID: 0009-0007-3924-8678**


para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil


Asesora:

**Mg. Torres Almiron, Jeniffer Carla**

**ORCID: 0000-0002-3417-4581**



Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

# UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

## INGENIERIA CIVIL

## TITULACIÓN CON TESIS

## DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 22 de Mayo del 2026

**Dictamen: 012864-C-EPIC-2026**

Visto el borrador del expediente 012864, presentado por:

**2017221421 - CORDOVA JAIME BENJAMIN MANUEL**

Titulado:

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO PASIVADO CON EL ACERO GALVANIZADO EN EL CONCRETO ARMADO DE CONSTRUCCIONES CERCA DEL LAGO TITICACA**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

**INGENIERO CIVIL**

**29238311 - GUILLEN MALAGA MILAGROS SOCORRO**
**DICTAMINADOR**

**42839424 - ROSAS ESPINOZA JORGE**
**DICTAMINADOR**

**72476554 - BUSTAMANTE MORA BORIS ANDRE**
**DICTAMINADOR**

# ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO PASIVADO CON EL ACERO GALVANIZADO EN EL CONCRETO ARMADO DE CONSTRUCCIONES CERCA DEL LAGO TITICACA

INFORME DE ORIGINALIDAD

| 10% | 10% | 3% | 2% |
|---|---|---|---|
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|---|---|
| 1 | revista.estudioidea.org<br>Fuente de Internet | 1% |
| 2 | galvalatina.com<br>Fuente de Internet | 1% |
| 3 | www.researchgate.net<br>Fuente de Internet | 1% |
| 4 | repositorio.imarpe.gob.pe<br>Fuente de Internet | 1% |
| 5 | hdl.handle.net<br>Fuente de Internet | 1% |
| 6 | repositorioacademico.upc.edu.pe<br>Fuente de Internet | 1% |
| 7 | idoc.pub<br>Fuente de Internet | 1% |
| 8 | repositoriodspace.unipamplona.edu.co<br>Fuente de Internet | 1% |

## DEDICATORIA

A la memoria de mi querida hermana Mariana,
cuyo recuerdo ilumina cada paso de mi vida.

A las personas que más quiero, mis padres Norma e Hipólito, por su amor y apoyo incondicional.

***Benjamín Manuel Córdova Jaime***

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Santa María, mi alma máter, por haberme brindado una sólida formación profesional y valores humanos que guiarán mi desempeño como ingeniero civil.

Al laboratorio de electrometalurgia y corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad nacional del Altiplano, por permitirme realizar la experimentación de la corrosión del acero corrugado y acero corrugado galvanizado

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante, pilares fundamentales en mi formación personal y académica.

A mi asesora de tesis, Mag. Jennifer Carla Torres Almirón, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso durante la elaboración de este trabajo de investigación.

Al Dr. Mariano Roberto García Loayza, por su valioso apoyo en el desarrollo de la presente tesis

A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas que contribuyeron al desarrollo de mis capacidades técnicas y éticas.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo, camaradería y colaboración en los momentos de estudio y de investigación.

Finalmente, a todas las personas e instituciones que, de alguna manera, contribuyeron al desarrollo y culminación de esta tesis, mi más sincero reconocimiento y gratitud.

***Benjamín Manuel Córdova Jaime***

## RESUMEN

La presente investigación se inició con el conocimiento, que las construcciones ubicadas cerca del lago Titicaca se encuentran expuestas al agua de subsuelo, la cual ocasiona la pérdida de la capa pasiva del acero de refuerzo debido a la disminución del pH por debajo de 12, generando condiciones favorables para el inicio de la corrosión.

El objetivo de este estudio fue obtener las curvas de polarización y las pendientes de Tafel para evaluar la corrosión del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado, utilizando el equipo Potenciostato/Galvanostato 302N, con la celda ASTM y el software NOVA.

La experimentación se inició con la toma de muestras de agua de subsuelo de las zonas de estudio: FIGIM-UNA, Jayllihuaya y Salcedo, posteriormente, con una varilla de acero corrugado y de acuerdo a las especificaciones de la celda ASTM, se fabricó los electrodos de trabajo: de acero corrugado y de acero corrugado galvanizado, este último con el proceso final de servicio de galvanizado en caliente.

Se dio inicio a la experimentación con el Potenciostato/Galvanostato conectando a la celda ASTM con la instalación de: electrodos de trabajo de acero corrugado y acero galvanizado, el contraelectrodo de oro refinado y el electrodo de referencia Ag/AgCl; con el software NOVA se obtuvo el resultado de la velocidad de corrosión.

En la experimentación de la corrosión del acero corrugado dio una velocidad promedio de 0.108 mm/año en las zonas de estudio. Con este valor, se determinó que la columna C-03 del expediente técnico, que contiene 12Ø3/4", tras 29.630 años de exposición a la corrosión, presentaría una reducción de diámetro equivalente a 12Ø5/8".

En la experimentación de la corrosión del acero corrugado galvanizado la velocidad promedio en las zonas de estudio fue de 0.054 mm/año. Este valor determinó que, después de 59.259 años, las varillas de acero galvanizado de 12Ø3/4" de la columna C-03 en estudio se conviertan en varillas de 12Ø5/8".



**Palabras clave:** Acero, corrosión, galvanizado.

## ABSTRACT

This research began with the understanding that structures located near Lake Titicaca are exposed to groundwater, which causes the loss of the passive layer of reinforcing steel due to the pH dropping below 12, creating favorable conditions for the onset of corrosion.

The objective of this study was to obtain polarization curves and Tafel slopes to evaluate the corrosion of corrugated and galvanized corrugated steel, using the 302N Potentiostat/Galvanostat equipment, with the ASTM cell and NOVA software.

The experimentation began with the collection of groundwater samples from the study areas: FIGIM-UNA, Jayllihuaya and Salcedo. Subsequently, using a corrugated steel rod and according to the ASTM cell specifications, the working electrodes were manufactured: corrugated steel and galvanized corrugated steel, the latter with the final hot-dip galvanizing service process.

The experiment commenced with the potentiostat/galvanostat, connected to the ASTM cell with the following components: corrugated steel and galvanized steel working electrodes, a refined gold counter electrode, and an Ag/AgCl reference electrode, the corrosion rate was obtained using NOVA software.

Experiments with corrugated steel yielded a corrosion rate of 0.108 mm/year. Based on this value, it was concluded that the diameters of the bars in column C-03 of the technical file, which contain 12Ø3/4", would be reduced to 12Ø5/8" after 29,630 years of exposure to corrosion.

In the corrosion experiment of galvanized corrugated steel, the average corrosion rate in the study areas was 0.054 mm/year. This value determined that, after 59,259 years, the 12Ø3/4" galvanized steel bars of column C-03 under study would become 12Ø5/8" bars.



**Keywords:** Steel, corrosion, galvanized.

**ÍNDICE**

DEDICATORIA
AGRADECIMIENTOS
RESUMEN
ABSTRACT
INTRODUCCIÓN ..... 1
CAPÍTULO I ..... 2
1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN ..... 2
1.1. Identificación del problema ..... 2
1.2. Justificación de la investigación ..... 3
1.2.1. Justificación social ..... 3
1.2.2. Justificación económica ..... 3
1.2.3. Justificación tecnológica ..... 4
1.2.4. Justificación ambiental ..... 4
1.2.5. Justificación Política/Institucional ..... 4
1.3. En que consiste, que ventajas y porque se eligió esta investigación ..... 5
1.4. Ventajas, desventajas de acero galvanizado ..... 5
1.5. Hipótesis ..... 6
1.6. Objetivos de la investigación ..... 6
1.6.1. Objetivo general ..... 6
1.6.2. Objetivos específicos ..... 6
1.7. Alcances ..... 6
1.8. Limitaciones ..... 7
CAPÍTULO II ..... 8
2. FUNDAMENTO TEÓRICO ..... 8
2.1. Antecedentes ..... 8
2.1.1. Agua del Lago Titicaca ..... 8
2.1.2. Permeabilidad y porosidad del concreto ..... 8
2.1.3. Estructuras de concreto ..... 9
2.1.4. Corrosión del acero de refuerzo ..... 10
2.1.5. Velocidad de corrosión del acero de refuerzo ..... 13
2.1.6. Proceso de corrosión, inicial y avanzada del acero de refuerzo ..... 15

2.2. Marco teórico ..... 16
2.2.1. Agua en el concreto, pH y conductividad ..... 16
2.2.2. Permeabilidad ..... 18
2.2.3. Ley ohm ..... 20
2.2.4. El acero de refuerzo del concreto armado ..... 21
2.2.5. Acero galvanizado ..... 23
2.2.6. Patologías que afectan la durabilidad del concreto y generan la corrosión del acero ..... 24
2.2.7. Corrosión del acero de refuerzo en el concreto armado ..... 27
2.2.8. Como evaluar la corrosión ..... 30
2.2.9. Como evitar la corrosión ..... 32
2.2.10. Cálculos estructurales en el concreto ..... 33
CAPÍTULO III ..... 36
3. METODOLOGÍA PROPUESTA ..... 36
3.1. Método experimental ..... 36
3.2. Lugar de la experimentación ..... 36
3.3. Muestra ..... 36
3.3.1. Columna ..... 36
3.3.2. Especificaciones del acero de refuerzo en el concreto ..... 37
3.3.3. Especificaciones del concreto armado ..... 38
3.3.4. Especificaciones de los recubrimientos libres en el concreto ..... 38
3.3.5. Metodología para el agua de subsuelo y agregados ..... 39
3.3.6. Metodología experimental de la corrosión del acero pasivado y del acero galvanizado ..... 41
3.3.7. De los diagramas de interacción en la zona de exposición al agua de subsuelo del acero corrugado pasivado antes y después de la corrosión ..... 44
CAPÍTULO IV ..... 45
4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN ..... 45
4.1. Desarrollo de la investigación del agua de subsuelo y la resistencia eléctrica del concreto como indicador de la permeabilidad ..... 45
4.1.1. Muestreo del agua en las zonas estudio ..... 45
4.1.2. Agregados de la cantera del rio Cutimbo ..... 45
4.1.3. Composición de la mezcla ..... 46

4.1.4. Secuencia operativa para la fabricación de las probetas de concreto ..... 47
4.1.5. Procedimiento de operaciones para determinar la permeabilidad del concreto mediante la resistividad eléctrica ..... 47
4.2. Desarrollo experimental de la corrosión del acero pasivado y del acero galvanizado ..... 48
4.2.1. Preparación de electrodos ..... 48
4.2.2. Agua de subsuelo para la experimentación de la corrosión del acero corrugado y acero galvanizado ..... 49
4.2.3. Conexiones a la celda experimental ASTM ..... 49
4.2.4. Operación del Potenciostato/Galvanostato y uso del software NOVA ..... 50
4.2.5. Operaciones para los resultados de la corrosión del acero corrugado y del acero galvanizado ..... 52
4.3. Para el desarrollo del análisis de los diagramas interacción en la zona de exposición al agua de subsuelo de la corrosión del acero corrugado pasivado y el acero galvanizado ..... 54
CAPÍTULO V ..... 55
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 55
5.1. Resultados de la resistencia eléctrica del concreto como indicador de la permeabilidad ..... 55
5.1.1. Resultados del análisis del agua de subsuelo ..... 55
5.1.2. Resultados del nivel freático ..... 56
5.1.3. Resultados de la resistencia eléctrica del concreto ..... 57
5.2. Resultados experimentales de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo pasivado y la velocidad de corrosión del acero galvanizado ..... 58
5.2.1. Resultados experimentales de la velocidad de corrosión del acero corrugado ..... 58
5.2.2. Resultados experimentales de la corrosión del acero corrugado galvanizado ..... 66
5.3. Resultados comparativos de la corrosión del acero corrugado con al acero corrugado galvanizado antes y después de la corrosión ..... 71

5.4. Resultados del estudio de los diagramas de interacción de la corrosión del acero corrugado pasivado antes y después de la corrosión en la zona de exposición al agua de subsuelo ..... 72
5.4.1. Diagramas de interacción de posibles casos de corrosión del acero corrugado ..... 74
5.4.2. Diagrama de interacción del acero corrugado galvanizado antes de la corrosión y durante 59.259 años ..... 84
5.5. Comparación de los diagramas de interacción del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado ..... 87
5.6. Referencia de costos..... 87
5.6.1. Costo del acero corrugado ..... 87
5.6.2. Cantidad del zinc en el acero corrugado galvanizado..... 87
5.6.3. Costo del zinc en el acero corrugado galvanizado de 3/4” ..... 88
CONCLUSIONES ..... 90
RECOMENDACIONES ..... 91
REFERENCIAS ..... 92

## ÍNDICE DE TABLAS


Tabla 1 Parámetros permisibles del agua de mezcla y curado según la Norma NTP 339.088 ..... 17
Tabla 2 Granulometría del agregado fino y grueso ..... 19
Tabla 3 Características de las barras de refuerzo ..... 21
Tabla 4 Normas del acero de refuerzo galvanizado ..... 23
Tabla 5 Factor de reducción de resistencia ..... 34
Tabla 6 Tamices a utilizar para realizar el análisis granulométrico ..... 40
Tabla 7 Calidad del agua como electrolito del lugar de estudio ..... 45
Tabla 8 Ubicación de la cantera del rio Cutimbo ..... 46
Tabla 9 Composición de mezclas según el expediente técnico ..... 46
Tabla 10 Dosificación de mezclas para el molde experimental ..... 46
Tabla 11 Resultados del análisis químico del agua de subsuelo ..... 55
Tabla 12 Nivel del agua de subsuelo en tres puntos del lugar de estudio ..... 56
Tabla 13 Resultados de la resistencia eléctrica de probetas de concreto que determinan la permeabilidad ..... 57
Tabla 14 Resultados de la densidad de corriente y el voltaje aplicado de la corrosión del acero corrugado en agua subterránea de: Jayllihuaya, FIGIM UNA y Salcedo ..... 59
Tabla 15 Resumen experimental de la velocidad de corrosión del acero corrugado en el área de estudio ..... 62
Tabla 16 Características de las varillas de 3/4” y 5/8” de refuerzo ..... 62
Tabla 17 Acero corrugado y acero galvanizado antes y después del proceso de corrosión ..... 63
Tabla 18 Resultados de la densidad de corriente y el voltaje de la corrosión del acero galvanizado con agua de subsuelo de: jayllihuaya, FIGIM UNA y Salcedo ..... 67
Tabla 19 Resumen experimental de la velocidad de corrosión del acero corrugado galvanizado en el área de estudio ..... 70
Tabla 20 Resultados antes y después del proceso de corrosión del acero galvanizado ..... 71
Tabla 21 Resultados comparativos de la experimentación de la corrosión del acero corrugado con al acero corrugado galvanizado antes y después de la corrosión ..... 71

Tabla 22 Resumen de puntos del diagrama de interacción de la columna C-03 del acero corrugado antes del proceso de corrosión ..... 74
Tabla 23 Resumen de puntos caso 01, del diagrama de interacción del acero corrugado ..... 77
Tabla 24 Resumen de puntos del caso 2 de la columna C-03 después del proceso de corrosión ..... 79
Tabla 25 Resumen de puntos del caso 03 de la columna C-03 después del proceso de corrosión ..... 82
Tabla 26 Resumen de puntos del caso 04 de la columna C-03 después del proceso de corrosión ..... 84
Tabla 27 Resultados comparativos de los diagramas de interacción del acero corrugado con al acero corrugado galvanizado antes y después de la corrosión ..... 87
Tabla 28 Resumen comparativo del costo de una varilla de 3/4” entre el acero corrugado y el acero corrugado galvanizado ..... 89

## ÍNDICE DE FIGURAS


Figura 1 Corrosión del acero de refuerzo ..... 11
Figura 2 Detalle de las varillas soldadas. CS (acero al carbono), SS (acero inoxidable) y contacto eléctrico (cable de cobre) ..... 12
Figura 3 Curvas de polarización observadas después de 48 h de inmersión de las barras de acero ..... 14
Figura 4 Proceso de corrosión del acero de refuerzo ..... 15
Figura 5 Corrosión del acero de refuerzo por efecto de la carbonatación, A: etapa inicial y B: avance de la carbonatación ..... 15
Figura 6 Proceso de corrosión del acero ..... 16
Figura 7 Relación agua-cemento (a/c) ..... 19
Figura 8 Coeficiente de permeabilidad de la pasta de cemento ..... 20
Figura 9 Diagrama de Pourbaix para el fierro ..... 22
Figura 10 Mecanismo del ataque de cloro al hierro ..... 26
Figura 11 Representación de las reacciones químicas que se presentan en la corrosión del Fe en agua ..... 28
Figura 12 Corrosión del acero de refuerzo ..... 29
Figura 13 Modelo esquemático de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto ..... 29
Figura 14 Zonas de falla de un diagrama de interacción ..... 35
Figura 15 Esquema de la metodología experimental ..... 37
Figura 16 Columna, zapata y enrocado del subsuelo ..... 38
Figura 17 La columna C-03 y el acero corrugado ..... 39
Figura 18 Software NOVA para seleccionar la experimentación de las líneas de polarización ..... 42
Figura 19 Para iniciar la experimentación ..... 43
Figura 20 Figura de montaje para medir la resistencia eléctrica del concreto experimental ..... 48
Figura 21 Electrodos de trabajo de acero corrugado, acero galvanizado y contraelectrodo de oro ..... 49
Figura 22 Sistema de conexión ..... 50
Figura 23 El Potenciostato, el software NOVA y la laptop en trabajo ..... 50
Figura 24 Parámetros utilizados en la experimentación ..... 51
Figura 25 Datos para la experimentación del acero corrugado ..... 51

Figura 26 Curvas ejemplo de líneas de polarización de la experimentación del acero corrugado ..... 52
Figura 27 Curvas ejemplo de líneas de polarización de la reacción reducción y oxidación de la corrosión del acero corrugado con las pendientes de Tafel ..... 53
Figura 28 Resultados ejemplo del primer experimento de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo FIGIM UNA. ..... 53
Figura 29 Carga axial de la columna C-3, eje H-5 más esforzada ..... 54
Figura 30 Momento flector de la columna C-3, eje H-5 ..... 54
Figura 31 Líneas de polarización de la corrosión del acero corrugado en agua subterránea de: jayllihuaya, FIGIM UNA y Salcedo ..... 58
Figura 32 Resultados de experimentos de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo FIGIM-UNA ..... 60
Figura 33 Resultados de experimentos de la corrosión del acero corrugado con agua de Jayllihuaya ..... 61
Figura 34 Resultados de experimentos de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Salcedo ..... 61
Figura 35 Columna C-03 antes de la corrosión ..... 63
Figura 36 Caso 01, posible corrosión de la columna C-03, 05 varillas corroídas ..... 64
Figura 37 Caso 02, posible corrosión de la columna C-03, 07 varillas corroídas ..... 64
Figura 38 Caso 03, posible corrosión de la columna C-03, 11 varillas corroídas ..... 65
Figura 39 Caso 04, posible corrosión de la columna C-03, 12 varillas corroídas ..... 65
Figura 40 Líneas de polarización de la corrosión del acero galvanizado con agua subterránea de: jayllihuaya, FIGIM UNA y Salcedo ..... 66
Figura 41 Resultados de la corrosión del acero corrugado galvanizado con agua de subsuelo de la zona FIGIM-UNA ..... 68
Figura 42 Resultados de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Jallihuaya ..... 69
Figura 43 Resultados experimentales de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Salcedo ..... 69
Figura 44 Columna C-03 en estudio del expediente técnico, antes del proceso de corrosión ..... 72
Figura 45 Datos de análisis de la columna C-03, antes del proceso de corrosión del acero corrugado ..... 73

Figura 46 Diagrama de interacción de la columna C-03, antes del proceso de corrosión ..... 73
Figura 47 Columna C-03 después del proceso de corrosión, 05 varillas corroídas ..... 75
Figura 48 Datos de análisis de la columna C-03 del caso 01 posible del proceso de corrosión del acero corrugado ..... 75
Figura 49 Diagrama de interacción del caso 01 de la columna C-03 después del proceso de corrosión, 05 varillas corroídas ..... 76
Figura 50 Columna C-03 después del proceso de corrosión, 07 varillas corroídas ..... 77
Figura 51 Datos de análisis de la columna C-03 del caso 02 del proceso de corrosión del acero corrugado ..... 78
Figura 52 Diagrama de interacción de la columna C-03 caso 2 después del proceso de corrosión, 07 varillas corroídas ..... 78
Figura 53 Columna C-03 después del proceso de corrosión, 11 varillas corroídas ..... 80
Figura 54 Datos de análisis de la columna C-03 del caso 03 del proceso de corrosión del acero corrugado ..... 80
Figura 55 Diagrama de interacción de la columna C-03 caso 3 después del proceso de corrosión, 11 varillas corroídas ..... 81
Figura 56 Columna C-03 después del proceso de corrosión, 12 varillas corroídas ..... 82
Figura 57 Datos de análisis de la columna C-03 del caso 04 del proceso de corrosión del acero corrugado ..... 83
Figura 58 Diagrama de interacción de la columna C-03 después del proceso de corrosión, 12 varillas corroídas ..... 83
Figura 59 Columna C-03 en estudio del expediente técnico, antes del proceso de corrosión, con acero galvanizado ..... 85
Figura 60 Datos de análisis de la columna C-03 del proceso de corrosión del acero galvanizado ..... 85
Figura 61 Diagrama de interacción de la columna C-03, antes del proceso de corrosión ..... 86
Figura 62 Vida de servicio y espesor de la capa de zinc del acero galvanizado ..... 88

## ÍNDICE DE ANEXOS


Anexo 1 Documento de autorización de uso del laboratorio para las pruebas experimentales de corrosión del acero ..... 101
Anexo 2 Ubicación de la obra en el departamento de Puno ..... 102
Anexo 3 Ubicación de la zona FIGIM UNA dentro de la Ciudad Universitaria ..... 103
Anexo 4 Nivel del agua de subsuelo zona FIGIM-UNA, primera semana de enero ..... 104
Anexo 5 Tesista en el lugar del agua de subsuelo zona FIGIM-UNA ..... 105
Anexo 6 Nivel del agua de subsuelo zona FIGIM-UNA, segunda semana de marzo ..... 106
Anexo 7 Ubicación del agua de subsuelo zona Jayllihuaya ..... 107
Anexo 8 Nivel del agua de subsuelo zona Jayllihuaya, primera semana de enero ..... 108
Anexo 9 Nivel freático del agua de subsuelo de la Zona de Jayllihuaya, segunda semana de marzo ..... 109
Anexo 10 Ubicación del agua de subsuelo zona Salcedo ..... 110
Anexo 11 Nivel del agua de subsuelo zona Salcedo, primera semana de enero ..... 111
Anexo 12 Resultados del análisis del agua de subsuelo FIGIM UNA ..... 112
Anexo 13 Resultados del análisis del agua de subsuelo Jayllihuaya ..... 113
Anexo 14 Resultados del análisis del agua de subsuelo Salcedo ..... 114
Anexo 15 Ficha técnica del acero corrugado ..... 115
Anexo 16 Ficha técnica del acero galvanizado ..... 116
Anexo 17 Diseño de mezcla del concreto fc = 210 Kg/cm2 ..... 117
Anexo 18 Diseño de mezcla del concreto fc = 175 Kg/cm2 ..... 118
Anexo 19 Cemento rumi utilizado en la experimentación ..... 119
Anexo 20 Potenciostato/Galvanostato instalado en la experimentación ..... 120
Anexo 21 Comprobante de servicio de galvanizado en caliente del acero corrugado ..... 121
Anexo 22 Datos experimentales de la corrosión del acero corrugado para la construcción de las curvas de polarización, reacción catódica FIGIM UNA. ..... 122

# INTRODUCCIÓN

En las edificaciones la durabilidad de las estructuras de concreto armado es un aspecto crítico en la ingeniería civil en lugares donde el nivel freático está en contacto con las estructuras de concreto, siendo la principal causa la corrosión del acero de refuerzo, proceso que compromete la seguridad estructural y la vida útil de las edificaciones. El entorno de las condiciones ambientales de humedad, la presencia de sales disueltas en el agua de subsuelo favorece el ingreso del agua por el concreto al acero de refuerzo, modificando el pH por debajo de 12, de esta forma destruyéndose la capa de pasivación del acero dando lugar al proceso de corrosión.

El uso del acero de refuerzo pasivado en el concreto en ambientes con presencia de iones agresivos como cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos generan el proceso de corrosión del acero de refuerzo, esto ha creado la necesidad de evaluar la alternativa del uso del acero de refuerzo galvanizado como una opción viable, al actuar la capa de zinc como una barrera física y electroquímica frente a los agentes corrosivos retardando el inicio y la propagación de la corrosión.

El presente estudio se enfoca en comparar el desempeño frente a la corrosión del acero pasivado y el acero galvanizado, considerando las condiciones propias de las construcciones cerca del lago Titicaca. Para esto se han realizado ensayos experimentales con él Potenciostato/Galvanostato 302N, el uso del Software NOVA en la celda ASTM con electrodos de trabajo de acero de refuerzo y de acero galvanizado, contraelectrodo de oro y electrodo de referencia de Ag/AgCl.

La experimentación ha permitido tener las curvas de polarización que han determinado las reacciones de reducción y oxidación del acero de refuerzo y del acero galvanizado en el agua de subsuelo FIGIM UNA, Jayllihuaya y Salcedo, y con las pendientes de Tafel se determinó la velocidad de corrosión del acero corrugado y el acero corrugado galvanizado en mm/año.

Los resultados de la presente investigación, va a ser un aporte para posteriores estudios de investigación de la corrosión del acero pasivado y de la corrosión del acero galvanizado como una opción de uso en construcciones de nivel freático cerca de la superficie.

# CAPÍTULO I

## 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Identificación del problema

Según datos de 2016 de NACE (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión), en 2013, el costo global estimado de la corrosión fue de US$ 2.5 billones anuales, equivalente al 3.8% del PIB mundial. En Europa, los costos totales de corrosión en el 2013 se estimaron en US$ 701.500 millones. Muchos países esperan que los costos de corrosión varíen entre el 1% y el 5% del PIB cada año. La implementación de técnicas de control de corrosión efectivas disponibles podría reducir los costos entre un 15% y un 35%, lo que generaría ahorros anuales globales de US$ 375 a US$ 875 millones. Según ATEG, Asociación Técnica Española de Galvanización, la corrosión es uno de los grandes enemigos de las estructuras de acero, cerca del 30% de la producción mundial de acero se pierde a causa de la corrosión.

Las edificaciones ubicadas cerca del lago Titicaca, debido al nivel freático alto, las cimentaciones en ciertas épocas del año están sumergidas en agua de subsuelo, esto origina que el acero de refuerzo en el concreto armado pierda la capa pasiva que se forma en condiciones altamente alcalinas, específicamente cuando el pH del concreto se encuentra entre 12 y 14. Sin embargo, cuando el pH disminuye ya sea por la penetración de agua, la presencia de humedad constante o el ingreso de contaminantes esta capa pasiva se destruye, iniciándose el proceso de corrosión del acero de refuerzo.

La presencia de cloruros y sulfatos en el medio acelera la corrosión, lo que puede generar eflorescencias y, en casos más avanzados, el desprendimiento del recubrimiento de concreto debido al aumento del volumen del acero corroído, se puede expandirse hasta seis veces respecto a su volumen original.

La corrosión del acero en la armadura del concreto armado constituye un defecto grave en la tecnología constructiva y ocasiona pérdidas económicas significativas al reducir la vida útil de las estructuras. En este contexto el galvanizado al estar el acero protegido con zinc la superficie adopta las propiedades del zinc, y según American Galvanizers Association (2001), el zinc es anfótero por lo que la máxima velocidad de ataque sobre el zinc se produce en condiciones alcalinas con un pH superior a 12,5. La pasivación del zinc se produce en el rango de pH de 8 a 12,5, debido a la formación inicial de una capa de hidróxido de zinc y,

posteriormente en un compuesto complejo de calcio y zinc, alargando la vida de las estructuras de concreto armado.

## 1.2. Justificación de la investigación

### 1.2.1. Justificación social

El estudio del proceso de corrosión del acero de refuerzo en el concreto armado en edificaciones ubicadas cerca del lago Titicaca permitirá que los ingenieros civiles formen equipos multidisciplinarios orientados a investigar estrategias de prevención y control de la corrosión, esto contribuye y garantiza un mejor desempeño profesional y proporcionando conocimientos para la durabilidad de las estructuras en beneficio directo de la población de Puno.

En el Perú, el desarrollo de infraestructura ha crecido de manera sostenida en los últimos años, generando un incremento significativo en la mano de obra y en la actividad constructiva a nivel nacional. En este contexto, la investigación sobre la corrosión del acero de refuerzo adquiere especial relevancia, ya que sus resultados pueden aportar criterios técnicos para mejorar la calidad, seguridad y vida útil de las edificaciones, favoreciendo así a la sociedad en su conjunto.

### 1.2.2. Justificación económica

La corrosión del acero de refuerzo genera un progresivo deterioro y, en muchos casos, la destrucción parcial o total de las construcciones de concreto armado, debido a la reducción acelerada de la vida útil del acero. Para mitigar sus efectos las estructuras afectadas deben ser reparadas o incluso reemplazadas, lo que implica elevados costos económicos tanto para las instituciones del estado como para la población de Puno.

El estudio del comportamiento corrosivo del acero de refuerzo en edificaciones permite comprender los mecanismos de deterioro y, con ello, plantear medidas de prevención y diseño que eviten futuros daños. Este conocimiento contribuye a generar significativos ahorros en la ejecución y mantenimiento de las obras, especialmente en un contexto donde los proyectos de infraestructura son cada vez más ambiciosos y demandan mayores inversiones en ingeniería civil, tanto en Puno como en otras regiones del país.

### 1.2.3. Justificación tecnológica

Según la información disponible en libros especializados, tesis, artículos de investigación y eventos científicos, se han encontrado pocos estudios específicos sobre la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto armado y ninguna de construcciones ubicadas cerca del lago Titicaca. Esta ausencia de investigaciones es relevante, considerando que la disminución del pH por debajo de 12 rompe la capa pasiva del acero, y que muchas de estas edificaciones permanecen inundadas o en contacto prolongado con agua debido al alto nivel freático, facilitando el inicio y avance de la corrosión.

En este contexto, la presente investigación se propone como un documento de consulta que permite comprender el proceso de corrosión del acero de refuerzo y del acero galvanizado para ofrecer criterios para su prevención. Asimismo, se constituye en un antecedente importante para el desarrollo de futuras investigaciones relacionadas con la durabilidad de las estructuras en zonas con condiciones similares.

### 1.2.4. Justificación ambiental

El proceso de corrosión del acero de refuerzo en edificaciones ubicadas cerca del lago Titicaca genera una reacción electroquímica que produce óxidos de hierro, los cuales pueden dispersarse en el entorno inmediato de las construcciones. Esta acumulación de óxidos incrementa la concentración de hierro en los suelos y en las aguas subterráneas cercanas, las mismas que son empleadas por los pobladores mediante pozos para el consumo humano y para actividades relacionadas con la fauna local.

La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto armado en la zona de estudio es continúa y continua la contaminación de suelos y aguas, siendo un problema que requiere ser atendido por los ingenieros civiles, dada su implicancia en la durabilidad, seguridad y sostenibilidad de las edificaciones. En este sentido, el presente trabajo constituye un aporte significativo orientado a la comprensión del fenómeno y a la búsqueda de soluciones que contribuyan a mitigar sus efectos.

### 1.2.5. Justificación Política/Institucional

El estudio de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto armado de edificaciones ubicadas cerca del lago Titicaca permitirá impulsar la creación de centros de investigación en universidades, institutos y otras entidades dedicadas al análisis de la durabilidad estructural. De

igual manera fomentar el interés de las autoridades de la región Puno y del estado peruano para destinar presupuestos orientados a investigar este problema, que afecta directamente a la infraestructura local.

Asimismo, los resultados de esta investigación pueden contribuir a la formulación de normativas que establezcan la participación obligatoria y directa del ingeniero civil en todas las etapas de construcción, garantizando así la adecuada supervisión técnica y la aplicación de criterios que mitiguen la corrosión del acero de refuerzo en edificaciones cercanas al lago Titicaca.

### 1.3. En que consiste, que ventajas y porque se eligió esta investigación

Se realizó el estudio de la corrosión del acero pasivado y del acero galvanizado en la obra "Mejoramiento del servicio de formación académica en la Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica de la UNA", ubicada en las proximidades del lago Titicaca. Para ello, se emplearon acero corrugado y acero galvanizado evaluando su comportamiento corrosivo utilizando aguas de subsuelo de las zonas: FIGIM UNA, Jayllihuaya y Salcedo. Con el equipo Potenciostato/Galvanostato en la celda ASTM y mediante el software NOVA se obtuvieron los valores respectivos de las velocidades de corrosión de ambos materiales.

El estudio presenta importantes ventajas, entre ellas la prevención de fallas estructurales y posibles colapsos, la optimización en el uso de materiales mediante la incorporación del acero galvanizado, el cumplimiento de normativas vigentes y con el conocimiento de la corrosión, implementar nuevas tecnologías orientadas a la protección contra la corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

La elección de esta investigación se fundamenta en los beneficios que ofrece el análisis del comportamiento del acero de refuerzo y el acero galvanizado en edificaciones expuestas a la inundación constante por el nivel freático, condición frecuente en las construcciones cercanas al lago Titicaca.

### 1.4. Ventajas, desventajas de acero galvanizado

El uso de acero corrugado galvanizado en el concreto presenta importantes ventajas, destacando su mayor resistencia a la corrosión gracias a la capa de zinc que recubre el acero. Este recubrimiento actúa como una barrera protectora frente a agentes agresivos, como cloruros, sulfatos y otros, proporcionando protección catódica, ya que el zinc se sacrifica

electroquímicamente para preservar el acero base. Asimismo, el acero galvanizado ofrece un mejor desempeño en ambientes húmedos debido a la alta resistencia del zinc frente a la acción del agua.

No obstante, también existen algunas desventajas. Entre ellas se encuentra el mayor costo inicial asociado al proceso de galvanización, la posible reacción entre el recubrimiento de zinc y el concreto fresco en medios altamente alcalinos, y la limitada disponibilidad del acero corrugado galvanizado en el mercado nacional para su uso en estructuras de concreto.

## 1.5. Hipótesis

El acero de refuerzo pasivado presenta una mayor velocidad de corrosión en comparación con el acero de refuerzo galvanizado en el concreto armado de construcciones cerca del lago Titicaca.

## 1.6. Objetivos de la investigación

### 1.6.1. Objetivo general

Realizar el estudio comparativo de la corrosión del acero de refuerzo pasivado con el acero de refuerzo galvanizado en el concreto armado de construcciones cerca del lago Titicaca, mediante la evaluación de parámetros electroquímicos.

### 1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar la resistencia eléctrica del concreto como indicador de la permeabilidad en construcciones cerca del lago Titicaca.
- Determinar la velocidad de corrosión del acero de refuerzo pasivado y del acero galvanizado en estructuras de concreto armado expuestas al agua de subsuelo en construcciones cerca del lago Titicaca.
- Evaluar los diagramas de interacción en la zona de exposición al agua de subsuelo antes y después del proceso de corrosión del acero de refuerzo pasivado y del acero galvanizado en construcciones cerca del lago Titicaca.

## 1.7. Alcances

El acero en estructuras de concreto armado ha sido estudiado como se pasiva, como se corroe, con que velocidad (mm/año) se da, en que medios se da la corrosión en comparación

con el comportamiento del acero galvanizado frente a la corrosión, con el equipo Potenciostato/Galvanostato 302N, en la celda ASTM, el uso del software NOVA y luego el estudio en los diagramas de interacción.

## 1.8. Limitaciones

Un inconveniente identificado en la presente investigación es la limitada disponibilidad de laboratorios especializados para la realizar los ensayos experimentales, de la corrosión del acero de refuerzo y corrosión del acero galvanizado.

# CAPÍTULO II

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Agua del Lago Titicaca

El lago Titicaca es el ecosistema de agua dulce más importante de Perú y Bolivia, provee múltiples beneficios socioeconómicos y ambientales, además constituye una reserva de agua dulce primordial para los habitantes del anillo circunlacustre. En el 2019, del 10 al 24 de julio, se realizó la evaluación limnológica del lago Titicaca por el equipo conformado por Imarpe, PELT y ALT (representante de MAYA y PACU de Bolivia), con el objetivo de caracterizar las variables físicas, químicas, biológicas y su relación con la biomasa íctica en la bahía de Puno, Lago Mayor y Lago Menor. Se establecieron 71 estaciones de muestreo en 8 perfiles según la morfología del lago. Los resultados obtenidos en el Lago Mayor presentaron gradiente de temperatura con mezcla incompleta, con altos contenidos de oxígeno disuelto por encima de 50 m de profundidad que no mostró anoxia a más de 250 m de profundidad, pH con tendencia básica; así mismo, se encontraron concentraciones elevadas de fosfatos y nitratos en el hipolimnion, sin embargo, para el silicato y nitritos fue fluctuante. La máxima de clorofila-a se presentó entre 10 y 50 m de profundidad. En la bahía de Puno, Lago Menor y zonas someras, estos parámetros fisicoquímicos presentaron fluctuaciones, concentraciones elevadas de fosfatos, nitratos y clorofila-a frente a la desembocadura del río Coata y Suches y frente a Desaguadero en el Lago Menor. Se apreciaron niveles altos de variabilidad principalmente los fosfatos y nitratos en columna de agua (Repositorio Imarpe, 2019).

Un día de lluvias en Puno es un día con no menos 1 milímetro de líquido o precipitación equivalente a lluvia, la probabilidad de días mojados en Puno varía considerablemente durante el año, la temporada más mojada dura 3 a 4 meses, del 15 de diciembre al 26 de marzo, con una probabilidad de más del 19 % de que cierto día será un día mojado, el mes con más días mojados en Puno es enero, la temporada más seca dura 6 a 8 meses, del 26 de marzo al 15 de diciembre, el mes con menos días mojados en Puno es Julio (Weather Spark, 2026).

#### 2.1.2. Permeabilidad y porosidad del concreto

Este estudio encontró una dosificación de concreto poroso, la cual permite obtener resistencias altas, manteniendo una excelente permeabilidad del concreto poroso, se determinó

una permeabilidad de 2.342 mm/s, con un porcentaje real de huecos del 11%, cemento en una proporción de 350 Kg/m3, permitiendo resistencia a flexo tracción y a comprensión de 28 días respectivamente de 3 MPa y 33MPa utilizando diferentes relaciones a/c (Studocu, 2010).

### 2.1.3. Estructuras de concreto

Con una muestra de una columna de 70 cm x 70 cm, con recubrimiento al borde de las varillas longitudinales de 3.5 cm con un total de 16 varillas distribuidas en la sección (5 en cada borde), y un hormigón con resistencia a la compresión de 35MPa, esta experimentación se enfocó en analizar las curvas de interacción propuestas en la normativa americana ACI 318 en su actualización del año 2019, con el aporte satisfactorio de funciones propias que calculan y grafican las curvas de interacción nominales y reducidas según el ACI 318. Las curvas calculadas en este trabajo se validaron con las curvas de programas comerciales (Cedeño, 2021).

Muestra de estudio agregados finos y gruesos extraídos de la cantera Cutimbo que se encuentra en la provincia de Puno, departamento de Puno a 23+00 km, lado derecho carretera Puno – Moquegua, esta investigación se enfocó en el estudio del concreto endurecido sometido a diferentes temperaturas de curado, esto debido a que en la región de Puno se tiene temperaturas variadas según los reportes del SENAMHI, el aporte es tener conocimiento de las diferentes temperaturas de curado desde -5 °C hasta los 20 °C tienen una relación directa con la resistencia a la compresión, tracción y flexión del concreto, debido a que según los resultados obtenidos observamos que mientras la temperatura del agua asciende las resistencias están en constante aumento (Chávez e Inquilla, 2022).

Con la muestra de concreto vaciado in situ en viviendas de la ciudad de Puno, el estudio comprende un análisis completo del estado del concreto en cuanto a su resistencia a compresión, este estudio se realizó con el objetivo de conocer el estado actual del concreto en edificaciones comunes de la ciudad de Puno; el aporte es la resistencia del concreto a compresión calculada haciendo uso del ensayo de índice de Rebote aplicado sobre un total de 751 puntos de ensayo los cuales muestran que la resistencia a compresión media, es de 151.89 kg/cm2 con un intervalo de confianza de ±3.53%, y uno confianza del 95%, lo cual evidencia que el concreto en viviendas solo alcanza el 72.33% (Quispe, 2019).

### 2.1.4. Corrosión del acero de refuerzo

Los costos globales estimado por perdida por la corrosión en el 2013 fue de US$ 2.5 billones anuales, equivalente al 3.8% del PIB mundial. En Europa, los costos totales de corrosión en el 2013 se estimaron en US$ 701.500 millones. Se proporciona la distribución de los costos relacionados con la corrosión en los EE. UU. Muchos países esperan que los costos de corrosión varíen entre el 1% y el 5% del PIB cada año. La implementación de técnicas de control de corrosión efectivas ya disponibles podría reducir los costos entre un 15% y un 35%, lo que generaría ahorros anuales globales de US$ 375 a US$ 875 millones y según ATEG, Asociación Técnica Española de Galvanización, la corrosión es uno de los grandes enemigos de las estructuras de acero, Cerca del 30% de la producción mundial de acero se pierde a causa de la corrosión (NACE, 2016)

Las pérdidas económicas causadas por la corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto se calculan en billones de dólares por año, únicamente en los Estados Unidos en que la Administración Federal de Caminos ha evaluado en 200 millones de dólares el costo anual de reparación de puentes en el sistema interestatal, monto que se cuadriplica al considerar todos los puentes existentes en el país, por otra parte, la Agencia de Protección del Ambiente (EPA), con sede en los Estados Unidos de Norteamérica, indica que el costo total por reparación de la red vial deteriorada por corrosión, originada por el empleo de sales de deshielo, es de aproximadamente 500 millones de dólares al año (Scribd, 2026).

El hormigón armado y los puentes de hormigón pretensado también emplean componentes de acero en sus diseños y por lo tanto pueden sufrir este fenómeno, en cuanto a obra en sí, se considera habitualmente falla por corrosión a la presencia de un 5% de corrosión superficial del acero (según Javier Tundidor, responsable técnico ATEG). Pero más allá de ese primer 5%, este proceso, si no está controlado, puede hacer perder al acero su integridad estructural y provocar daños catastróficos, como en un edificio frente al mar en el que hemos tenido que actuar recientemente y en el que encontramos una balconada soportada por esta viga (Isostatika, 2021).

**Figura 1**

*Corrosión del acero de refuerzo*



*Nota*. La figura representa el proceso de corrosión del acero de refuerzo. Tomado de Isostatika, 2021.

Con una muestra de Barras de acero en hormigón con presencia de iones cloruro, este artículo presenta un estudio experimental y el mecanismos electroquímicos de la cinética de corrosión de micro celdas y macro celdas de barras de acero en losas de hormigón armado sometidas a tres ambientes corrosivos diferentes y tres configuraciones de barras de acero corroídas. El aporte es tener conocimiento de la presencia de iones cloruro y la exposición de las barras de acero en el hormigón en ambientes húmedos se modifica el pH a valores menores a 12 y se forman las micro celdas de corrosión destruyendo el acero de refuerzo (Tang, 2023).

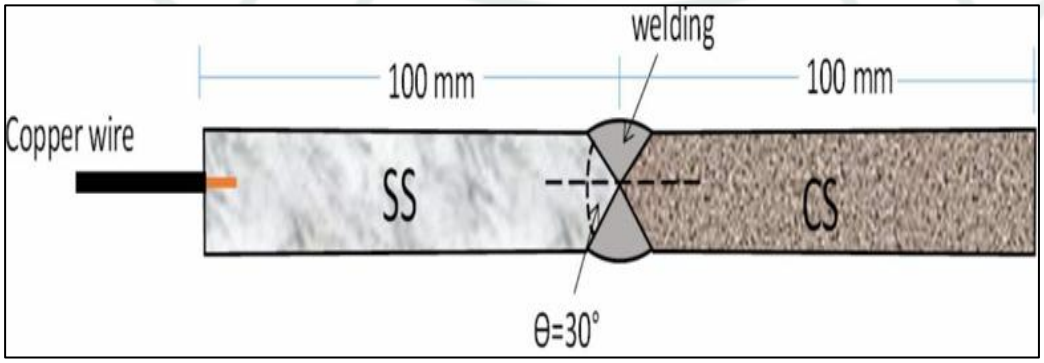
Con una muestra de estructura de hormigón armado. Este artículo presento el resultado de una investigación experimental integral en la que se ha evaluado el comportamiento a la corrosión del refuerzo de acero en hormigón expuesto a soluciones compuestas de iones cloruro y sulfato, se prepararon probetas de hormigón con una barra de acero empotrada centralmente a partir de dos tipos de cemento, a saber, cemento Portland ordinario (OPC) y cemento Portland puzolana (PPC), cuatro relaciones a/c y un tipo de refuerzo de acero. Las muestras de hormigón armado han sido expuestas a soluciones compuestas de iones cloruro y sulfato de diferentes concentraciones. Además, para evaluar el efecto del tipo de catión asociado con los iones sulfato sobre los parámetros de corrosión, se utilizaron sulfato de sodio y sulfato de magnesio individualmente con cloruro de sodio en la preparación de soluciones compuestas. Esta investigación ha mostrado resultados de: a). Los valores de potencial de media celda fueron más negativos que −270 mV (SCE)/−350 mV (electrodo Cu/CuSO 4) para ambos tipos de cemento en todas las relaciones a/c y en todas las soluciones de exposición, lo que indica la

iniciación de la corrosión de armaduras en el concreto. b). Las probetas fabricadas con PPC exhibieron valores más altos de resistividad relativa y valores más bajos de densidad de corrosión en comparación con las fabricadas con OPC en todas las soluciones de exposición (Bulu, 2014).

Se realizó una evaluación durante 390 días midiendo el potencial de corrosión y los niveles de densidad de corriente mediante espectroscopia de impedancia electroquímica aplicada a una solución que simulaba un entorno marino. Si bien se han propuesto varios enfoques para mitigar la corrosión de las estructuras de hormigón, hasta la fecha no se ha explorado ampliamente la sustitución del CS por SS. Siendo el aporte de las muestras en las que se suelda acero al carbono a acero inoxidable son menos susceptibles a la corrosión que el acero al carbono solo en condiciones de disolución marina simuladas, según lo encontrado por las técnicas de monitoreo de polarización lineal y EIS. Nuestros resultados de EIS muestran que las muestras soldadas exhiben comportamientos más capacitivos y, por lo tanto, desarrollan una superficie pasivada y, por lo tanto, exhiben menos corrosión. Una autopsia realizada a las muestras después de la prueba confirmó la ausencia de productos de corrosión en la unión soldada. e encontraron niveles más altos de resistencia a la corrosión para muestras embebidas en concreto preparadas con la relación a/c de 0,45 que para aquellas preparadas con la relación a/c de 0,65; por lo tanto, este es un parámetro crítico que debe considerarse para mejorar la resistencia a la corrosión. Para cada relación a/c, los valores de resistencia a la corrosión de las muestras analizadas estaban en el siguiente orden: acero inoxidable > SS-CS soldado > acero al carbono (Hernández *et al.*, 2019).

**Figura 2**

*Detalle de las varillas soldadas. CS (acero al carbono), SS (acero inoxidable) y contacto eléctrico (cable de cobre***)**




*Nota*. La figura representa dos aceros unidos por soldadura. Tomado de Hernández *et al.*, 2019.

Uso de acero inoxidable y concreto masivo en la sub y superestructura del Viaducto del Progreso en Yucatán, para reducir el mantenimiento de la estructura debido a la degradación por corrosión, la estructura fue concebida de hormigón macizo y, según los informes de los constructores del muelle, fue una de las primeras obras en las que se utilizó varilla de acero inoxidable lisa del tipo 304, aparentemente como refuerzo de contracción. Según el contratista, estas barras de acero inoxidable se utilizaron únicamente para evitar la contracción del hormigón en los encepados de los pilotes debido a sus enormes dimensiones. Un índice de refuerzo de acero aproximado del 0,15%. El gobierno mexicano solicitó un diseño que considerara cero mantenimientos a la corrosión durante 50 años y estar en condiciones de funcionamiento durante al menos 100 años. Se tiene como aporte hoy en día se cumplen 82 años desde que se inició la construcción del Muelle Progreso, y 77 años de estar en servicio en buenas condiciones y sin problemas significativos de corrosión (Torres *et al.*, 2018).

### 2.1.5. Velocidad de corrosión del acero de refuerzo

La velocidad de corrosión se fundamenta con que facilidad el acero se oxida y con que facilidad el oxígeno se reduce. El proceso corrosivo se produce al romperse la capa de pasivación que protege al acero, cuando la alcalinidad de la solución acuosa (electrolito) de los poros del concreto decrece por la carbonatación, consiste en la disolución de hierro en el agua de los poros, pues el hierro se oxida y los iones $Fe$ 2+ pasan a la solución, según la reacción anódica: $Fe \rightarrow Fe$ 2+ + 2e- (ánodo) (Chiné *et al.*, 2023).

Las regiones de la superficie del acero cercanas a las áreas anódicas se desempeñan como áreas catódicas, creando una corriente eléctrica desde regiones catódicas hacia anódicas. Simultáneamente, el oxígeno atmosférico difunde en el concreto hacia la superficie metálica y, en los sitios catódicos a contacto con la solución acuosa, reacciona con los electrones de la reacción, se origina la siguiente reacción de reducción con la formación de iones hidroxilo: $O2$+ $2H2O$+ $4e$- $\rightarrow$ 4 OH- (cátodo) (Chiné *et al.*, 2023).

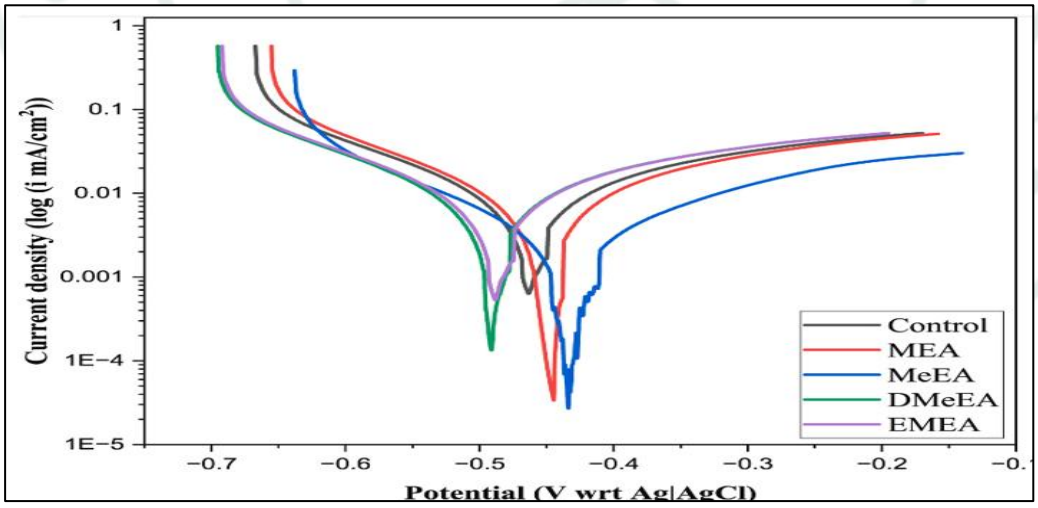
Se tiene experimentaciones con el ingreso de corriente, tal es el caso de ensayos de corriente impresa acelerada son el método experimental más común para evaluar la susceptibilidad a la fisuración inducida por la corrosión, el reto más destacado para la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Aunque es bien sabido que los ensayos con corriente impresa acelerada conducen a una propagación más lenta de las grietas que en condiciones naturales, lo que da lugar a sobreestimaciones del tiempo de deslaminación/desprendimiento, los orígenes de este fenómeno han desconcertado a los

investigadores durante más de un cuarto de siglo. A la vista de los recientes hallazgos experimentales, se postula que el fenómeno puede atribuirse a la variabilidad de la composición y densidad del óxido, concretamente a la relación variable de las fracciones másicas de óxido de hierro e hidróxido-óxido de hierro, que se ve afectada por la magnitud de la densidad de la corriente de corrosión aplicada (Kore *et al.*, 2024).

Se tiene otra investigación del comportamiento electroquímico de los inhibidores químicos de corrosión, en un entorno de solución de poros de hormigón simulada, se preparó añadiendo gradualmente 7,41 g/l de Ca (OH) 2, 11,22 g/l de KOH y 4,00 g/l de NaOH en un litro de agua destilada, manteniendo la agitación constante durante 2-3 h. A continuación, la solución preparada se filtró a través de papel de filtro Watman 42 para separar el CaO insoluble y obtener una solución clara de solución de poros de hormigón simulada. Posteriormente, se ajustó el pH entre 12 y 13 diluyéndola con agua. Se utilizó la polarización de Tafel para investigar y comparar el comportamiento electroquímico, de inhibición de diferentes inhibidores (MEA, McEA, DMcEA, EMEA) de corrosión en fase vapor, basados en alcoaminas después de 48 h de inmersión de muestras de barras de refuerzo en las respectivas soluciones. En la figura 3, se muestra los resultados observados a partir de la polarización de Tafel (Haeshit *et al.*, 2024).

**Figura 3**

*Curvas de polarización observadas después de 48 h de inmersión de las barras de acero*



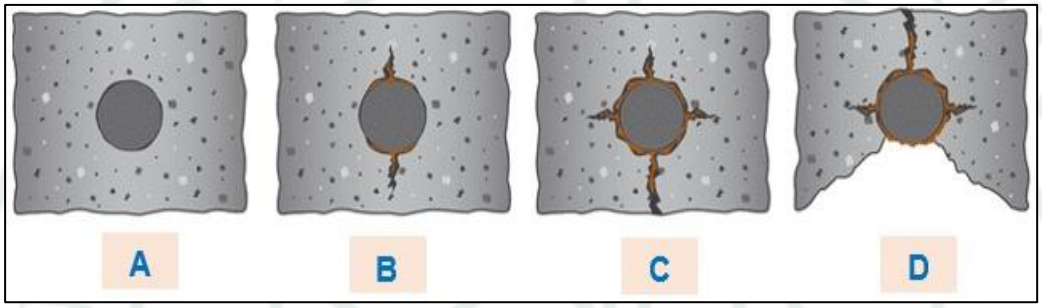

*Nota.* La figura representa las curvas de polarización de la corrosión en diferentes medios. Tomado de Harshit *et al.*, 2024.

### 2.1.6. Proceso de corrosión, inicial y avanzada del acero de refuerzo

A) Barra antes de la corrosión. B) Cuando la barra de acero se despasiva se inicia la corrosión en la superficie de la barra. C) Los productos de la corrosión (óxidos con 2-10 veces más volumen que el acero original) producen esfuerzos de tensión en el concreto originando grietas. D) Finalmente se produce un desprendimiento del concreto y la barra queda expuesta (Muñoz, 2020).

**Figura 4**

*Proceso de corrosión del acero de refuerzo*

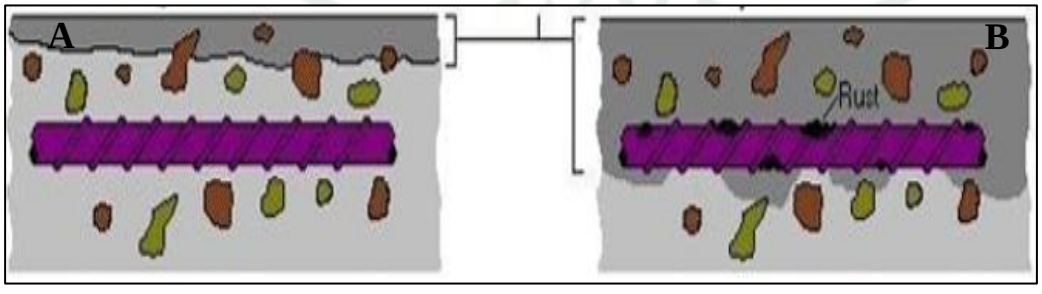



*Nota*. La figura representa el aumento de volumen del acero corrugado por el proceso de corrosión. Tomado de Muñoz, 2020.

La causa más común de inicio de corrosión del acero en el concreto es la presencia de iones cloruro, estos en una concentración por encima del límite máximo permitido des pasiva al acero, ocasionando que este pierda su capacidad de protección frente a la corrosión. Estos cloruros pueden provenir de diversas fuentes tales como agregados, agua del fraguado, ambientes industriales, y hasta el uso de ciertos aditivos aceleradores usados para el concreto (cloruros de calcio) (Muñoz, 2020).

**Figura 5**

*Corrosión del acero de refuerzo por efecto de la carbonatación, A: etapa inicial y B: avance de la carbonatación*

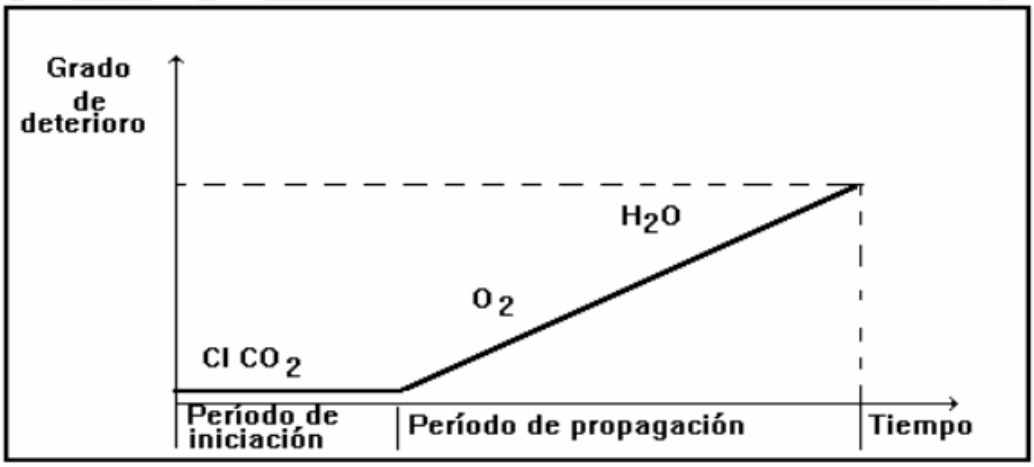



*Nota*. La figura representa el proceso de corrosión por efecto de la carbonatación. Tomado de Muñoz, 2020.

La corrosión del acero en el concreto, se define con un modelo muy sencillo que representa el tiempo que tarda una estructura de concreto proporcionando servicios para los cuales ha sido diseñada, se divide en dos periodos. Periodo de iniciación: Tiempo en que tarda el agente agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar el acero y provocar el rompimiento de la capa de óxido protector. Periodo de propagación: Comprende la acumulación progresiva del deterioro, hasta que alcanza un nivel inaceptable. Durante el periodo de iniciación los agentes agresivos llegan a la superficie del metal e inician el proceso de corrosión. Los agentes más comunes son los iones cloruro y la neutralización de la pasta de concreto conocida como carbonatación (Del Valle *et al.*, 2001).

**Figura 6**

*Proceso de corrosión del acero*




*Nota*. La figura representa el periodo de corrosión del acero. Tomado de Del Valle, 2021.

## 2.2. Marco teórico

### 2.2.1. Agua en el concreto, pH y conductividad

La calidad del agua se determina por la cantidad de constituyentes químicos presentes en agua pueden causar reacciones y afectar parámetros como el tiempo de fraguado, endurecimiento y fuerza del concreto esperados en el diseño de este, así mismo, elevadas impurezas pueden causar eflorescencia, tención, corrosión, inestabilidad y menor durabilidad; por este motivo es de gran importancia caracterizar el agua como medida de prevención, asegurando que se obtengan los resultados esperados, tabla 1 (Concrelab, 2021).

**Tabla 1**

*Parámetros permisibles del agua de mezcla y curado según la Norma NTP 339.088*

| Descripción | Limite permisible máximo |
|---|---|
| Limite en suspensión | 5000 ppm |
| Materia orgánica | 3 ppm |
| Alcalinidad (NaHCO3) | 100 ppm |
| Suelo (ion $SO4^{=}$) | 600 ppm |
| Cloruros (ion $Cl^{-}$) | 1000 ppm |
| pH | 5 a 8 |

*Nota.* La tabla representa los parámetros permisibles de agua para la construcción. Tomado de Slideshare, 2026.

Dado que las concentraciones de los iones H+ y OH- con frecuencia son números muy pequeños y, por lo tanto, es difícil trabajar con ellos. Soren Sorensen propuso, en 1909, una medida más practica denominada pH. El pH de una disolución se define con el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrogeno (en mol/L), hay que recordar solo es una definición establecida con el de tener números convenientes para trabajar con ellos. El logaritmo negativo proporciona un numero positivo para el pH, el cual, de otra manera, sería negativo debido al pequeño valor de [H+], además, el termino [H+], solo corresponde a la parte numérica de la expresión para la concentración del ion hidrogeno, ya que no se puede tomar el logaritmo de las unidades. Entonces, al igual que la constante de equilibrio, el pH de una disolución es una cantidad adimensional, debido a que el pH solo es una manera de expresar la concentración del ion hidrogeno las disoluciones acidas y básicas, a 25°C pueden identificarse por sus valores de pH (Chang, 1999).

Se ha obtenido información importante acerca de la naturaleza de las soluciones mediante la determinación de sus conductividades, una solución de sacarosa en agua no se disocia en iones y tiene la misma conductividad eléctrica que el agua. Investigaciones más detalladas han indicado que ciertas sustancias, como las sales de cloruro de sodio y sulfato cúprico, y también algunos ácidos como clorhídrico se ionizan casi totalmente en solución acuosa, estas sustancias se llaman electrolitos fuertes (Laidler y Meiser, 1997).

La capacidad de una sustancia para conducir la corriente eléctrica se debe al movimiento o migración de iones en disolución. Las sustancias que se ionizan completamente en disolución son altamente conductoras y, por lo tanto, se denominan electrolitos fuertes. Ejemplos de estas sustancias son las sales, los ácidos fuertes y las bases fuertes. En cambio, las sustancias

parcialmente ionizadas son poco conductoras y, por lo tanto, se denominan electrolitos débiles. Las sustancias que no se ionizan en disolución son no electrolitos (Chemistry Libre Texts. 2022).

### 2.2.2. Permeabilidad

#### A. Cemento

El cemento considerado, es el cemento rumi IP, la fabricación es controlada bajo un sistema de gestión de calidad certificado con ISO 9001 y de gestión ambiental ISO 14001, sus componentes y la tecnología utilizada en su fabricación, hacen que el cemento de alta durabilidad rumi tipo IP, tenga propiedades especiales que otorgan a los concretos y morteros, mejoren su resistencia e impermeabilidad y también pueda resistir la acción del intemperismo, ataques químicos, abrasión u otros tipos de deterioro (Cemento Yura, 2022).

#### B. Agregados

Los agregados son un ingrediente indispensable en el concreto premezclado, el asfalto y el mortero, representan aproximadamente de 60% a 75% del volumen total del concreto premezclado, y además ejercen una importante influencia en las cualidades del concreto recién mezclado, así como también después de que éste endurece, los agregados no sólo incrementan la resistencia del concreto, sino que también pueden hacer que la mezcla sea más compacta, permitiendo aplicaciones como la impermeabilización y retención de temperatura, pueden además contribuir a las cualidades estéticas del concreto (Cemex Latam,2023).

Los agregados proporcionan funciones de un relleno económico, da resistencia a la acción de cargas, a la abrasión, a la filtración de humedad, a la acción del clima y reducir los cambios volumétricos, que resultan del cambio de humedad, agregado fino (tabla 2), arena y/o piedra triturada menor a 5 mm (0.2 pulg.), y el agregado grueso (tabla 2), grava y/o piedra triturada, normalmente entre 9.5 y 37.5 mm (3/8 y 1½ pulg.) (UNAM-Facultad de Ingeniería, 2024).

Ejemplo de análisis granulométrico de agregados fino y grueso, tabla 2 para un determinado tipo de agregado.

**Tabla 2**

*Granulometría del agregado fino y grueso*

| Tamices para el agregado fino | | | Tamices para el agregado grueso | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Denominación** | **Abertura mm** | **% que pasa** | **Denominación** | **Abertura mm** | **% que pasa** |
| 3/8 | 9.5 | 100 | 2” | 50 | 100 |
| #4 | 4.75 | 95 a 100 | 1 ½” | 37.5 | 95 a 100 |
| #8 | 2.36 | 80 a 100 | 3/4” | 19 | 35 a 70 |
| #16 | 1.18 | 50 a 85 | 3/8” | 9.5 | 10 a 30 |
| #30 | 0.6 | 25 a 60 | #4 | 4.75 | 0 a 5 |
| #50 | 0.3 | 10 a 30 | | | |
| #100 | 0.15 | 2 a 10 | | | |

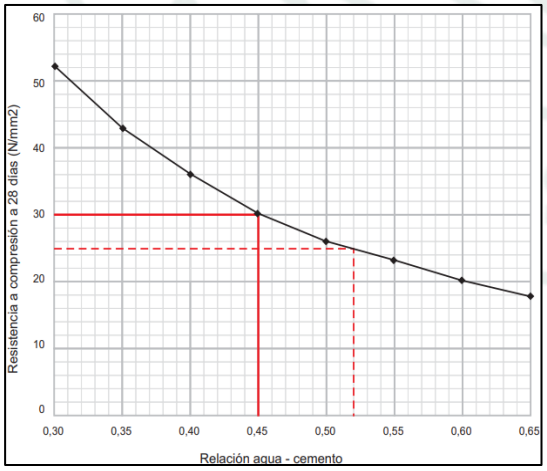
*Nota*. La tabla representa el tamaño del agregado fino y grueso. Tomado de Riva, 2000.

## C. Influencia de la relación a/c

La relación agua-cemento se puede definir como la razón entre el contenido efectivo de agua y el contenido de cemento en masa del hormigón fresco, el contenido efectivo de agua es la diferencia entre el agua total presente en el hormigón fresco y el agua absorbida por los áridos, mientras que el contenido de cemento en masa del hormigón se trata más bien de los kilos de cemento, el concepto en sí de la relación agua-cemento fue desarrollado por el investigador norteamericano Duff A. Abrams en 1918, el mismísimo que nos trajo el cono de Abrams para medir la consistencia del hormigón, estableciendo la razón existente entre la relación agua-cemento y la resistencia a compresión simple del hormigón endurecido (Best Support Underground, 2025).

**Figura 7**

*Relación agua-cemento (a/c)*




*Nota*. La figura representa la resistencia a comprensión en función a la relación a/c. Tomado de Best Support Underground, 2025.

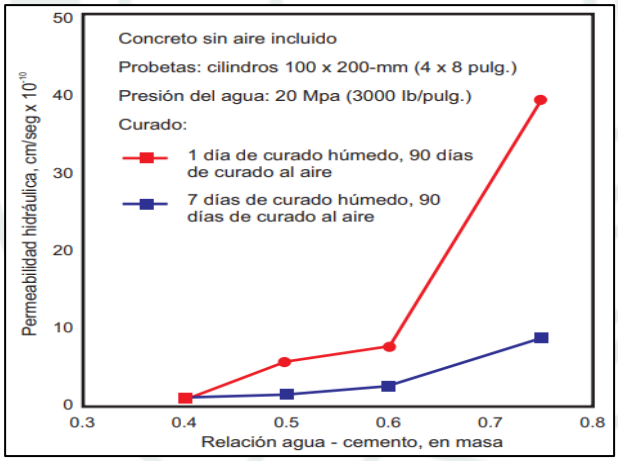
## D. Factores que influyen en la permeabilidad

La permeabilidad del concreto es una propiedad inherente que siempre se encuentra ligada a diversos factores, pero una pregunta común es ¿cómo hacemos para obtener una estructura de concreto más impermeable? La respuesta no tiene una solución única, poder producir, colocar y poner en servicio una estructura de concreto impermeable debe considerar diversos aspectos, en la presente publicación vamos a hacer un resumen de los diversos factores que influyen directamente con la permeabilidad del concreto y el tratamiento de cada uno de ellos para poder obtener un concreto impermeable (Saldaña, 2020).

La relación agua cemento permite determinar la calidad de la mezcla en cuanto avanza la hidratación, la mayoría de los poros serán reducidos a un tamaño pequeño como de 100 nm o menos y también pierden sus interconexiones; de manera que la permeabilidad se reduce, El coeficiente de permeabilidad de la pasta de cemento cuando la mayoría de los huecos capilares son pequeños y no interconectados es del orden de 10 x $^{-12}$ cm/s (Saldaña, 2020).

**Figura 8**

*Coeficiente de permeabilidad de la pasta de cemento*




*Nota*. La figura representa la permeabilidad en función a la relación a/c. Tomado de Saldaña, 2020.

### 2.2.3. Ley ohm

La ley de Ohm se utiliza para determinar la relación entre el voltaje (también llamado tensión), la corriente y la resistencia en un circuito eléctrico. La fórmula básica es: E = I x R

Donde E es el voltaje o tensión (en voltios), I es la corriente (en amperios) y R es la resistencia (en ohmios), de manera explícita, esto significa que el voltaje es igual a la corriente multiplicada por la resistencia (Fluke, 2024).

La resistividad eléctrica es la resistencia que opone un material al paso de la corriente de un extremo a otro, es una métrica sencilla y perspicaz para describir un material, es la inversa de la conductividad eléctrica. La resistividad se denota por ρ y es proporcional tanto a la resistencia del material como al volumen. La región de la sección transversal de un material dado es inversamente proporcional a su resistividad que normalmente se simboliza con la letra griega rho, la fórmula de resistividad se expresa como: ρ = RS/l

Donde: ρ = La resistividad (KΩcm2), R = La resistencia (KΩ), S = Área (cm2), l = Longitud (cm) (Vedantu, 2026).

### 2.2.4. El acero de refuerzo del concreto armado

#### A. Composición

El acero debe de tener una cantidad de carbono superior al 0.03 %, pero menor de 2 %, está compuesto por hierro puro y metaloides (Carbono, azufre, fosforo, Silicio), se empieza a utilizar y se crea acero de refuerzo para las estructuras de construcción desde el siglo XVIII, tabla 3 (Quiroga, 2021).

**Tabla 3**

*Características de las barras de refuerzo*

| Barra | $d_y$ (cm) | Ay (cm2) | P(Kgf/m) |
|---|---|---|---|
| 6mm | 0.60 | 0.28 | 0.22 |
| 8mm | 0.80 | 0.50 | 0.39 |
| 3/8” | 0.95 | 0.71 | 0.56 |
| 1/2” | 1.27 | 1.29 | 0.99 |
| 5/8” | 1.59 | 1.99 | 1.55 |
| 3/4” | 1.91 | 2.84 | 2.24 |
| 1” | 2.54 | 5.10 | 3.98 |
| 1 3/4” | 3.49 | 10.06 | 7.52 |

*Nota*. La tabla representa características de las diferentes varillas de acero. Tomado de Aceros Arequipa.

#### B. Propiedades

Alta ductilidad, capaz de conservar su forma ante distintos esfuerzos, garantiza uniformidad y confiabilidad en la calidad del acero, muy tolerable al calor, puede ser unido, tiene un límite de fluencia de 250 Mega Pascales (Quiroga, 2021).

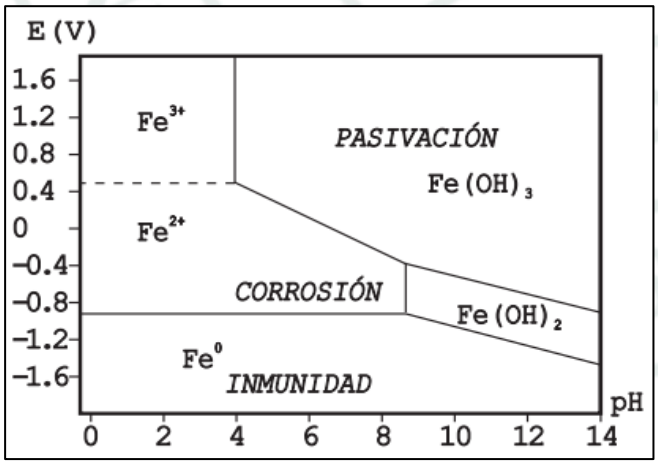
## C. Acero de refuerzo pasivado

La alcalinidad que tiene el hormigón ofrece a la armadura una protección frente a la corrosión, llamada pasivación. Este proceso se va acelerando cuando el hormigón es muy poroso o existe poco espesor de recubrimiento de las armaduras (menos de 2 cm). Las consecuencias se ven en balcones, frentes de forjado, elementos decorativos, donde los revestimientos se desprenden y las armaduras quedan expuestas. La renovación de este hormigón y la protección de las armaduras no se puede realizar con un mortero convencional, se debe emplear un sistema de reparación que asegure la durabilidad, impermeabilidad y adherencia del mortero (Weber, 2024).

Cuando el pH de una solución intersticial permanece por encima de 11, las barras de acero están protegidas contra la corrosión por una película de óxido ferroso pasivo . Un valor de pH alto se mantiene debido a la presencia de un 20-30 % de cal hidratada soluble en el hormigón. Sin embargo, cuando este pH disminuye por debajo de 11 debido a la carbonatación, la película pasiva se rompe y la barra de acero se oxida. Los iones de cloruro también pueden destruir esta película pasiva. El uso de hormigones con bajas relaciones agua-aglutinante reduce significativamente la penetración de dióxido de carbono, oxígeno e iones de cloruro; su microestructura es tan densa que su permeabilidad es muy baja. Se pueden añadir inhibidores de corrosión al hormigón en forma de nitrito de calcio, figura 9 (Science Direct, 2026).

**Figura 9**

*Diagrama de Pourbaix para el fierro*




*Nota*. La figura representa la fase de corrosión del acero en función del pH y E. Tomado Del Valle et al, 2001

Se puede lograr una mayor resistencia a la corrosión mediante la utilización de aditivos para el concreto. Partiendo de que un concreto de buena calidad y que posee una baja

permeabilidad, los beneficios adicionales del aguante son tan significativos, otra técnica de protección incluye las membranas protectoras, la protección catódica, las barras de refuerzo recubiertas con resina epoxica y los selladores para concreto, si son replicados cada 4 o 5 años (NRMCA, 2020).

### 2.2.5. Acero galvanizado

El proceso de galvanizado en caliente consiste en hacer una limpieza del acero mecánicamente si lo requiere, un decapado, y luego la inmersión de las piezas de acero en los baños de zinc fundido, se forma una aleación metalúrgica entre el hierro y el zinc, generando varias capas inter metálicas de distinta composición, la capa más externa y más rica en zinc, es la que le confiere el estético y característico brillo metálico, tabla 4 (Proquimia, 2020).

**Tabla 4**

*Normas del acero de refuerzo galvanizado*

| **Normas del acero de refuerzo galvanizado** | | |
|---|---|---|
| | **Designación** | **Titulo** |
| Estados Unidos | ASTM 767 | Zinc-coated (galvanized) Steel bars for concrete reinforcement |
| Europa | EN 10348-2 | Steel for the reinforcement concrete-galvanized reinforcing steel -Part 2: galvanized reinforcing steel products |
| Brasil | ABNT NBR 16300 | Galvanizacao por imersao a quente de barras de aco para armadura de concreto armado-Requisitos e métodos de ensaio |
| Organización Internacional de normalización (ISO) | | Zinc-coated Steel for the reinforcement of concrete |

*Nota.* La tabla representa las normas del acero galvanizado. Tomado de Muñoz, 2020.

La capa de zinc del recubrimiento galvanizado actúa como una protección de barrera que aísla a la barra del medio corrosivo, también ofrece una protección catódica adicional debido a que el zinc es un metal más activo que el acero y actúa como un ánodo de sacrificio protegiendo a la barra de refuerzo, adicionalmente, el rango de pH para pasivación del zinc es mucho más amplio que del acero, haciendo que el recubrimiento de zinc se mantenga pasivado cuando el pH del concreto se reduce debido a los problemas de carbonatación, cuando el recubrimiento galvanizado empiece a corroerse, los productos de la oxidación del zinc son

sueltos, como un polvo y menos voluminosos que los óxidos de hierro y son capaces de migrar de la superficie de la barra hacia la matriz del concreto causando una mínima disrupción física en el concreto adyacente a la barra, siendo un tema muy importante en una estructura de concreto armado la adherencia a la barra galvanizada el concreto (Muñoz, 2020).

El zinc, es el recubrimiento protector del acero galvanizado, funciona mejor en ambientes alcalinos (pH 7–12.5), lo que lo hace muy adecuado para el contacto con concreto curado. Sin embargo, en entornos ácidos (pH < 5), como zonas afectadas por lluvia ácida industrial o suelos ácidos, la velocidad de disolución del zinc aumenta drásticamente, reduciendo de manera pronunciada la vida útil del zinc (Jeelix, 2025).

### 2.2.6. Patologías que afectan la durabilidad del concreto y generan la corrosión del acero

#### A. Patología debido a fenómenos físicos

#### A.1 La erosión

Es un concepto que se refiere al desgaste estructural a causa de fluidos con componentes sólidos, principalmente agua que se mueven continuamente, los daños en el concreto son el resultado del choque entre éste y dichos fluidos, si bien los daños pueden ser mínimos, tienden a acumularse hasta convertirse en una verdadera preocupación, estos son visibles en las superficies, ya que se muestran faltas de resistencia y consistencia (Sólidos en concretos de México, 2023).

#### A.2 La retracción

Es un fenómeno que ocurre cuando hay una pérdida acelerada de la humedad en la mezcla, lo que causa cambios notables en el volumen de las diferentes capas que conforman la estructura, se trata de un problema con múltiples causas, por ejemplo, el porcentaje de humedad relativa en el ambiente, las variaciones de temperatura y la velocidad del viento. Una vez que ocurre la retracción, ocurren agrietamiento superficial que es uno de los problemas típicos del hormigón y daños estructúrales (Sólidos en concretos de México, 2023).

#### B. Patología debido a fenómenos químicos

#### B.1 La corrosión

Se produce debido a la caída del pH del concreto, por la presencia de sustancias ácidas, la presencia de calcio en el cemento al tener contacto con un ácido, se producirán sales cálcicas, un proceso que es importante mencionar ya que se parece a las reacciones de los ácidos es la

lixiviación, aunque surge por agua pura en la superficie del hormigón, si se presenta, habrá una degradación en el material y una desintegración al transcurrir el tiempo (Sólidos en concretos de México, 2023).

La corrosión del acero es un proceso natural en el cual los materiales, como metales y aleaciones, sufren deterioro y degradación gradual debido a reacciones químicas con su entorno. Esta degradación generalmente se asocia con la exposición a agentes como el oxígeno, la humedad, productos químicos agresivos; la corrosión del acero es un problema común en la industria, puede afectar la integridad y la durabilidad de estructuras metálicas, maquinaria, vehículos, equipos y objetos de uso doméstico. La corrosión del acero puede manifestarse de diversas formas, como la corrosión uniforme, la corrosión por picaduras, la corrosión galvánica y otras (Asociación Técnica Española de Galvanización, 2025).

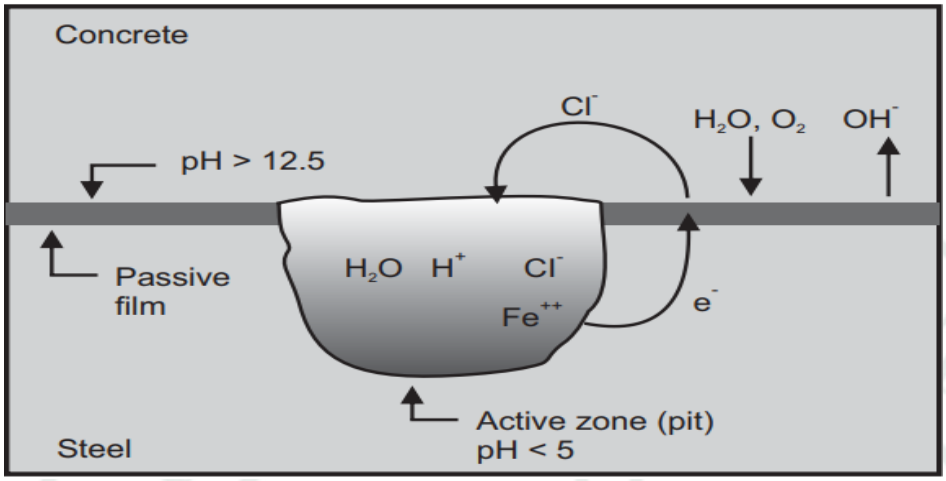
### B.2 Ataque de cloruros

El ion cloruro ($Cl^-$) se forma cuando el cloro gana un electrón o cuando un compuesto como el cloruro de hidrógeno se disuelve en agua. Las altas concentraciones de iones cloruro en el hormigón pueden ser muy problemáticas, debido a su naturaleza electroquímica, los iones cloruro degradan la capa pasiva del acero de refuerzo, sin necesidad de reducir el pH. La corrosión se produce cuando los iones cloruro reaccionan con el acero y el material pasivo circundante, generando ácido clorhídrico. Este ácido corroe el acero de refuerzo, lo que provoca fisuras, desprendimientos y, finalmente, el fallo del hormigón (CTL Group Qatar, 2019).

Existen dos fuentes principales de iones cloruro: una proviene de los componentes de la mezcla de hormigón y la otra del entorno. La primera puede provenir de áridos y arena sin lavar, aditivos e incluso del uso de agua de mar en el procesamiento del hormigón. La segunda proviene principalmente de la exposición al ambiente marino, como la salinidad marina, el contacto directo con agua de mar, el contacto del hormigón con suelos ricos en depósitos de cloruros, o bien de las sales de deshielo y el uso de productos químicos. El mecanismo se aprecia en la figura 10 (CTLGroup Qatar, 2019).

**Figura 10**

*Mecanismo del ataque de cloro al hierro*




*Nota*. La figura representa el proceso de corrosión del acero con el cloro. Tomado de CTL Group Qatar, 2019.

## B.3 Ataque de sulfatos

Los sulfatos son compuestos químicos que están presentes en una gran variedad de concentraciones en el suelo, aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas de mar, la formación de sulfatos más comunes son sulfatos de sodio, potasio, magnesio y calcio, el concreto expuesto a soluciones de sulfatos puede ser atacado y sufrir deterioro en un grado que depende básicamente de tres aspectos: los constituyentes del concreto, la calidad del concreto en el lugar y el tipo y la concentración del sulfato, el ataque por sulfatos se presenta, cuando a través del agua, concentraciones relativamente altas de sulfatos entran en contacto con los compuestos hidratados de la pasta de cemento, este contacto hace que se produzca una reacción química que genera expansión en la pasta y crea una presión capaz de romperla y finalmente desintegrar el concreto (Londoño, 2025).

Las reacciones que se producen por efecto de la presencia de sulfatos dan como resultado un aumento de volumen en el sólido, pero la segunda genera expansiones, rupturas y ablandamiento del concreto pues los sulfatos reaccionan con el aluminato de calcio hidratado, las consecuencias del ataque de sulfatos no solo producen degradación por expansión y fisuración, también, una reducción en la resistencia mecánica debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento, lo anterior también conlleva a una pérdida de adherencia entre la pasta y las partículas de los agregados (Londoño, 2025).

## B.4 Carbonatación

El hormigón es un medio denso, que presenta oquedades a escala microscópica, que están unidas entre sí por poros muy finos pero con el tiempo, esta situación varia, primero con la lluvia, que puede penetrar en el hormigón hasta 2 a 3 cm de profundidad en ciclos alternos de humedad-secado, por otra parte, el aire del ambiente contiene un gas carbónico y oxigeno que siguen el mismo camino que el agua, penetrando a través de los poros del hormigón, humedad, gas carbónico, oxigeno, ingredientes necesarios para desencadenar el proceso de oxidación de la armadura (ConcretOnline, 2018).

El gas carbónico en primer lugar, va a producir lo que se llama la carbonatación del hormigón reaccionando químicamente con los residuos de cal libre, porque la carbonatación es capaz de alcanzar varios cm de profundidad a partir del primer año en determinados hormigones y puede alcanzar el nivel del acero en un plazo de pocos años, incluso en hormigones de buena calidad, generalmente las fases de degradación del hormigón armado se originan por la mala calidad del hormigón y el insuficiente recubrimiento de las armaduras (ConcretOnline, 2018).

### 2.2.7. Corrosión del acero de refuerzo en el concreto armado

La corrosión afecta en gran medida al comportamiento de adherencia del hormigón armado, en el caso del refuerzo de hormigón armado con baja corrosión, la resistencia de adherencia de las barras de acero y el hormigón se encuentra en una fase mejorada, la predicción precisa del comportamiento de la adherencia en esta fase es crucial para un refuerzo racional, que al aumento de la densidad de corriente producía una corrosión menos homogénea, creando marcas de óxido en forma de fosas. Los ensayos de arrancamiento mostraron que, a medida que aumentaba la corrosión, el modo de fallo de la probeta cambiaba de arrancamiento a rotura y de nuevo a arrancamiento, aumentando primero y disminuyendo después la resistencia de la unión, teniendo en cuenta los efectos de la corrosión en la resistencia de la adherencia en diferentes etapas, además de proporcionar orientación para el refuerzo (Maoyao *et al.*, 2024).

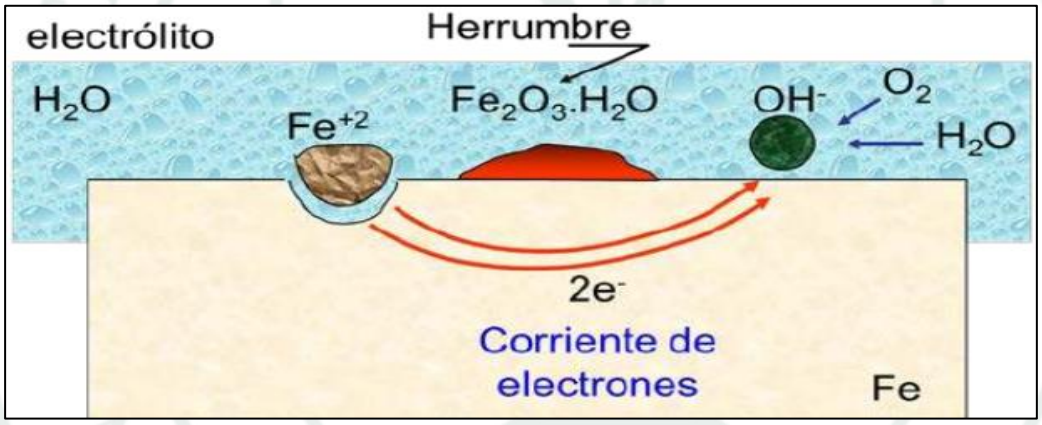
La oxidación del acero, es una reacción del oxígeno con el acero, puede ser el inicio de la corrosión como también es una protección lo que se llama pasivación. La corrosión, es una porosidad que se da por la exposición al medioambiente e influye en la pérdida de las características dimensionales del acero y de sus propiedades mecánicas; cuanto mayor es la corrosión del acero, mayor es su deterioro, la corrosión es considerada como un problema

industrial importante, ya que, al deteriorarse el acero, tiende a romperse y la falta de seguimiento y control puede causar accidentes (Ternium US, 2020).

La corrosión del hierro o del acero es un hecho evidente que no requiere mayor demostración, basta con mirar alrededor del vecindario, caminar por alguna calle y podremos encontrar ejemplos muy claros de la presencia permanente de la corrosión en nuestro día a día, la corrosión electroquímica es debida a la transferencia de carga electrónica en la interfase del hierro o del acero con el agua que lo rodea; es decir, en este tipo de corrosión, la disolución del hierro se produce como consecuencia de un conjunto de reacciones electroquímicas que, en su conjunto, generan una corriente eléctrica dentro del material teniendo la reacción de oxidación: $Fe \rightarrow Fe2+ + 2e-$ y de reducción $O2 + 2H2O + 4e- \rightarrow 4OH^-$, figura 11 (Estudocu, 2019).

**Figura 11**

*Representación de las reacciones químicas que se presentan en la corrosión del Fe en agua*




*Nota*. La figura representa la reacción de oxidación y reducción de la corrosión del acero corrugado. Tomado de Estudocu, 2019.

La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras se da por la destrucción de la capa pasiva dora que se forma naturalmente sobre el acero embebido dentro del concreto, sin embargo, uno de los factores que mayor incidencia tiene para que se presente corrosión es la permeabilidad del recubrimiento, influenciado por procesos de difusión, que generan carbonatación, reducen el pH del concreto y/o también aceleran la corrosión del acero de refuerzo, lo que se concluye que el acero de refuerzo no se oxidará en el concreto debido a la alta alcalinidad de la pasta de cemento (pH hasta de 13), pero si por alguna razón se reduce la alcalinidad del concreto aproximadamente a valores de pH cercanos a 9, se presente corrosión en el acero, figura 12 (García, 2024).

**Figura 12**

*Corrosión del acero de refuerzo*

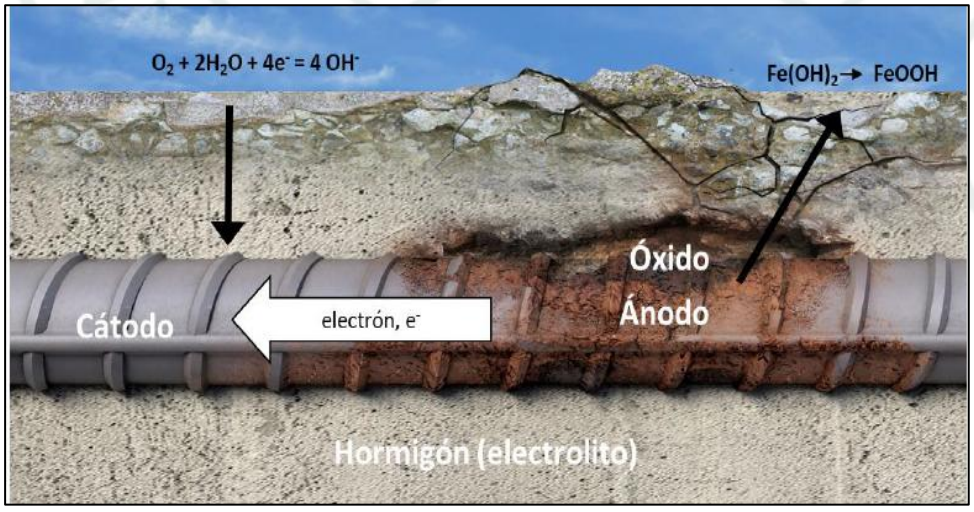


*Nota*. La figura representa el proceso de corrosión del acero de refuerzo. Tomado de García, 2024.

La corrosión de las armaduras de acero embebidas en el concreto se comporta de la misma manera que la corrosión de un metal en soluciones electrolíticas la presencia de cloruros, humedad en los poros del concreto, presencia de oxígeno cerca de las armaduras, en las zonas anódicas originan la corrosión, figura 13 (Donadío, *et al.*, 2023).

**Figura 13**

*Modelo esquemático de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto*




*Nota*. La figura representa el desprendimiento del concreto por efecto de la corrosión del acero. Tomado de Donadío *et al.*, 2023.

Para la detección de la corrosión en el acero se determina cuando se instrumenta la estructura con métodos electroquímicos, la identificación de des pasivación en condiciones reales no es una tarea fácil debido a los cambios de temperatura y humedad, esta dificultad de detectar y medir el momento de des pasivación se puede predecir al bajar el pH a valores menores a 14 (Andrade, 2020).

La corrosión de las barras de acero en el hormigón se inicia por contaminación por cloruro, carbonatación o una combinación de ambos efectos, el hormigón contaminado con cloruro, carbonatado y combinado con cloruro y carbonatado se denomina hormigón Cl, $CO_2$ y Cl-$CO_2$, respectivamente. La presencia de iones cloruro en la solución de los poros y el proceso de carbonatación no sólo cambian la microestructura y la resistividad eléctrica del hormigón, sino también las propiedades de oxidación y el comportamiento de polarización de las barras de acero, afectando así la cinética de corrosión de las micro y macro células (Tang, 2023).

El fenómeno de la carbonatación se puede relacionar con la caída de la resistencia a la compresión del concreto estructural. La importancia de los estudios en el concreto hidráulico radica en que este aglutinante se encuentra entre los materiales de mayor consumo en el mundo, por otro lado, el estudio de la carbonatación del concreto por causa del gas CO2 que permea su matriz porosa, es un requisito fundamental para establecer la probabilidad de que el concreto se degrade y que el refuerzo metálico pueda enfrentar mecanismos de corrosión, lo que finalmente incide en la durabilidad de las construcciones, el grado de carbonatación del concreto puede inducir el cambio en las condiciones protectoras del refuerzo metálico, lo cual acarrea fenómenos de corrosión y facilita la degradación de los elementos estructurales (Chine, *et al.*, 2019).

### 2.2.8. Como evaluar la corrosión

#### A. Equipos

El potenciostato/Galvanostato, con ensayos como las líneas de polarización permiten medir los fenómenos que ocurren en las superficies de los electrodos (interfaz de electrodo-solución), como reacciones electroquímicas y la doble capa eléctrica, se pueden utilizar diferentes técnicas para aplicar/medir el potencial o la corriente en la interfaz electroquímica, el análisis de las curvas obtenidas nos proporciona información sobre los fenómenos que ocurren en esta interfaz (Metrohm, 2022).

El software NOVA es el paquete diseñado para controlar todos los instrumentos de Autolab y el potenciostato/galvanostato de Autolab. El software NOVA ofrece varias funciones como editor de secuencias flexible y potente visión conjunta clara de los datos importantes en tiempo real, herramientas potentes de representación y análisis de datos (Metrohm, 2022).

El sistema de uso de 3 electrodos adecuado para estudios de corrosión, utiliza un electrodo de referencia sumergido en el capilar de Luggin, que debe colocarse lo más cerca posible de la superficie del electrodo de trabajo, con esto, el potenciostato polariza la celda a través de las salidas del electrodo de trabajo (WE) y contra electrodo (CE), mide la corriente que pasa por los electrodos conectados, pero como el potencial utilizado para el control en el sistema de retroalimentación se mide entre las salidas del electrodo de referencia (RE) y S, podemos decir que el potencial de medición se refiere solo a la interfaz del electrodo de trabajo. Al conectar los cables S y WE al electrodo de trabajo, tenemos un control muy preciso del potencial en la interfaz de este electrodo, mientras medimos la corriente que fluye entre él y el contraelectrodo (Metrohm, 2022).

## B. Métodos de evaluar la corrosión

La resistencia a la polarización lineal (RPL) es una técnica de ensayo rápida y no destructiva, comúnmente utilizada en estudios de corrosión de materiales para obtener datos sobre la velocidad de corrosión. En este método, el material se polariza, generalmente en el orden de ±10 mV, con respecto a su potencial de circuito abierto (OCP), el potencial medido cuando no circula corriente neta. Al variar el potencial del material (electrodo de trabajo), se induce una corriente entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo, y la resistencia del material a la polarización se puede determinar calculando la pendiente de la curva de potencial frente a corriente, esta resistencia se utiliza para calcular la velocidad de corrosión del material mediante la ecuación de Stern-Geary (Gamry, 2025).

El ensayo no destructivo es una técnica para identificar si en un acero se está dando el proceso de corrosión sin afectar la integridad del acero de refuerzo. El método electroquímico consiste en determinar el potencial de corrosión, mediante la medición de la diferencia de potencial. El ensayo consiste en conectar el electrodo de referencia, Ag/AgCl al polo negativo y el acero de refuerzo al polo positivo, del voltímetro de alta impedancia. El electrodo de referencia se pone en contacto con la superficie de concreto colocándose una esponja húmeda, para obtener mapas de potencial de corrosión, el cual permite identificar las zonas con mayor probabilidad de ser afectadas por el proceso de corrosión (Villao, 2021).

Si bien, la corrosión es un proceso electroquímico, de ninguna manera debe cumplir con la ley de Ohm, es decir, existencia de una relación lineal entre corriente y potencial, no obstante, si el potencial de polarización es muy pequeño, se ha determinado que presenta cierta aproximación la ley de Ohm, la medición de la resistencia a la polarización lineal, se puede conseguir de dos formas, de manera potenciostática, el cual se realiza efectuando un barrido de potencial (ΔE) y se registra la variación de corriente (ΔI), la segunda forma es de manera galvanos tatica en este caso se realiza el barrido de corriente (ΔI) y se registra la variación de potencial (ΔE) (Villao, 2021).

Actualmente se ha desarrollado sistemas inteligentes de monitoreo y de evaluación no destructiva de la integridad estructural de concreto reforzado, empleando fibra óptica, cerámicas piezoeléctricas y sensores específicos, estos últimos están formados por electrodos conectados de tal manera que permita efectuar análisis electroquímicos, posibilitando el registro del estado en la que se encuentra el acero de refuerzo embebido en el concreto, así como, los parámetros que permitan describir las condiciones del proceso de corrosión, estos sistemas de monitoreo por sensores, permite idear estrategias de mantenimiento más eficientes y de reparaciones focalizadas, que eviten que el deterioro de la estructura comprometa su durabilidad, es decir, disminuya su vida útil, la ventaja de esta clase de sistemas, es que permite minimizar las operaciones de inspección, reducir los costes de mantenimiento y mejorar la toma de los datos (Villao, 2021).

### 2.2.9. Como evitar la corrosión

Con el fin de obtener un tratamiento de mayor durabilidad se recomienda incluir dentro del sistema de reparación el uso de ánodos galvánicos. El zinc presenta una mayor tendencia a la oxidación que el acero de la estructura a proteger, es decir, que tiene un potencial de reducción más negativo, la diferencia de potencial entre los dos metales implica que el ánodo galvánico se corroe preservando el refuerzo de la zona reparada, ya que el material del ánodo se consumirá antes que el acero de la estructura (Toxement, 2017).

La corrosión de los metales se puede evitar de diferentes maneras, con el galvanizado, donde el zinc actúa como un metal de sacrificio haciendo como ánodo; uso de pinturas especiales, se trata del método más común de protección, la pintura se aplica después de limpiar toda la superficie con un cepillo de acero y se aplican al menos dos capas, recubrimientos de zinc, a este procedimiento se le conoce como galvanización, aquí, todas las piezas de acero se

sumergen en zinc fundido para lograr un recubrimiento completo (Acerostorices.com.mx, 2023).

### 2.2.10. Cálculos estructurales en el concreto

Response-2000 es un programa de análisis seccional fácil de usar que calculará la resistencia y la ductilidad de una sección transversal de hormigón armado sometida a cizalla, momento y carga axial, las tres cargas se consideran simultáneamente para encontrar la respuesta de carga deformación completa utilizando las últimas investigaciones basadas en la teoría del campo de compresión modificado, el programa fue desarrollado en la Universidad de Toronto por Evan Bentz en un proyecto supervisado por el profesor Michael P. Collins (Bentz, 2001).

CIVIL-UP es un conjunto de códigos realizados en MATLAB versión R2015b propiedad de Mathworks, el cual utiliza el lenguaje de programación propio, de la aplicación, estos códigos tienen como fin realizar los análisis monotónicos a secciones rectangulares o circulares de concreto reforzado hallando su respectivo diagrama de momento-curvatura, la parte inicial consta de la presentación del programa, después se encuentra el ingreso de datos para conocer, dimensiones, propiedades del refuerzo y de los materiales, el código permite el análisis de elementos sometidos a flexión y carga axial (García, 2017).

Un diagrama de interacción, establece una relación entre la resistencia a la compresión y a la flexión nominal o de diseño, la resistencia nominal a la compresión para elementos no pre esforzado, en el cual el momento es cero, se calcula mediante las ecuaciones (Comité ACI 318, 2014).

$$Pn = 0.85 * 0.85f'c\ (Ag - Ast) + Astfy$$

$$Pn = 0.80 * 0.85f'c\ (Ag - Ast) + Astfy$$

Donde:

$Ag$: Área de la sección transversal del elemento.

$Ast$: Área de acero longitudinal de la sección transversal.

$f'c$: Esfuerzo de compresión del concreto.

$fy$: Resistencia a la fluencia del acero.

$Pn$: Resistencia nominal a la compresión.

Para la resistencia de diseño a la compresión es necesario tener en cuenta el factor de reducción ϕ, cuyo valor se muestra en la Tabla 5 en la cual se observa que depende de la

deformación unitaria del elemento ε y varía dependiendo del tipo de refuerzo transversal (Comité ACI 318, 2014).

**Tabla 5**

*Factor de reducción de resistencia*

| | | φ | |
|---|---|---|---|
| **Deformación unitaria ε** | **Clasificación** | **Tipo de refuerzo transversal** | |
| | | **Espirales** | **Otros** |
| $\varepsilon < \varepsilon_y$ | Controlado a compresión | 0.75 | 0.65 |
| $\varepsilon_y < \varepsilon < 0.005$ | Transición | 0.75+0.15(ε-$\varepsilon_y$)/(0.005-$\varepsilon_y$) | 0.65+0.25(ε-$\varepsilon_y$)/(0.005-$\varepsilon_y$) |
| $\varepsilon > 0.005$ | Controlado a tensión | 0.9 | 0.9 |

*Nota*. La figura representa los factores de reducción de resistencia. Tomado de Comité ACI 318, 2014.

Donde:

ε: Deformación unitaria

$\varepsilon y$: Deformación unitaria neta en el extremo de la capa del refuerzo longitudinal en tensión.

Con el factor de reducción de resistencia, se calcula la resistencia de diseño $\phi Pn$ a la compresión mediante el producto de dicho factor y la resistencia nominal a la compresión, para el caso en el que solo actúa carga axial, se considera dicho factor igual a 0.75 y 0.65 para espirales y estribos, respectivamente (Mc Cormac & Brown, 2011).

Luego para la resistencia nominal a la tracción de un elemento de concreto armado, se desprecia la resistencia a la tracción del concreto y se considera solamente la resistencia del refuerzo, ecuación siguiente (Mc Cormac & Brown, 2011).

$$Tn = Astfy$$

Donde:

$Ast$: Área de acero longitudinal de la sección transversal.

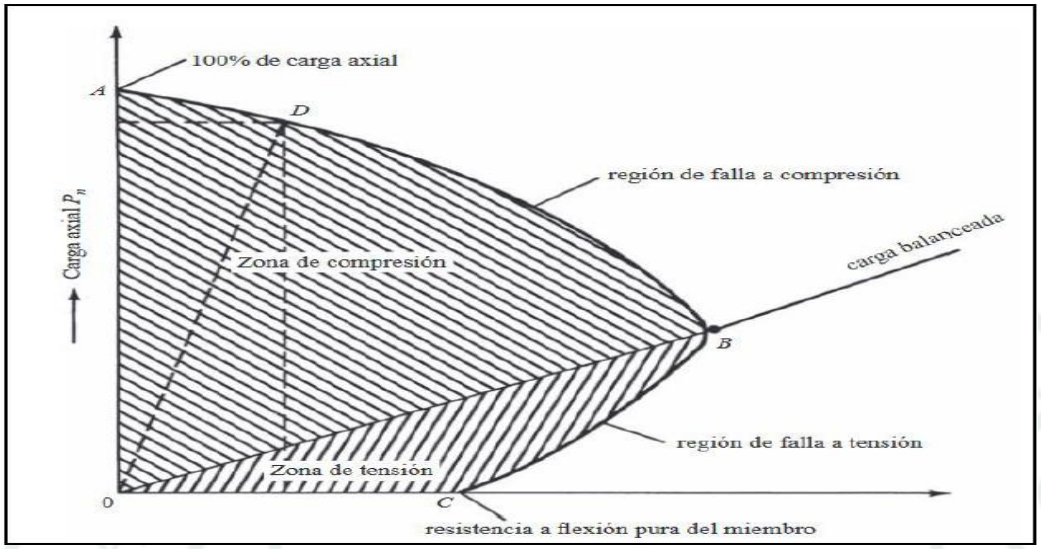
$fy$: Resistencia a la fluencia del acero.

$Tn$: Resistencia nominal a la tracción.

Posteriormente a partir de la relación entre carga axial y momento, es necesario calcular el punto balanceado, en el cual la combinación de resistencia a la flexión y a la compresión poseen su valor más alto y define la zona de falla al a compresión y a la tracción, figura 14 (Mc Cormac & Brown, 2011).

**Figura 14**

*Zonas de falla de un diagrama de interacción*




*Nota*. La figura representa el diagrama de interacción del acero. Tomado de Mc Cormac & Brown, 2011.

El comportamiento del mortero se describe mediante un modelo isótropo de daño teniendo en cuenta que la resistencia a compresión es bastante superior a la resistencia a tracción, el comportamiento del acero del núcleo se representa mediante un modelo plástico de endurecimiento cinemático e isótropo; las condiciones de agotación se establecen a través de un modelo de daño teniendo en cuenta que las resistencias a compresión y tracción son iguales (Medina *et al.*, 2014).

# CAPÍTULO III

## 3. METODOLOGÍA PROPUESTA

### 3.1. Método experimental

Se seleccionó la metodología experimental que incluye la toma de muestras con el fin de analizar los iones sulfato, nitrato, carbonato, cloro, valores de pH y conductividad del agua de subsuelo del área de estudio. Posteriormente se realizaron las pruebas de corrosión del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado utilizando el Potenciostato/Galvanostato, en la celda ASTM y el software NOVA. Con los valores obtenidos de velocidad de corrosión (mm/año) para el acero de refuerzo pasivado y el acero corrugado galvanizado, se analizó las curvas de interacción antes y después del proceso de corrosión, figura 15.

### 3.2. Lugar de la experimentación

Laboratorio de Electrometalurgia y Corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

### 3.3. Muestra

Para el desarrollo del presente trabajo el área de estudio correspondiente a las construcciones ubicadas cerca del Lago Titicaca se ha dividido en tres zonas de análisis:

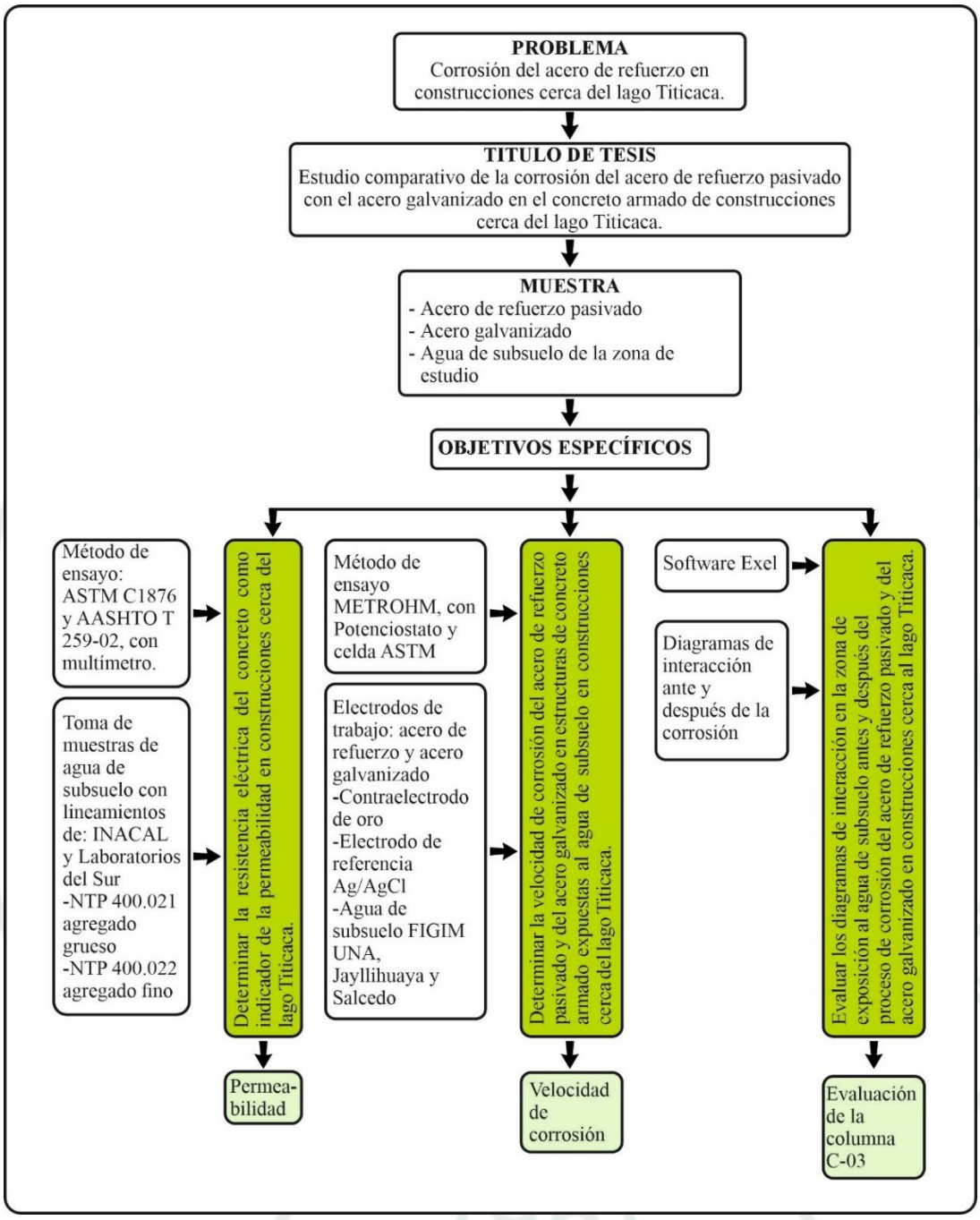
- Zona 01 – Puno Central, con expediente técnico del proyecto en estudio “Mejoramiento del servicio de formación académica en la Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica de la UNA”.
- Zona 02– Jayllihuaya
- Zona 03 – Salcedo

#### 3.3.1. Columna

Muestra utilizada en el estudio, que permite visualizar el tipo de columna, la profundidad, el acero seleccionado y las dimensiones de la sección. Es la columna C-03, la cual soporta mayor carga de las columnas apropiadas para el estudio, figuras 16 y 17.

**Figura 15**

*Esquema de la metodología experimental*




*Nota*. La figura representa la metodología según los objetivos específicos para el desarrollo experimental.

### 3.3.2. Especificaciones del acero de refuerzo en el concreto

- Acero ASTM A615 grado 60
- Fy = 4200 – 5710 Kg/cm2 (límite de fluencia)
- r = 6320 kg/cm2 mínimo (resistencia a la tracción)

### 3.3.3. Especificaciones del concreto armado

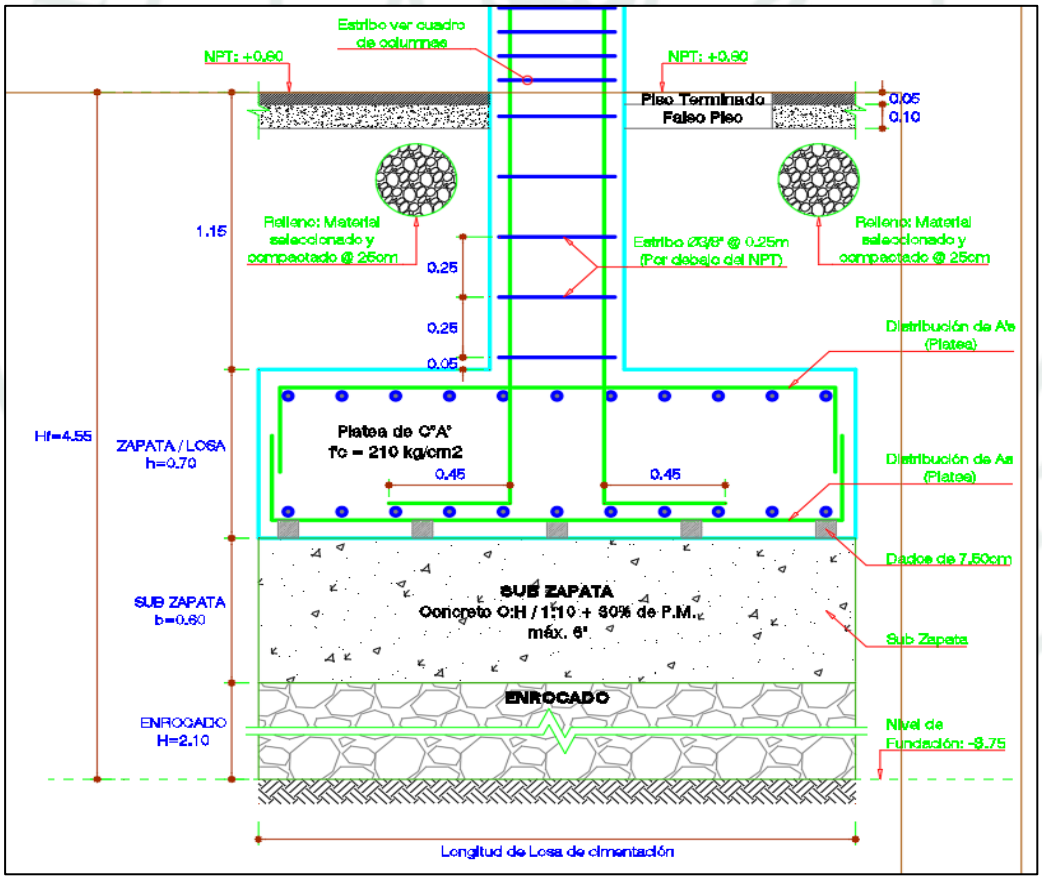
- Losas y vigas de cimentación, zapatas, losa aligerada y escaleras
- fc =210 Kg/cm2
- Vigas, columnas y placas fc=210Kg/cm2
- Columna de arriostre y vigas de confinamiento fc=175Kg/cm2
- El curado será por vía húmeda.

### 3.3.4. Especificaciones de los recubrimientos libres en el concreto

- Zapatas, plateas y vigas de cimentación = 7.50 cm.
- Vigas y columnas = 4.00 cm (Según secciones).
- Losa aligerada, escaleras y gradas = 2.50 cm.

**Figura 16**

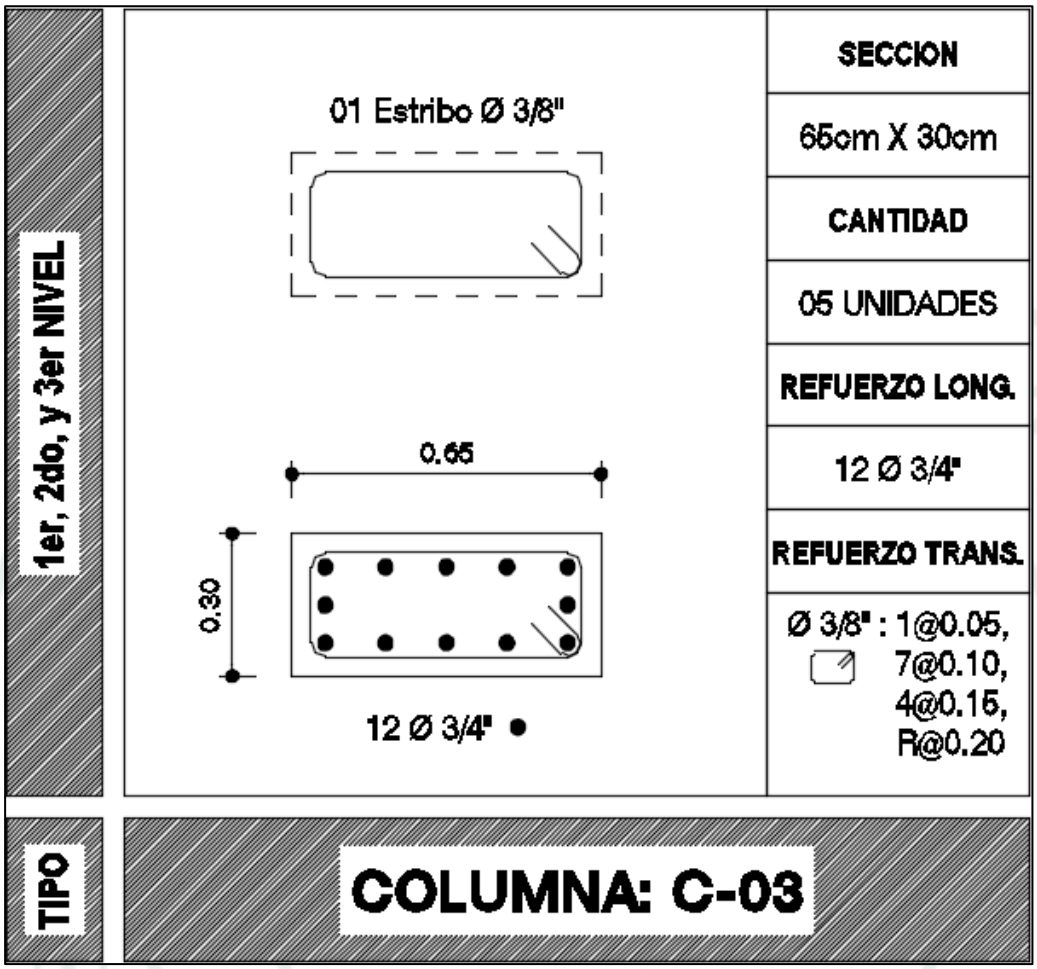
*Columna, zapata y enrocado del subsuelo*




*Nota*. La figura representa la profundidad de una columna de estudio. Tomado de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

**Figura 17**

*La columna C-03 y el acero corrugado*




*Nota*. La figura representa la columna C-3 en estudio. Tomada de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

### 3.3.5. Metodología para el agua de subsuelo y agregados

#### A. Toma de muestra de agua de subsuelo

La toma de muestras de agua de subsuelo se realizó siguiendo los lineamientos del INACAL (Instituto Nacional de Calidad, Perú), y la Norma ASTM D4448-01 (2019) aplicando los protocolos específicos que han garantizado la representatividad y calidad de las muestras convertido en un asunto de interés nacional. El objetivo del muestreo en pozos de monitoreo de aguas subterráneas es obtener muestras que cumplan con los objetivos de calidad de la muestra. Esta guía analiza las ventajas y desventajas de diversos métodos de muestreo de pozos, equipos y técnicas de preservación de muestras.

Para el análisis de las impurezas del agua en estudio se optó por el método de análisis químico, debido a su mayor precisión mediante el uso de equipos basados en técnicas de

adsorción. Este procedimiento permitió obtener la composición química del agua de subsuelo, la cual se empleó para el proceso experimental de corrosión en la celda ASTM

## B. Agregados

Para la clasificación de los agregados se consideraron las normas NTP 400.021 para agregados gruesos, NTP 400.022 para agregados finos y NTP 400.011 para el análisis granulométrico. De acuerdo con la Tabla 6, se evaluó el tamaño de partícula de los agregados finos y gruesos, siguiendo los criterios establecidos por la normativa, tabla 6.

**Tabla 6**

*Tamices a utilizar para realizar el análisis granulométrico*

| Agregado | Tamices normalizados |
|---|---|
| Fino | 150 µm (N° 100) |
| | 300 µm (N° 50) |
| | 600 µm (N° 30) |
| | 1,18 µm (N° 16) |
| | 2,36 µm (N° 8) |
| | 4,75 µm (N° 4) |
| Grueso | 9.5 mm ( 3/8 pulg.) |
| | 37.5 µm (N° 1 1/2) |
| | 25,0 µm (N° 1) |
| | 12,5 µm (N° 1/2) |
| | 4,75 µm (N° 4) |
| | 2,36 µm (N° 8) |

*Nota*. La tabla representa el tamaño de los agregados fino y grueso según los tamices normalizados. Tomado de NTP 400.011 INDECOPI, 2008.

## C. Permeabilidad

Según la norma ASTM C1876 Internacional (2023), método de ensayo de determinación de la resistividad o conductividad eléctrica en masa de muestras moldeadas o secciones con núcleo de hormigón endurecido después de la inmersión en agua saturada con una solución de poro simulado con el fin de proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de fluidos e iones agresivos disueltos, con los valores expresados en unidades del SI.

Se ha utilizado también la norma AASHTO T 259-02 (2021), método que abarca la determinación de la resistencia de las muestras de hormigón a la penetración de iones cloruro. Su objetivo es determinar los efectos de las variaciones en las propiedades del hormigón sobre su resistencia a la penetración de iones cloruro, las variaciones en el hormigón pueden incluir, entre otras, cambios en el tipo y contenido de cemento, la relación agua-cemento, el tipo y proporción de áridos, los aditivos, los tratamientos, el curado y la consolidación. Este método de ensayo no pretende proporcionar una medida cuantitativa de la vida útil esperada de un tipo específico de hormigón.

### 3.3.6. Metodología experimental de la corrosión del acero pasivado y del acero galvanizado

Se empleó método de ensayos determinados por METROHM

#### A. Instalación y montaje de la celda ASTM

Se instaló la celda ASTM, y se realizó el montaje de la celda, siguiendo las instrucciones del fabricante y las especificaciones de la norma ASTM, asegurando un buen contacto de los electrodos con los terminales del Potenciostato/Galvanostato.

#### B. Electrodo de trabajo

Se prepararon los electrodos de trabajo con un área de 0.7854 cm2 según la norma de la celda ASTM. Para ello, se elaboraron los electrodos de acero corrugado y de acero galvanizado, solicitando el servicio especializado para el proceso de galvanizado.

#### C. Electrodo de referencia

Se utilizó un electrodo de referencia adecuado Ag/AgCl para establecer el potencial de referencia, el cual fue colocado en el capilar de Luggin.

#### D. Electrodo auxiliar

Se empleó un contra electrodo o electrodo auxiliar de oro para completar el circuito electroquímico.

#### E. Solución para el proceso de corrosión

Se utilizó el agua de subsuelo de la zona FIGIM-UNA, Jayllihuaya y Salcedo.

## F. Conexión al potenciostato

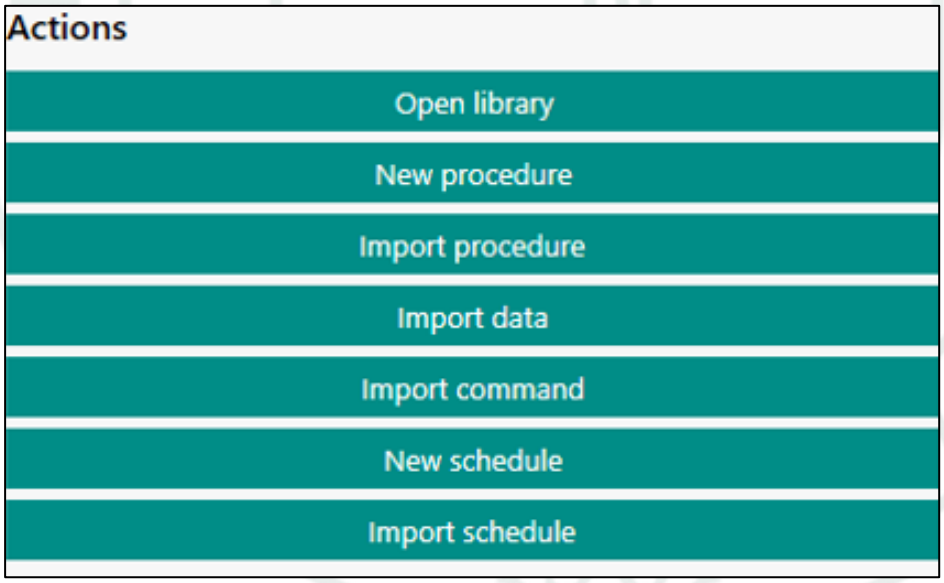
Se conectó los electrodos de la celda ASTM al Potenciostato/Galvanostato, siguiendo el esquema de conexión indicado por Autolab–Metrohm, el electrodo de trabajo (WE), el contraelectrodo (CE) y el electrodo de referencia (RE).

## G. Software NOVA

- Se abrió el software NOVA y se seleccionó la opción **open library** y luego **línear polarizatión** (Figuras 18y 19). Se configuraron los parámetros del experimento, incluyendo el potencial inicial y final, la velocidad de barrido, el área del electrodo de trabajo, peso específico y el peso equivalente del acero corrugado y del acero galvanizado.
- Se inició el experimento de polarización potenciostática en el Potenciostato/Galvanostato y con el software NOVA, se aplicó el potencial o corriente definida, registrando la respuesta de corrosión del acero corrugado y del acero galvanizado.

**Figura 18**

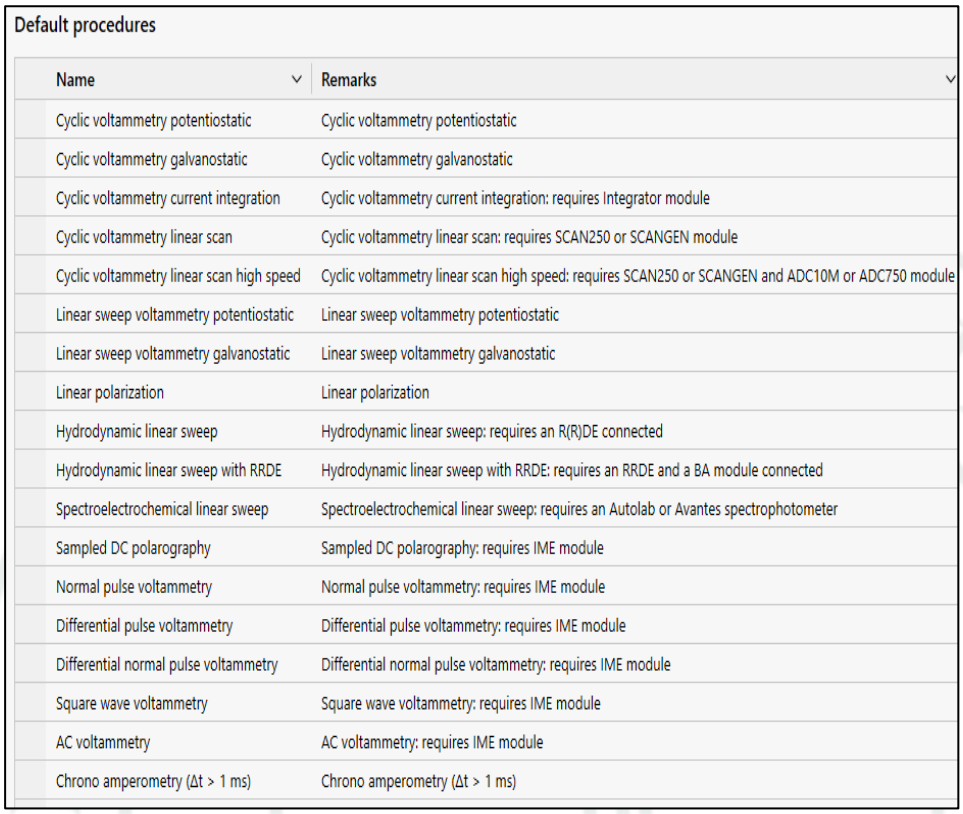
*Software NOVA para seleccionar la experimentación de las líneas de polarización*




*Nota*. La figura representa el inicio del uso del software NOVA.

**Figura 19**

*Para iniciar la experimentación*



Default procedures

| Name | Remarks |
|---|---|
| Cyclic voltammetry potentiostatic | Cyclic voltammetry potentiostatic |
| Cyclic voltammetry galvanostatic | Cyclic voltammetry galvanostatic |
| Cyclic voltammetry current integration | Cyclic voltammetry current integration: requires Integrator module |
| Cyclic voltammetry linear scan | Cyclic voltammetry linear scan: requires SCAN250 or SCANGEN module |
| Cyclic voltammetry linear scan high speed | Cyclic voltammetry linear scan high speed: requires SCAN250 or SCANGEN and ADC10M or ADC750 module |
| Linear sweep voltammetry potentiostatic | Linear sweep voltammetry potentiostatic |
| Linear sweep voltammetry galvanostatic | Linear sweep voltammetry galvanostatic |
| Linear polarization | Linear polarization |
| Hydrodynamic linear sweep | Hydrodynamic linear sweep: requires an R(R)DE connected |
| Hydrodynamic linear sweep with RRDE | Hydrodynamic linear sweep with RRDE: requires an RRDE and a BA module connected |
| Spectroelectrochemical linear sweep | Spectroelectrochemical linear sweep: requires an Autolab or Avantes spectrophotometer |
| Sampled DC polarography | Sampled DC polarography: requires IME module |
| Normal pulse voltammetry | Normal pulse voltammetry: requires IME module |
| Differential pulse voltammetry | Differential pulse voltammetry: requires IME module |
| Differential normal pulse voltammetry | Differential normal pulse voltammetry: requires IME module |
| Square wave voltammetry | Square wave voltammetry: requires IME module |
| AC voltammetry | AC voltammetry: requires IME module |
| Chrono amperometry (Δt > 1 ms) | Chrono amperometry (Δt > 1 ms) |

*Nota.* La figura representa la selección del ensayo de las líneas de polarización.

## H. Líneas de polarización y pendiente de Tafel

El manual de Autolab–Metrohm proporciono la metodología experimental para determinación de las líneas de polarización con la opción open library (Figura 18). Posteriormente la celda de corrosión se preparó con los electrodos y el electrolito, siguiendo las especificaciones de la celda ASTM. Posteriormente, se conectó la celda al Potenciostato/Galvanostato, configurado mediante el software NOVA, con el fin de registrar las curvas de polarización y las pendientes de Tafel, se analizaron los datos obtenidos para evaluar el comportamiento corrosivo de los aceros y determinar la velocidad de corrosión en mm/año (Metrohm, 2022).

## I. Utilidad del software Nova

El software NOVA registró los datos de intensidad de corriente y potencial durante la experimentación, ofreciendo gran flexibilidad para la configuración de pruebas y el análisis de resultados.

Finalizada la experimentación, se analizaron los datos obtenidos para evaluar el comportamiento frente a la corrosión del acero corrugado y del acero galvanizado, utilizando las herramientas de análisis disponibles del software NOVA.

### 3.3.7. De los diagramas de interacción en la zona de exposición al agua de subsuelo del acero corrugado pasivado antes y después de la corrosión

Terminada la experimentación, se procedió a analizar los diagramas de interacción a partir de los resultados de la corrosión del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado, expresados en mm/año, utilizando plantillas desarrolladas en Excel para el procesamiento y la interpretación de los datos.

# CAPÍTULO IV

## 4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1. Desarrollo de la investigación del agua de subsuelo y la resistencia eléctrica del concreto como indicador de la permeabilidad

#### 4.1.1. Muestreo del agua en las zonas estudio

La muestra de agua de subsuelo se obtuvo siguiendo las instrucciones proporcionadas por Laboratorios Analíticos del Sur – Arequipa (LAS):

- Se inicio con las perforaciones y toma de muestra en la Zona 01 FIGIM UNA, la zona 02 Jayllihuaya y zona 03 Salcedo.
- Se utilizó guantes descartables y un balde para la toma de la muestra
- Se tomó la muestra que aflora en el cuerpo de agua.
- La muestra se hecho a un frasco de un litro etiquetados proporcionados por LAS
- Los frascos fueron trasportados en una caja de tecnopor para su conservación de la muestra y posterior análisis, figura 7.

**Tabla 7**

*Calidad del agua como electrolito del lugar de estudio*

| Muestra | Compuestos a ser analizados | | | | Valores de: | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sulfatos | Carbonatos | cloruros | Nitra-tos | pH | Conductividad |
| FIGIM-UNA | X | X | X | X | X | X |
| Jayllihuya | X | X | X | X | X | X |
| Salcedo | X | X | X | X | X | X |

*Nota*. La tabla representa los compuestos a ser analizados de las áreas de estudio

#### 4.1.2. Agregados de la cantera del rio Cutimbo

Se ha sacado el agregado de la cantera del rio Cutimbo, ubicado en el departamento de Puno, provincia de Puno a orillas del rio Cutimbo, aguas arriba del puente Cutimbo, a 23 Km de la cuidad de Puno, cantera con un potencial de 95000 m3, con el tipo de material de rio, con una area explotable de 70869.649 m2, es de propiedad de la comunidad de Cutimbo (Provias Nacional, 2018).

**Tabla 8**

*Ubicación de la cantera del rio Cutimbo*

| Descripción | Norte | Este | Cota |
|---|---|---|---|
| CC-01 | 8226656.00 | 391755.000 | 3917.000 |
| CC-02 | 8226604.754 | 391711.791 | 3916.821 |

*Nota*. La tabla representa el lugar de la cantera de los agregaos. Tomado de Provias Nacional, 2018.

### 4.1.3. Composición de la mezcla

Se ha considerado la composición establecida para la mezcla de concreto, de acuerdo al expediente técnico de la obra en estudio, tabla 9.

**Tabla 9**

*Composición de mezclas según el expediente técnico*

| Material | Unidad | Fc=210kg/cm2 a/c= 0.49 |
|---|---|---|
| Cemento | Kg | 1.00 |
| Agregado fino | Kg | 1.90 |
| Agregado grueso | Kg | 2.23 |
| Agua | L | 0.49 |

*Nota*. La tabla representa la relación a/c del expediente técnico. Tomado de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

Con los datos de las características de los agregados de la cantera Cutimbo, particularmente los valores de peso específico, y utilizando el diseño de mezcla correspondiente (tabla 10), se fabricaron los cilindros de concreto experimental con un diámetro de 10 cm y una altura de 20 cm.

**Tabla 10**

*Dosificación de mezclas para el molde experimental*

| Material | Unidad | fc=210kg/cm2 a/c = 0.49 |
|---|---|---|
| Cemento | Kg | 0.631 |
| Agregado fino | Kg | 1.199 |
| Agregado grueso | Kg | 1.408 |
| Agua | L | 0.306 |

*Nota*. La tabla representa el cálculo de la relación a/c para la experimentación de la permeabilidad. Tomado de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

### 4.1.4. Secuencia operativa para la fabricación de las probetas de concreto

Con la dosificación de las mezclas, con agregados de la cantera Cutimbo, cemento Rumi, con agua de la ciudad universitaria UNA, se fabricó los cilindros de concreto de acuerdo al procedimiento descrito a continuación:

- Se colocó en la batidora el agregado grueso y parte del agua de mezclado.
- Se comenzó a mezclar y luego se colocó el agregado fino.
- Después de mezclar los agregados, se adicionó el cemento y se mezcló con cuidado de no perderlo.
- Luego se agregó el resto del agua y se mezcló por 3 min, se permitió que la mezcla repose durante 3 minutos y se evitó la evaporación, y luego se mezcló por 2 minutos más.
- Se descargó el concreto en una carretilla limpia y ligeramente húmeda, y se mezcló con una pala para asegurar que la mezcla siga uniforme.

Para el moldeo del cilindro se siguió los siguientes pasos:

- Se aseguró que el molde de cilindro este limpio y que la superficie interior esta aceitada.
- Se colocó el concreto en capas de igual volumen (3 capas).
- Se compactó con el extremo redondeado de la varilla, 25 golpes.
- Se golpeó cada capa ligeramente con el mazo (10 a 15 veces), con el objeto de permitir la salida de las burbujas grandes de aire (ASTM C-192; 2012).
- Se eliminó el exceso de concreto
- Por último, se enrasó utilizando la barra compactadora y la llaneta.
- El cilindro de concreto permaneció en el mismo lugar durante las 24h, posteriormente se retiró cuidadosamente del molde y fue transportado directamente a un lugar húmeda (ICOTEC, 2013).

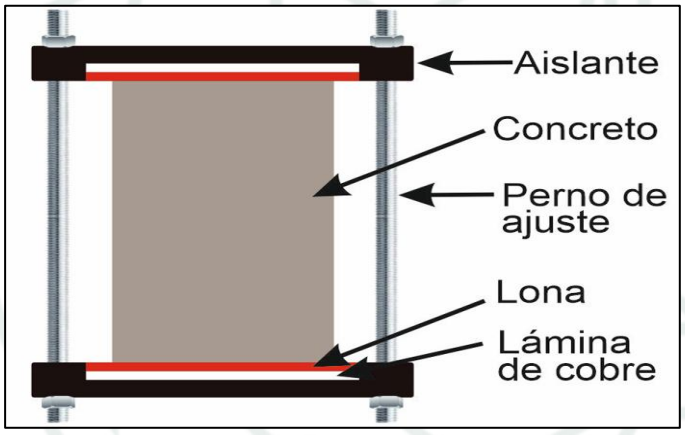
### 4.1.5. Procedimiento de operaciones para determinar la permeabilidad del concreto mediante la resistividad eléctrica

Se ha realizado el procedimiento considerando la norma AASHTO T 259-02 (2021) método que abarca la determinación de la resistencia de las muestras de hormigón a la penetración de iones cloruro y ASTM C1876 Internacional (2023), método de ensayo de determinación de la resistividad eléctrica en masa de muestras moldeadas de hormigón después de la inmersión en agua saturada de iones agresivos, cilindro de concreto de 10 cm diámetro y 20 cm de altura

- Se tomó los cilindros de concreto fabricado con la dosificación de mezclas de la tabla 10.
- Se colocó un buen contacto de lona humedecida en solución 01 M de cloruro de sodio en ambos lados del cilindro luego una lámina de cobre después de los discos de lona, con sujetadores aislantes empernados.
- Encendido el multímetro con los terminales en las láminas de cobre se midió la resistencia en KΩ. de la siguiente manera: a) primera lectura 12 horas después del desmoldado del cilindro de concreto experimental, b) segunda lectura después de 28 días de curado, 3 meses expuesto al sol y secado final en una estufa 24 horas a 104°C (Román et al. 2013), c) para finalizar la experimentación las probetas de concreto se han sumergido 09 meses en solución 1M de cloruro de sodio, luego lavadas y después de 12 horas de secado a la intemperie se tomó la lectura.

**Figura 20**

*Figura de montaje para medir la resistencia eléctrica del concreto experimental*




*Nota*. La figura representa el equipo para fijar el cilindro de concreto para medir la permeabilidad por resistencia eléctrica.

## 4.2. Desarrollo experimental de la corrosión del acero pasivado y del acero galvanizado

### 4.2.1. Preparación de electrodos

Se fabricaron los electrodos de acuerdo con los requerimientos de la celda ASTM:

- Se tornearon varillas de acero corrugado hasta obtener un diámetro de 1.00 cm, y se garantizó un área de trabajo de 1.00 ± 0.05 cm². Posteriormente, se soldó un conductor de alambre de acero inoxidable a cada disco para permitir su conexión durante los ensayos de corrosión.

- En el caso de los electrodos de acero corrugado galvanizado después de ser torneadas y soldado el conductor acero inoxidable, las muestras fueron sometidas al proceso de galvanizado por inmersión en caliente, este proceso se solicitó servicio.
- Finalmente, todos los electrodos fueron recubiertos con resina epóxica, dejando expuesta únicamente una cara con el área definida de 0.7854 cm2, para el estudio del proceso de corrosión de los electrodos de trabajo, figura 21.

**Figura 21**

*Electrodos de trabajo de acero corrugado, acero galvanizado y contraelectrodo de oro*



*Nota*. La figura representa la imagen de electrodos de acero corrugado, acero corrugado galvanizado y contra electrodo de oro.

### 4.2.2. Agua de subsuelo para la experimentación de la corrosión del acero corrugado y acero galvanizado

Para la experimentación del estudio de la corrosión del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado se empleó agua de subsuelo proveniente de las zonas: Zona 01 FIGIM UNA, zona 02 Jayllihuaya y zona 03 Salcedo, recurso hídrico que contiene diversas sales en solución. Según Roymaplas (2025), las sales permiten el paso de corriente eléctrica entre dos electrodos conductores, facilitando los cambios que ocurren en los electrodos durante la corrosión.

### 4.2.3. Conexiones a la celda experimental ASTM

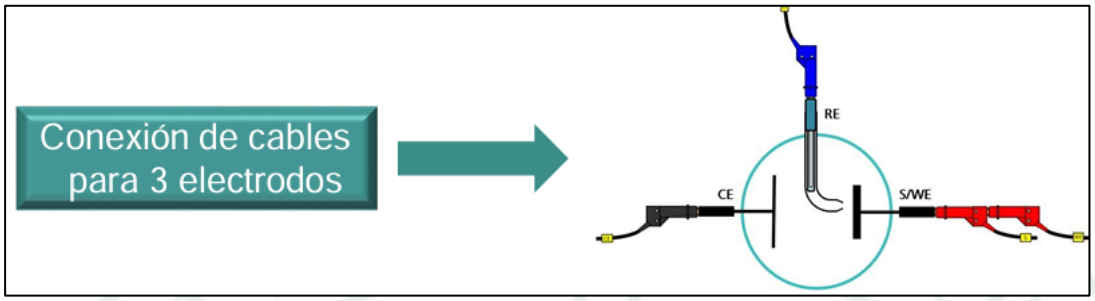
Se ha conectado a la celda (figura 22):

- Electrodo de trabajo (WE): de acero corrugado en los primeros experimentos y acero galvanizado los segundos experimentos
- Electrodo de referencia (RE): Ag/AgCl.

- Contraelectrodo (CE) o electrodo auxiliar de oro.

**Figura 22**

*Sistema de conexión*



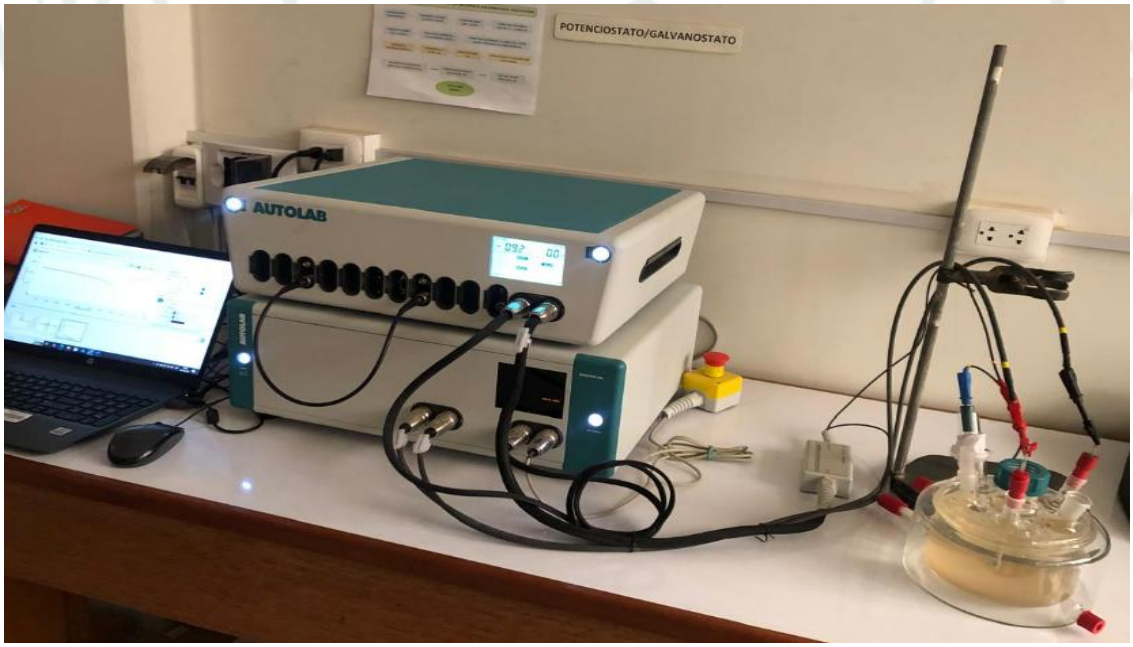

*Nota*. La figura representa la forma de instalación de los electrodos en la celda ASTM. Tomado de Metrohm.

### 4.2.4. Operación del Potenciostato/Galvanostato y uso del software NOVA

- Se encendió el estabilizador de corriente, luego el potenciostato/galvanostato y finalmente la laptop.
- Posteriormente, se conectó la celda ASTM con los terminales de los electrodos al potenciostato/galvanostato luego la computadora con el software NOVA, habilitado el software se experimentó con las líneas de polarización (Figura 23, 24 y 25).

**Figura 23**

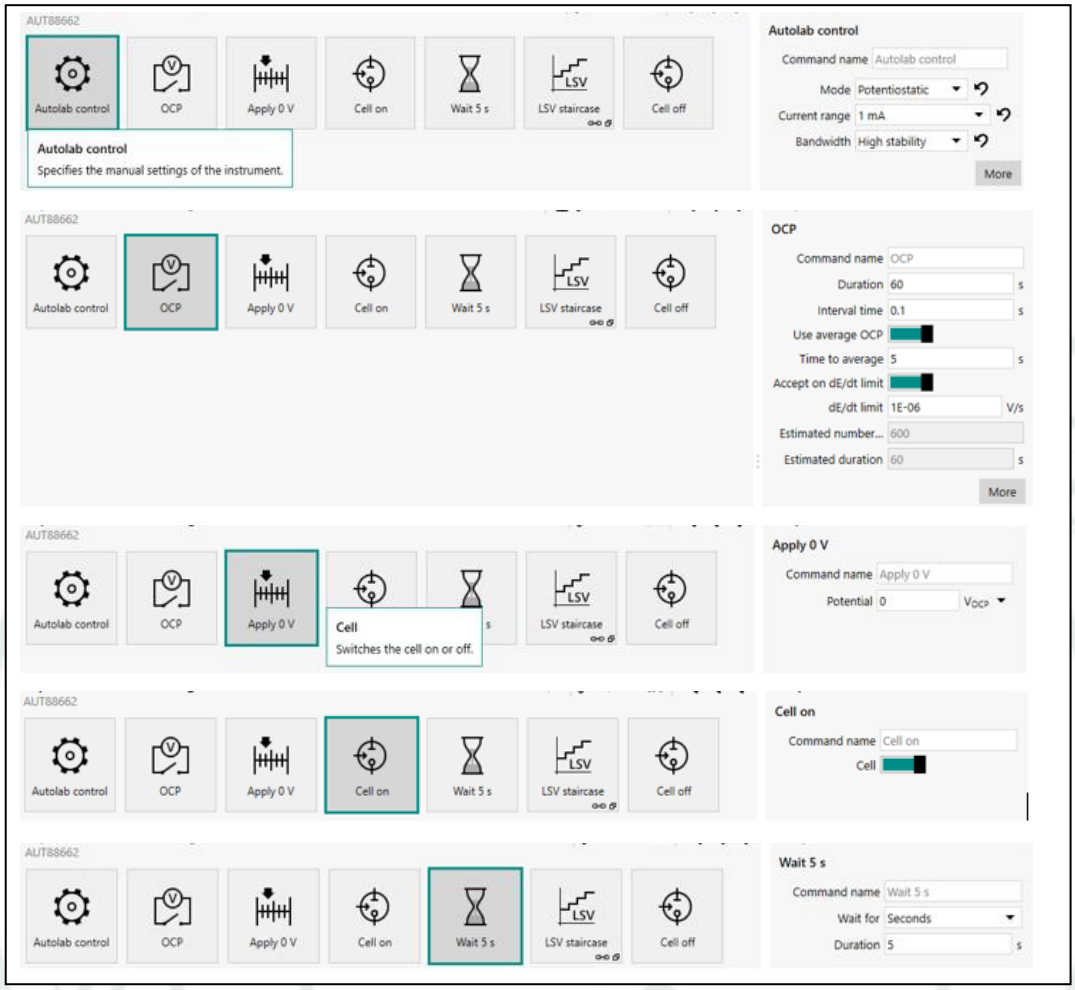
*El Potenciostato, el software NOVA y la laptop en trabajo*




*Nota*. La figura representa los equipos para la experimentación.

**Figura 24**

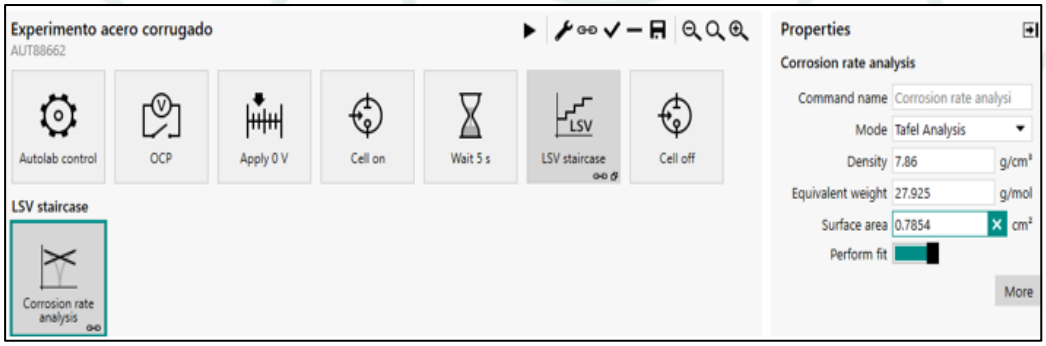
*Parámetros utilizados en la experimentación*




*Nota*. La figura representa los parámetros considerados de las líneas de polarización.

**Figura 25**

*Datos para la experimentación del acero corrugado*




*Nota*. La figura representa la selección de las líneas de polarización.

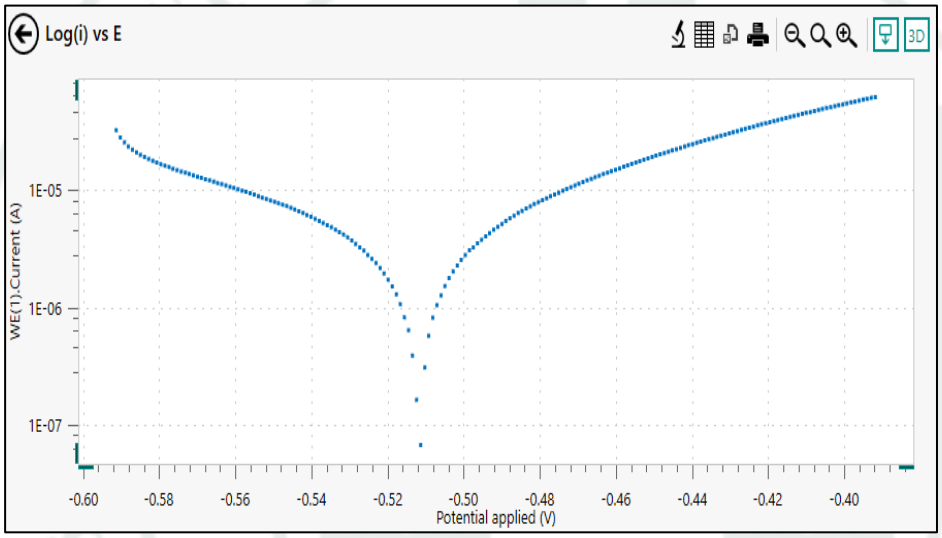
### 4.2.5. Operaciones para los resultados de la corrosión del acero corrugado y del acero galvanizado

#### A. Líneas de polarización

Permitió tener conocimiento del inicio y finalización de la intensidad o log i mA/cm2 (densidad de corriente) y a un voltaje determinado se observó las reacciones de oxidación y reducción de la corrosión del acero de refuerzo corrugado y acero galvanizado, figura 26.

**Figura 26**

*Curvas ejemplo de líneas de polarización de la experimentación del acero corrugado*



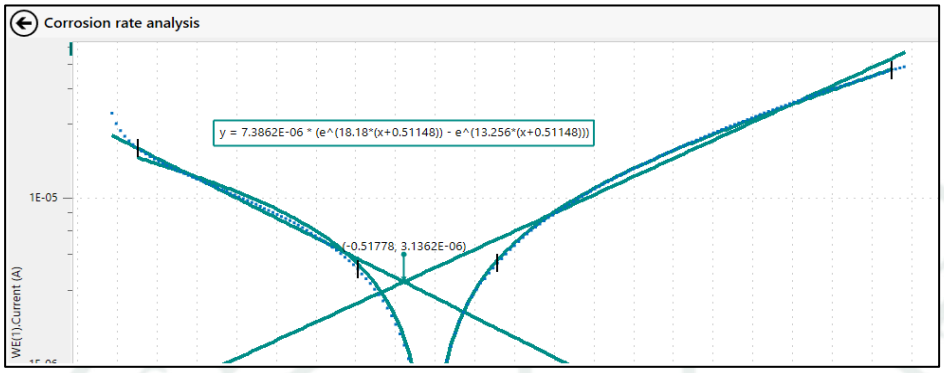

*Nota*. La figura representa la curva de polarización en la corrosión del acero.

#### B. Pendientes de Tafel

Realizada las gráficas de las pendientes de Tafel de las reacciones de oxidación y reducción de la corrosión del acero de refuerzo corrugado y acero galvanizado se ha tenido los resultados de la velocidad de corrosión en mm/año para todos los experimentos, figura 27.

**Figura 27**

*Curvas ejemplo de líneas de polarización de la reacción reducción y oxidación de la corrosión del acero corrugado con las pendientes de Tafel*



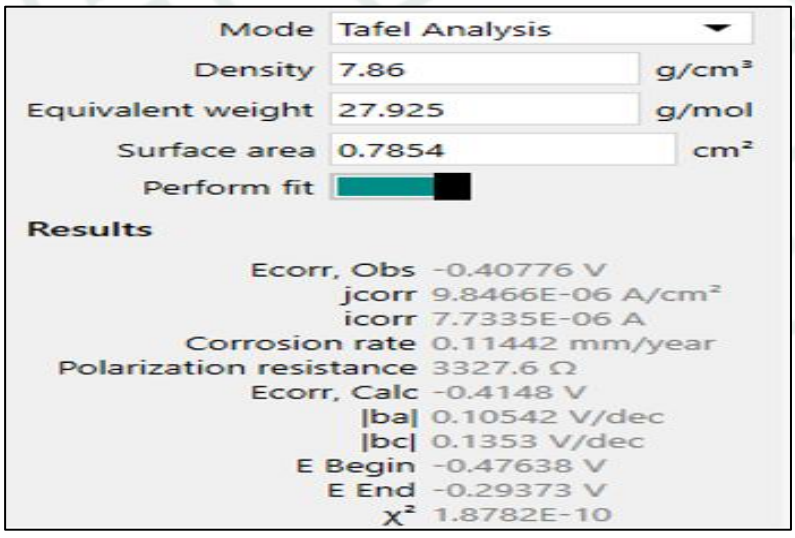

*Nota*. La figura representa las pendientes de Tafel en la corrosión del acero.

## C. Para los resultados experimentales de la velocidad de corrosión del acero corrugado

Terminada las gráficas de las pendientes de tafel, de las reacciones de oxidación y reducción de la corrosión del acero de refuerzo corrugado y acero galvanizado, se utilizó: el peso específico, el peso equivalente gramo, del acero corrugado y del acero galvanizado, con el área de 0.7854 cm2 se ha tenido los resultados para todos los experimentos, la figura 28.

**Figura 28**

*Resultados ejemplo del primer experimento de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo FIGIM UNA.*



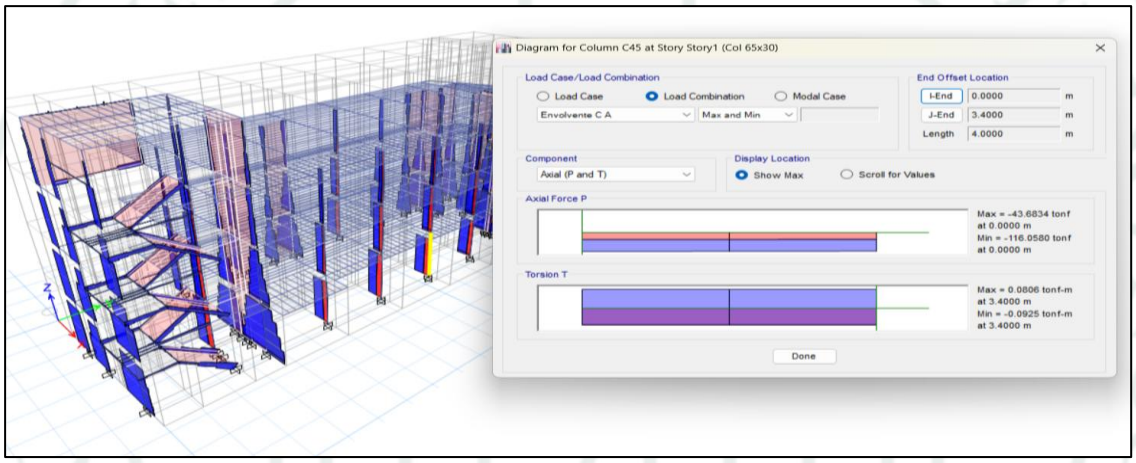

*Nota*. La figura representa resultados de la velocidad de corrosión del acero.

## 4.3. Para el desarrollo del análisis de los diagramas interacción en la zona de exposición al agua de subsuelo de la corrosión del acero corrugado pasivado y el acero galvanizado

Con los resultados de la experimentación del acero corrugado y acero galvanizado se han tenido los datos necesarios para iniciar el análisis de los diagramas de interacción antes y después de la corrosión. Figura 29 y 30, considerándose la columna C-03, por soportar mayor carga de las columnas que mejor se adecuan para el presente estudio de la corrosión.

**Figura 29**

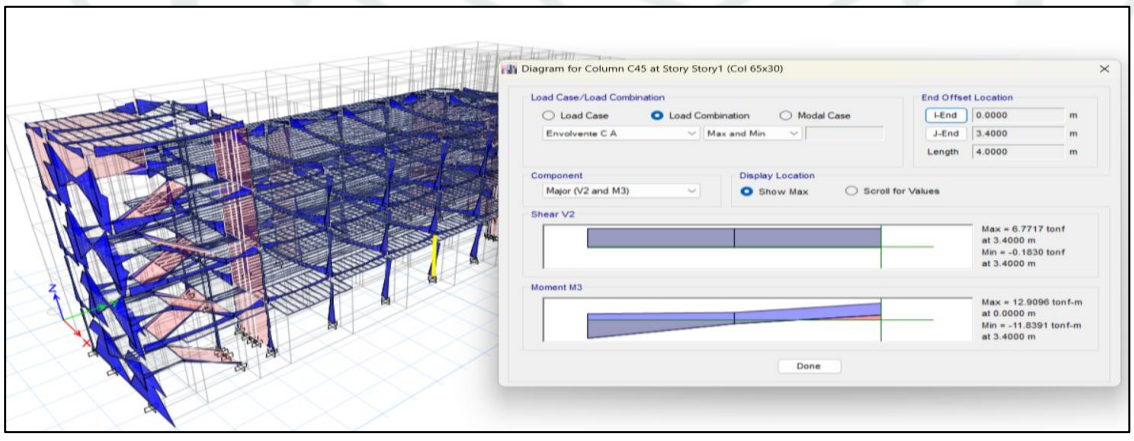
*Carga axial de la columna C-3, eje H-5 más esforzada*




*Nota*. La figura representa una vista de la carga axial de obra en estudio. Tomada de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

**Figura 30**

*Momento flector de la columna C-3, eje H-5*




*Nota*. La figura representa una vista del momento flector de la obra en estudio. Tomado de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

# CAPÍTULO V

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Resultados de la resistencia eléctrica del concreto como indicador de la permeabilidad

#### 5.1.1. Resultados del análisis del agua de subsuelo

Se tiene en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Resultados del análisis químico del agua de subsuelo*

| | pH | $SO^{4=}$ (ion sulfato) mg/L | Conductividad eléctrica µs/cm | $NO^{3-}$ (ion nitrato) mg/L | Carbonato de calcio (CaCO3) mg /L | $Cl^{--}$ (ion cloro) mg/L |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FIGIM-UNA | 7.347 | 200.100 | 1200.000 | 24.800 | < 1 | 126.000 |
| Jayllihuya | 7.256 | < 10 | 375.600 | 10.600 | < 1 | 8.500 |
| Salcedo | 7.621 | 90.800 | 731.300 | 11.860 | < 1 | 51.400 |
| Promedio | 7.408 | 145.450 | 768.967 | 15.753 | | 61.967 |

*Nota*. La tabla representa los resultados del análisis químico del agua de subsuelo de las áreas de estudio. Adaptada de Laboratorios Analíticos del Sur Arequipa.

En la Tabla 11 se observa el promedio del análisis de iones del agua de subsuelo del área de estudio:

- La presencia de 61.967 mg/L de cloruros constituye una impureza significativa que favorece el avance del agua de subsuelo a través del concreto, permite disminuir el pH por debajo de 12. Esta condición rompe la capa pasiva y da inicio al proceso de corrosión. Según Del Valle et al. (2001) y según Hormigón al día (2023) en condiciones de laboratorio, un concreto con una relación a/c de 0.40 puede presentar una profundidad de penetración de cloruros de aproximadamente 10 mm a los 28 días de exposición, lo cual evidencia la susceptibilidad del material frente a agentes agresivos.
- La concentración de 145.450 mg/L de iones sulfato. Según Londoño (2025), el mecanismo de ataque de los sulfatos al concreto se basa en su reacción con el hidróxido de calcio, generando sulfato de calcio (yeso). Asimismo, los sulfatos reaccionan con el aluminato tricálcico hidratado para formar sulfato aluminato de calcio hidratado (etringita). Estas reacciones producen expansiones internas que deterioran progresivamente la estructura del concreto.

- La concentración de 15.753 mg/L de iones nitrato. Según Velesmoro y Ana (2013), los nitratos actúan como compuestos capaces de intercambiar iones, transformando los productos y la hidratación del cemento en sales solubles. Este proceso puede favorecer la desintegración del concreto y originar el fenómeno de eflorescencia, deteriorando progresivamente la superficie del material.
- Con el pH del agua de subsuelo 7.408, contribuye a disminuir el pH del entorno del acero dentro del concreto, favoreciendo la ruptura de la capa pasiva. La presencia de cloruros, sulfatos y nitratos en el agua de subsuelo debilita la matriz del concreto y facilita el avance de estas especies agresivas hasta el acero de refuerzo, en el diagrama de Pourbaix, figura 9 se distinguen claramente las zonas de oxidación y pasivación del acero corrugado.
- Una conductividad de 768.967 µS/cm, confirma que el agua de subsuelo en las zonas de estudio tiene la suficiente capacidad conductiva y concentración de aniones para debilitar el concreto y favorecer la corrosión tanto del acero corrugado como del acero galvanizado, permitiendo realizar el análisis comparativo entre ambos materiales. Según Chemistry LibreTexts (2022) el agua con la presencia de aniones como cloruros, sulfatos y nitratos se considera una solución conductora.

### 5.1.2. Resultados del nivel freático

**Tabla 12**

*Nivel del agua de subsuelo en tres puntos del lugar de estudio*

| Zonas de estudio | Distancia de la superficie al nivel freático | |
|---|---|---|
| | Inicio-enero | Final-marzo |
| FIGIM-UNA | 0.800 m | 0.400 m |
| Jayllihuya | 1.300m | 0.490 m |
| Salcedo | 1.700 m | 1.520m |

*Nota.* La tabla representa el resultado del nivel freático del agua de subsuelo.

En la tabla 12, se observa la medición de la superficie, al nivel freático del agua de subsuelo en las zonas de estudio en la época de abundante lluvia, y según Weather Spark (2026), la temporada de lluvias dura 3 a 4 meses, del 15 de diciembre al 26 de marzo. Épocas del año que las construcciones están totalmente sumergidas en agua. Además, se menciona que los resultados no es un promedio de cada zona, las perforaciones han sido elegidos de acuerdo a la colaboración de los propietarios.

### 5.1.3. Resultados de la resistencia eléctrica del concreto

**Tabla 13**

*Resultados de la resistencia eléctrica de probetas de concreto que determinan la permeabilidad*

| Nro. Ensayos | Medición de la resistencia eléctrica KΩ de probetas de concreto | | |
|---|---|---|---|
| | **Primera medición** | **Segunda medición** | **Tercera medición** |
| | **a/c=0.49** | **a/c=0.49** | **a/c=0.49** |
| 01 | 0.240 | Sin lectura | 10.100 |
| 02 | 0.930 | Sin lectura | 11.590 |
| 03 | 0.700 | Sin lectura | 11.000 |
| Promedio | 0.623 | | 10.897 |

*Nota*. La tabla representa los resultados de la permeabilidad de los cilindros de concreto por resistencia eléctrica.

En la tabla 13, se observa los resultados de 3 grupos de mediciones de la resistencia eléctrica con un multímetro en KΩ, de 3 probetas de concreto por cada relación de mezcla a/c, considerada en el expediente técnico, estas mediciones según las normas AASHTO T 259-02 determina la resistencia de las muestras de hormigón a la penetración de iones cloruro y la norma ASTM C1876 determina la resistividad eléctrica en masa de muestras moldeadas de hormigón después de la inmersión en agua saturada de iones agresivos:

- Los valores del primer grupo de mediciones según la relación de mezcla: a/c 0.49 = 0.623 KΩ, a/c 0.56 = 0.870 KΩ y a/c 0.63 = 1.440 KΩ, estos valores de resultados han indicado que parte de la corriente pasa por los cilindros de concreto, debido a que después de 12 horas de ser desmoldado todo el concreto está húmedo.
- En las segundas mediciones no hay lectura según la relación de mezcla: a/c 0.49, a/c 0.56 y a/c 0.63 esto ha indica que la corriente no pasa por los cilindros de concreto que se han fraguado 28 días, 03 meses secado al ambiente y 24 horas de secado a 104 °C.
- Los valores del tercer grupo de mediciones según la relación de mezcla: a/c 0.49 = 10.897 KΩ, a/c 0.56 = 10.467 KΩ y a/c 0.63 = 10.863 KΩ, estos valores de resultados han indicado que parte de la corriente pasa por los cilindros de concreto, debido a que los iones cloro han ingresado a todo el concreto demostrando la permeabilidad; los cilindros de concreto han tenido 28 días de fraguado, 03 meses de secado al ambiente y 24 horas de secado a 104 °C y luego 09 meses sumergidos en una solución 1M de cloruro de sodio.

## 5.2. Resultados experimentales de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo pasivado y la velocidad de corrosión del acero galvanizado

### 5.2.1. Resultados experimentales de la velocidad de corrosión del acero corrugado

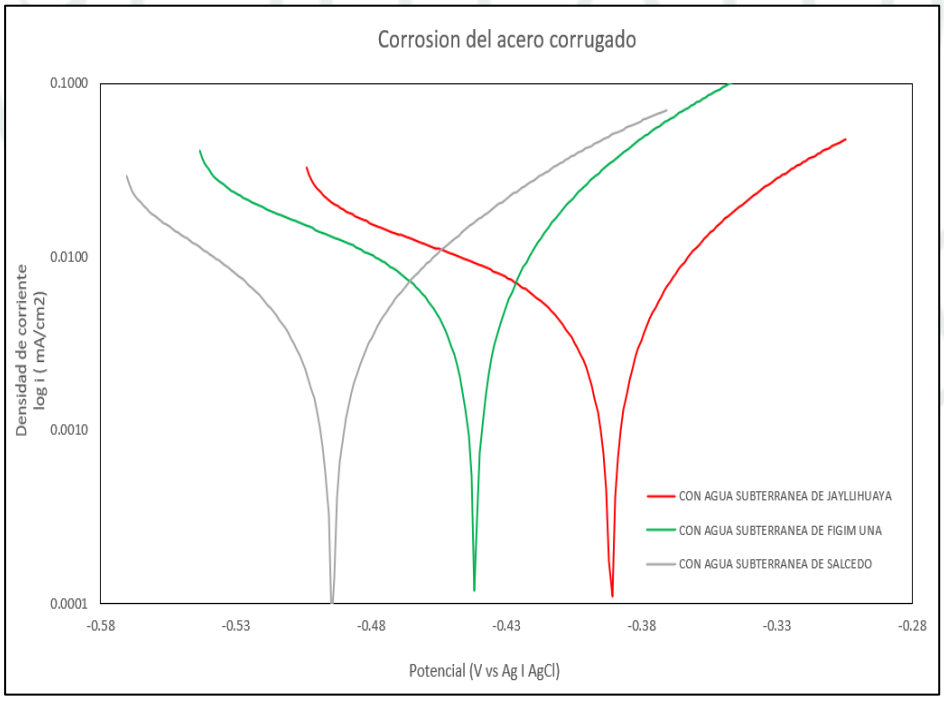
Con el Potenciostato/Galvanostato encendido, la celda ASTM correctamente instalada, utilizando agua de subsuelo de las zonas de estudio, se configuró el sistema experimental con: electrodo de trabajo de acero corrugado, un contraelectrodo de oro y un electrodo de referencia Ag/AgCl, se ingresó datos del acero: 7.860 g/cm3 (peso específico), 27.925 (peso equivalente) y 0.7854 cm2 (área de corrosión). Empleando el software NOVA, se han obtenido los resultados, Figuras: 31 y tabla 14.

**A. Líneas de polarización del acero corrugado en las zonas de estudio**.

Se evidencia los resultados de las líneas de polarización de la experimentación de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de la zona de FIGIM UNA, zona Jayllihuaya y zona de Salcedo, figura 31.

**Figura 31**

*Líneas de polarización de la corrosión del acero corrugado en agua subterránea de: jayllihuaya, FIGIM UNA y Salcedo*




*Nota*. La figura representa las curvas de polarización de los experimentos de corrosión de las áreas de estudio del acero corrugado

**Tabla 14**

*Resultados de la densidad de corriente y el voltaje aplicado de la corrosión del acero corrugado en agua subterránea de: Jayllihuaya, FIGIM UNA y Salcedo*

| Agua subterránea | Reacción | Densidad de corriente (log i mA/cm2) | | Potencial aplicado (V) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Inicio | Final | Inicio | Final |
| Jayllihuaya | Catódica | 0.033 | 0.000 | -0.504 | -0.391 |
| | Anódica | 0.000 | 0.048 | -0.391 | -0.304 |
| FIGIM UNA | Catódica | 0.041 | 0.000 | -0.543 | -0.442 |
| | Anódica | 0.000 | 0.108 | -0.442 | -0.344 |
| Salcedo | Catódica | 0.030 | 0.000 | -0.571 | -0.495 |
| | Anódica | 0.000 | 0.070 | -0.495 | -0.371 |

*Nota*. La tabla representa los resultados del inicio y finalización de las reacciones catódicas y anódicas de corrosión del acero corrugado en función a la densidad de corriente y voltaje. Tomado del software NOVA.

En la figura 31 y tabla 14, se observa los resultados de la experimentación según Estudocu (2019) la reacción de oxidación $Fe \rightarrow Fe2^{+} + 2e-$ y de reducción $O2 + 2H2O + 4e- \rightarrow 4OH^{-}$, de la corrosión del acero corrugado con las líneas de polarización con agua de subsuelo del área de estudio se tiene:

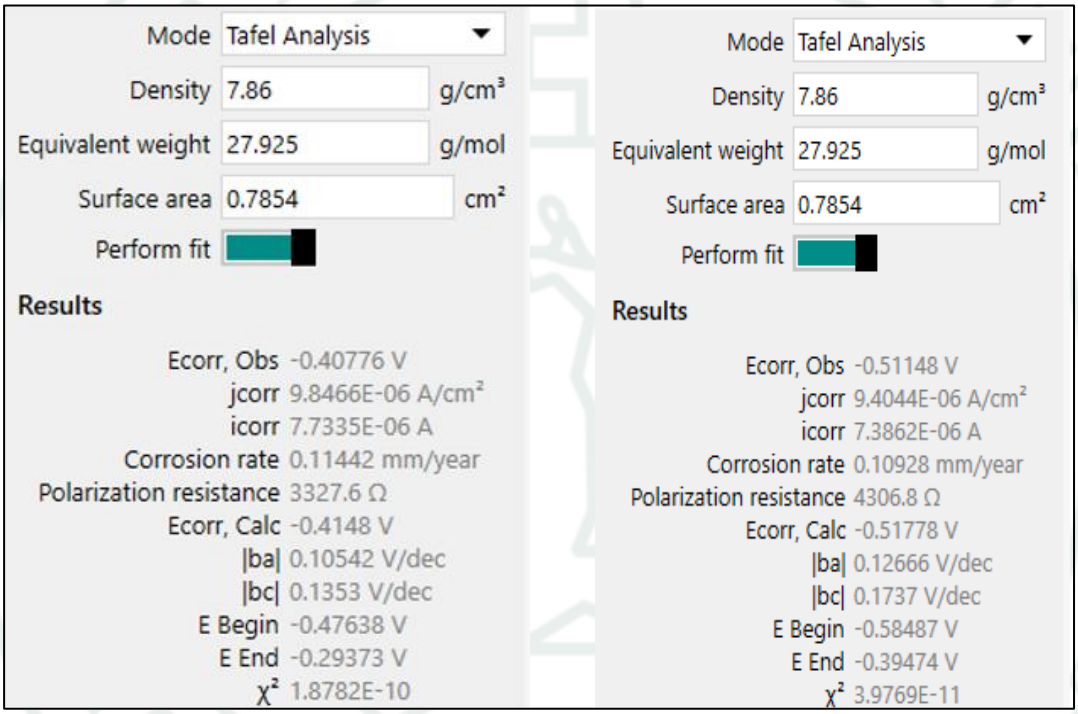
- Las líneas de color rojo en el plano cartesiano representan la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Jayllihuaya, la reacción catódica inicia (-0.504 V, 0.033 mA/cm2), finaliza (-0.391 V, 0.000 mA/cm2) y la reacción anódica inicia (-0.391 V, 0.000 mA/cm2), finaliza (-0.304 V, 0.048mA/cm2)
- Las líneas de color verde en el plano cartesiano representan la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de FIGIM UNA, la reacción catódica inicia (-0.543 V, 0.041 mA/cm2), finaliza (-0.442 V, 0.000 mA/cm2) y la reacción anódica inicia (-0.442 V, 0.000 mA/cm2), finaliza (-0.344 V, 0.108mA/cm2)
- Las líneas de color negro en el plano cartesiano representan la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Salcedo, la reacción catódica inicia (-0.571 V, 0.030 mA/cm2), finaliza (-0.495 V, 0.000 mA/cm2) y la reacción anódica inicia (-0.495 V, 0.000 mA/cm2), finaliza (-0.371 V, 0.070mA/cm2)

## B. Resultados de experimentos de la velocidad de corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de la zona FIGIM-UNA

Teniendo el resultado de la reacción catódica y reacción anódica con las líneas de polarización se han graficado las pendientes de Tafel y se han tenido el resultado de la corrosión del acero corrugado en mm/año, figuras 32, 33, 34 y tabla 15.

**Figura 32**

*Resultados de experimentos de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo FIGIM-UNA*

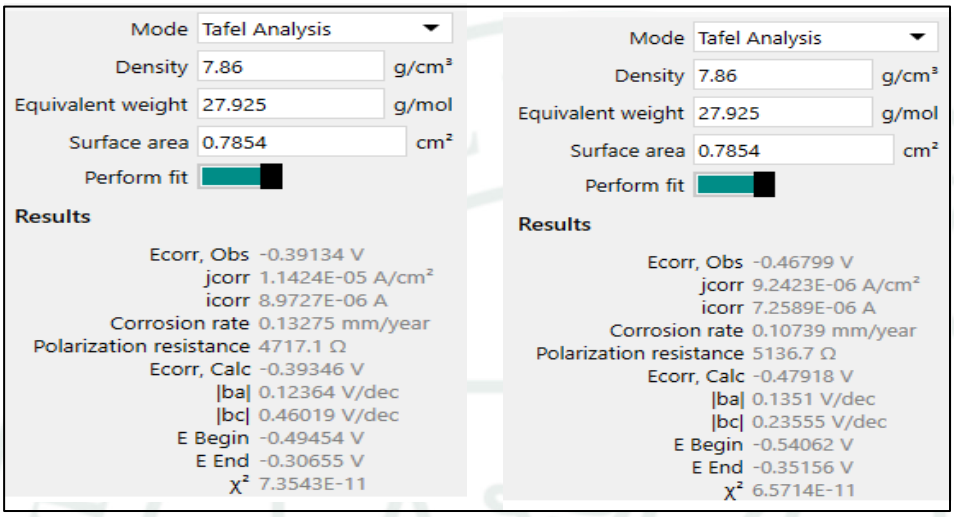



*Nota*. La figura representa los resultados de la velocidad de corrosión del acero corrugado con el agua de subsuelo FIGIM UNA.

## C. Resultados experimentales de la velocidad de corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Jayllihuaya

**Figura 33**

*Resultados de experimentos de la corrosión del acero corrugado con agua de Jayllihuaya*

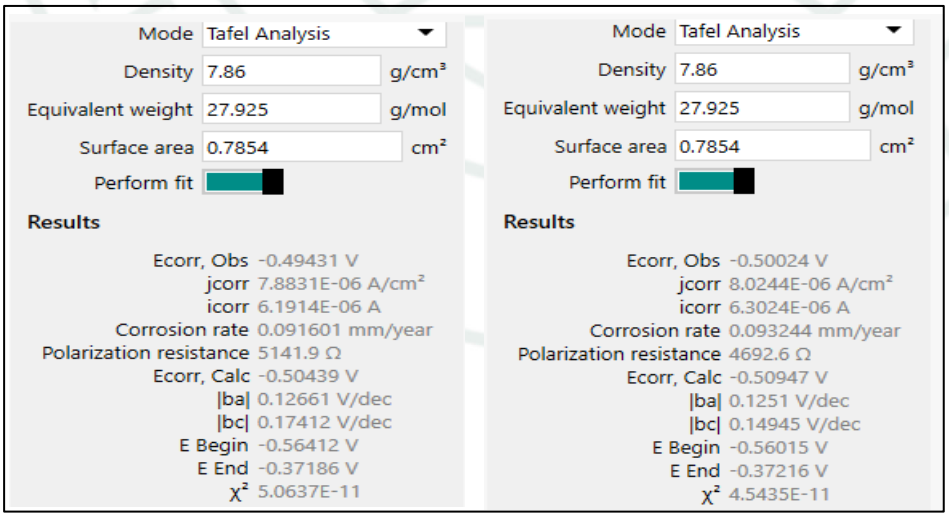



*Nota*. La figura representa los resultados de la velocidad de corrosión del acero corrugado con el agua subsuelo de Jayllihuaya.

## D. Resultados experimentales de la velocidad de corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo Salcedo

**Figura 34**

*Resultados de experimentos de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Salcedo*




*Nota*. La figura representa los resultados de la velocidad de corrosión del acero corrugado con el agua subsuelo de Salcedo.

**Tabla 15**

*Resumen experimental de la velocidad de corrosión del acero corrugado en el área de estudio*

| Zonas | Velocidad de corrosión mm/año |
|---|---|
| FIGIM-UNA | 0.11442 |
| | 0.10928 |
| Jayllihaya | 0.13275 |
| | 0.10739 |
| Salcedo | 0.091601 |
| | 0.093244 |
| Promedio | 0.108 |

*Nota*. La tabla representa el promedio de los resultados de la velocidad de corrosión del acero corrugado de las aéreas de estudio.

En las figuras 32, 33, 34, se observan los resultados obtenidos de la experimentación de la corrosión del acero corrugado con el agua de subsuelo de las zonas de estudio, en la celda ASTM, mediante el uso del Potenciostato/Galvanostato y el software NOVA, se determinó una velocidad de corrosión promedio 0.108 mm/año, tabla 15.

- Por efecto de la velocidad de corrosión de 0.108 mm/año el espesor del diámetro (Ø), tabla 16, del acero a corroerse para pasar de una varilla de 3/4" a una varilla de 5/8" es:

  Diferencia de diámetro = 1.91 cm – 1.59 cm

  = 0.32 cm = 3.20 mm (tabla 16)

**Tabla 16**

*Características de las varillas de 3/4" y 5/8" de refuerzo*

| Barra | $d_y$ (cm) | Ay (cm2) | P(Kgf/m) |
|---|---|---|---|
| 5/8" | 1.59 | 1.99 | 1.55 |
| 3/4" | 1.91 | 2.84 | 2.24 |

*Nota*. La tabla representa los diámetros de las varillas de 3/4 y 5/8. Tomada de Aceros Arequipa.

- Por lo tanto, el tiempo estimado por el proceso de corrosión una varilla de 3/4" se convierta en una varilla de 3/8" de acuerdo al siguiente calculo:

  Tiempo en años: 3.20 mm ÷ 0.108 mm/año = 29.630 años, tabla 17

**Tabla 17**

*Acero corrugado y acero galvanizado antes y después del proceso de corrosión*

| **Acero corrugado en la columna C-03 antes de la corrosión** | | **Acero corrugado en la columna C-03 después de 29.630 años por efecto de la corrosión** | |
|---|---|---|---|
| 3/4" | $d_y$ =19.10mm | 5/8 “ | $d_y$ = 15.90 mm |

*Nota*. La tabla representa la disminución del diámetro de las varillas de 3/4 a 5/8 por efecto de la corrosión en la columna de estudio C-3.

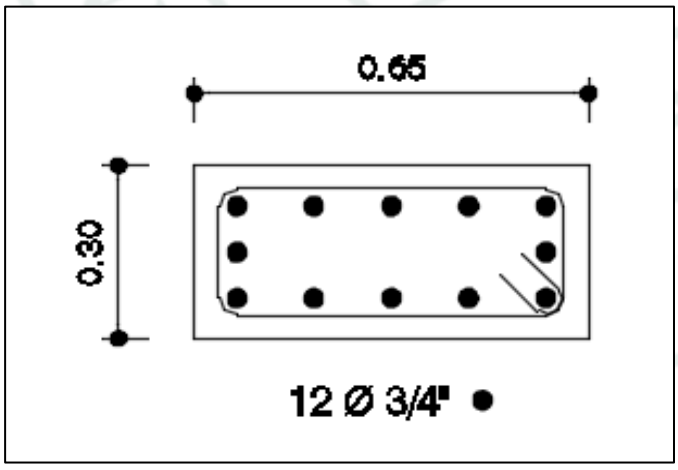
En la Tabla 17, se observa que por efecto del proceso de la corrosión experimentalmente se ha determinado que la columna C-03 con 12 varillas de 3/4" en 29.630 años pasa a una columna C-03 con varillas de 5/8”.

## E. Resultados de posibles casos del proceso de corrosión del acero corrugado

Las construcciones en la ciudad de Puno cerca del lago Titicaca de acuerdo a las perforaciones en las zonas de: FIGIM-UNA, Jayllihuaya y Salcedo, han determinado que el nivel freático está cerca de la superficie (tabla12), y de acuerdo a las pruebas experimentales de la corrosión el acero corrugado pasivado pude tener posibles casos de corrosión al disminuir 3.20 mm el diámetro la varilla de 3/4” en 29.630 años, iniciando por los lados debido a que la base tiene una plataforma y cimentación las columnas (tabla 17, figuras: 35, 36,37, 38 y 39).

**Figura 35**

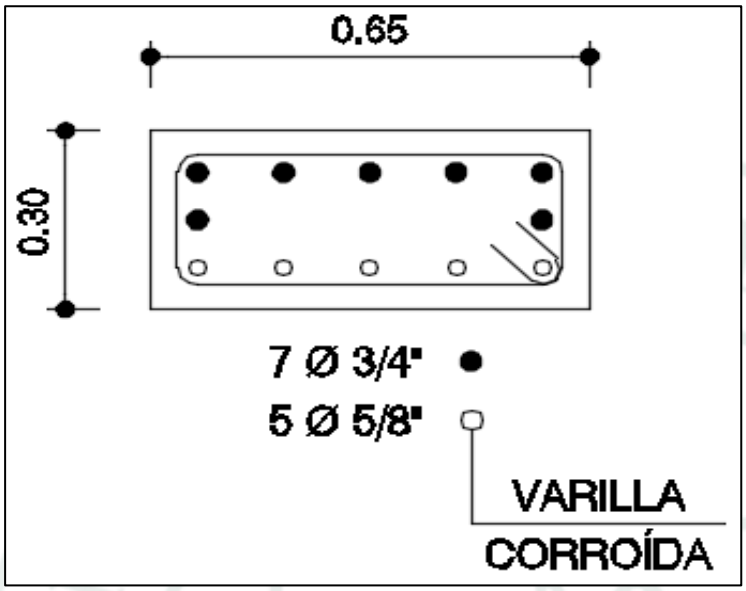
*Columna C-03 antes de la corrosión*




*Nota*. La figura representa las varillas de 3/4 en la columna en estudio C-3 antes de la corrosión. Tomado de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

**Figura 36**

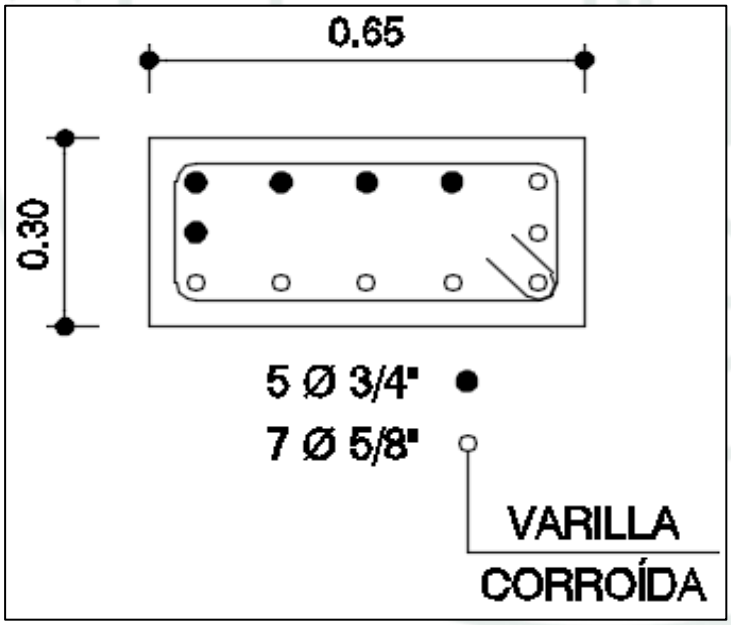
*Caso 01, posible corrosión de la columna C-03, 05 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa el caso 1, de posible de corrosión en la columna C-3.

**Figura 37**

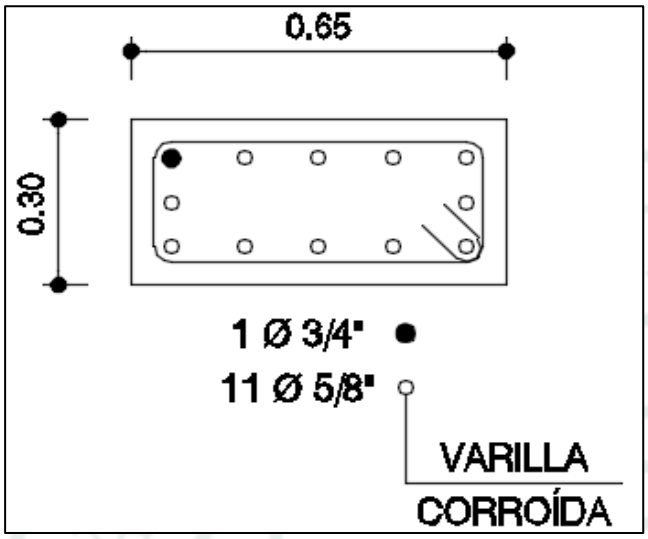
*Caso 02, posible corrosión de la columna C-03, 07 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa el caso 2 de posible corrosión en la columna C-3.

**Figura 38**

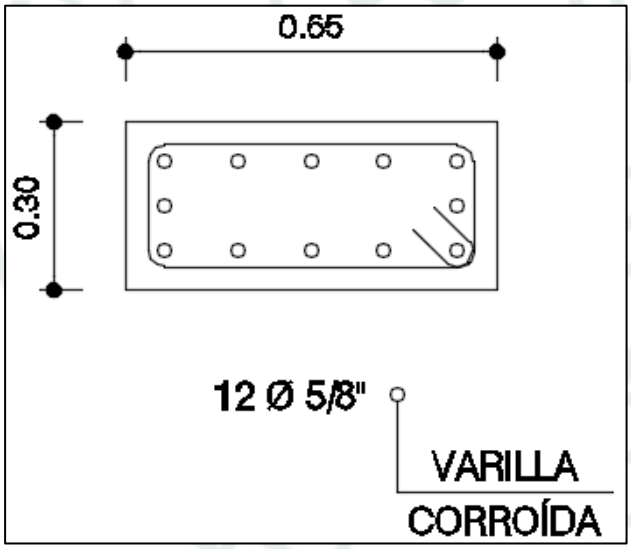
*Caso 03, posible corrosión de la columna C-03, 11 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa el caso 3 de posible corrosión en la columna C-3.

**Figura 39**

*Caso 04, posible corrosión de la columna C-03, 12 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa el caso 4 de posible corrosión en la columna C-3.

- En la figura 35, se observa la columna C-03 con 12 varillas de 3/4” antes del proceso de corrosión.
- En la figura 36 caso 01, se observa la columna C-03 con 07 varillas de 3/4” y 05 varillas corroídas han pasado a varillas de 5/8” por el proceso de corrosión.
- En la figura 37 caso 02, se observa la columna C-03 con 05 varillas de 3/4” y 07 varillas corroídas han pasado a varillas de 5/8” por el proceso de corrosión.

- En la figura 38 caso 03, se observa la columna C-03 con 01 varillas de 3/4” y 11 varillas corroídas han pasado a varillas de 5/8” por el proceso de corrosión.
- En la figura 39 caso 04, se observa la columna C-03 con 0 varillas de 3/4” y 12 varillas corroídas han pasado a varillas de 5/8” por el proceso de corrosión.

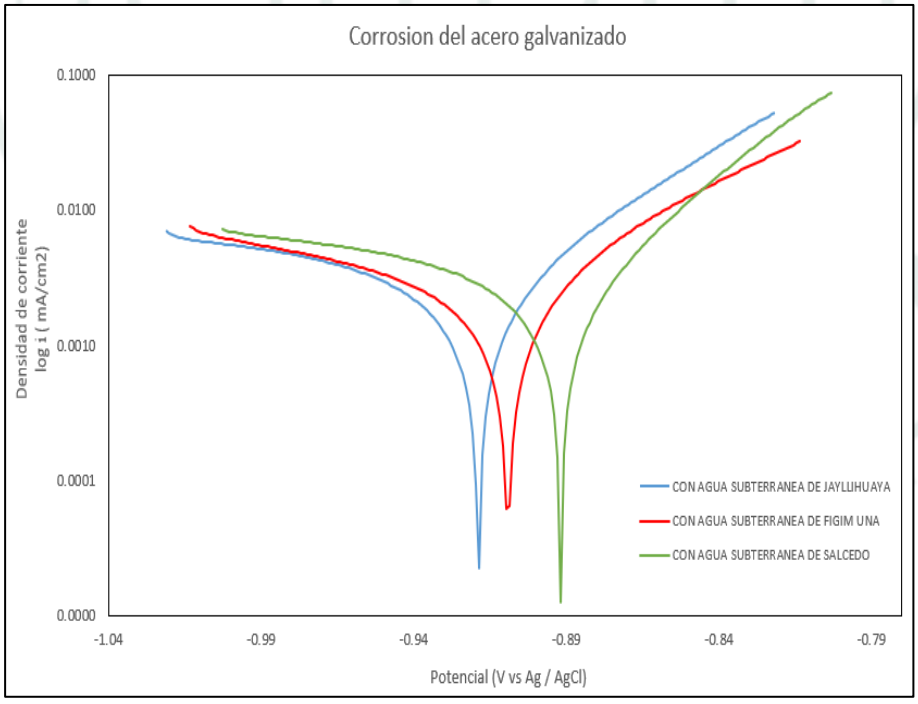
### 5.2.2. Resultados experimentales de la corrosión del acero corrugado galvanizado

Con el equipo instalado constituido por el potenciostato y la celda ASTM correctamente instalada, utilizando agua de subsuelo de las zonas de estudio, se inició el proceso experimental con: electrodo de trabajo de acero corrugado galvanizado, un contraelectrodo de oro y un electrodo de referencia Ag/AgCl, se consideró los datos del zinc por estar protegiendo toda la superficie exterior al acero corrugado: 7.140 g/cm3 (peso específico), 32.690 (peso equivalente) y 0.7854 cm2 (área de corrosión). Empleando el software NOVA, se han obtenido los resultados, Figuras: 40 y tabla 18.

**A. Líneas de polarización**

**Figura 40**

*Líneas de polarización de la corrosión del acero galvanizado con agua subterránea de: jayllihuaya, FIGIM UNA y Salcedo*




*Nota.* La figura representa las curvas de polarización de los experimentos de las áreas de estudio de la corrosión del acero galvanizado.

**Tabla 18**

*Resultados de la densidad de corriente y el voltaje de la corrosión del acero galvanizado con agua de subsuelo de: jayllihuaya, FIGIM UNA y Salcedo*

| Agua subterránea | Reacción | Densidad de corriente (log i mA/cm2) | | Potencial aplicado (V) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Inicio | Final | Inicio | Final |
| Jayllihuaya | Catódica | 0.008 | 0.000 | -1.013 | -0.910 |
| | Anódica | 0.000 | 0.032 | -0.909 | -0.813 |
| FIGIM UNA | Catódica | 0.007 | 0.000 | -1.003 | -0.891 |
| | Anódica | 0.000 | 0.074 | -0.891 | -0.803 |
| Salcedo | Catódica | 0.007 | 0.000 | -1.021 | -0.920 |
| | Anódica | 0.000 | 0.053 | -0.919 | -0.822 |

*Nota*. La tabla representa los resultados del inicio y finalización de las reacciones del acero corrugado galvanizado en función a la densidad de corriente y voltaje.

En la figura 40 y tabla 18, se observa los resultados de las líneas de polarización de la experimentación, según Jeelix (2025) el acero galvanizado funciona mejor en ambientes alcalinos (pH 7–12.5), lo que lo hace muy adecuado para el contacto con concreto curado, se tiene lo siguiente:

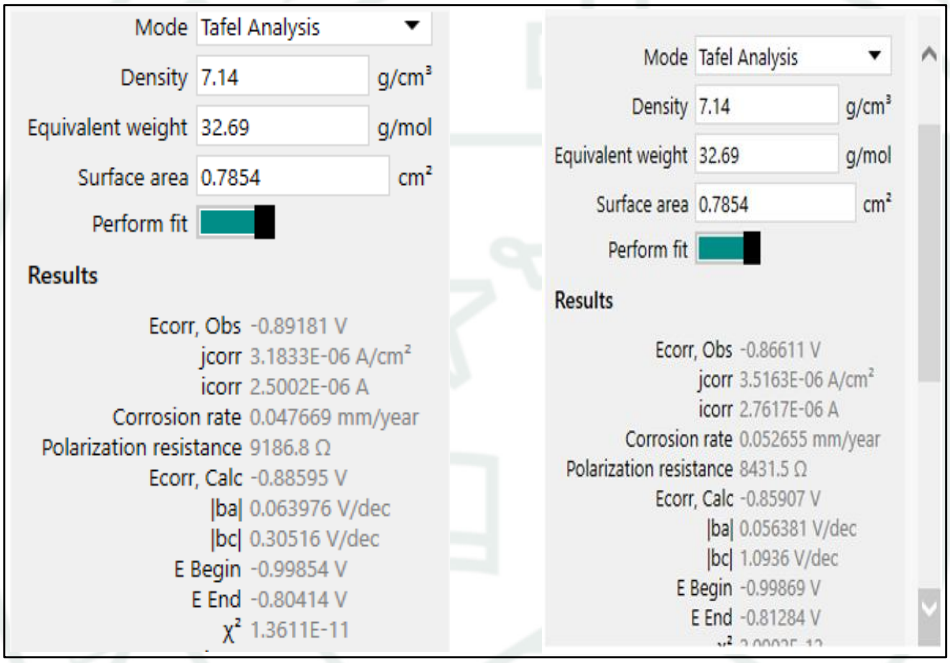
- Las líneas de color azul en el plano cartesiano representan la corrosión del acero corrugado galvanizado con agua de subsuelo de Jayllihuaya, la reacción catódica inicia (-1.013V, 0.008 mA/cm2), finaliza (-0.910 V, 0.000 mA/cm2) y la reacción anódica inicia (-0.909 V, 0.000 mA/cm2), finaliza (-0.813 V, 0.032mA/cm2)
- Las líneas de color rojo en el plano cartesiano representan la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de FIGIM UNA, la reacción catódica inicia (-1.003 V, 0.007 mA/cm2), finaliza (-0.891 V, 0.000 mA/cm2) y la reacción anódica inicia (-0.891 V, 0.000 mA/cm2), finaliza (-0.803 V, 0.074mA/cm2).
- Las líneas de color verde en el plano cartesiano representan la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Salcedo, la reacción catódica inicia (-1.021 V, 0.007 mA/cm2), finaliza (-0.920 V, 0.000 mA/cm2) y la reacción anódica inicia (-0.919 V, 0.000 mA/cm2), finaliza (-0.822 V, 0.053mA/cm2).

## B. Experimentos de la corrosión del acero corrugado galvanizado con agua de subsuelo de la zona FIGIM-UNA

Teniendo el resultado de las líneas de polarización se grafican las pendientes de Tafel y se tienen el resultado de la corrosión del acero galvanizado en mm/año, figuras 41, 42, 43 y tabla 19.

**Figura 41**

*Resultados de la corrosión del acero corrugado galvanizado con agua de subsuelo de la zona FIGIM-UNA*

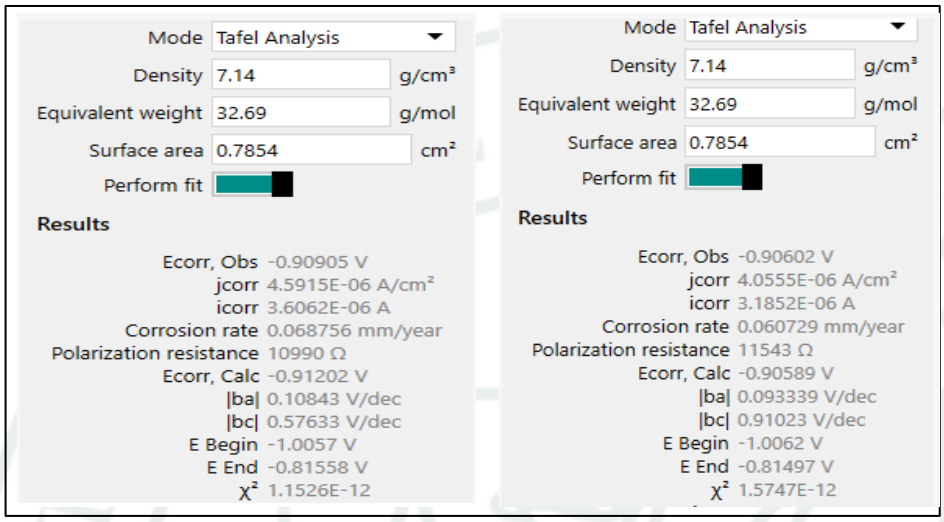



*Nota*. La figura representa los resultados de la velocidad de corrosión del acero corrugado galvanizado con el agua subsuelo FIGIM UNA.

## C. Resultados de experimentos de la corrosión del acero corrugado galvanizado con agua de subsuelo de Jayllihuaya

**Figura 42**

*Resultados de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Jallihuaya*

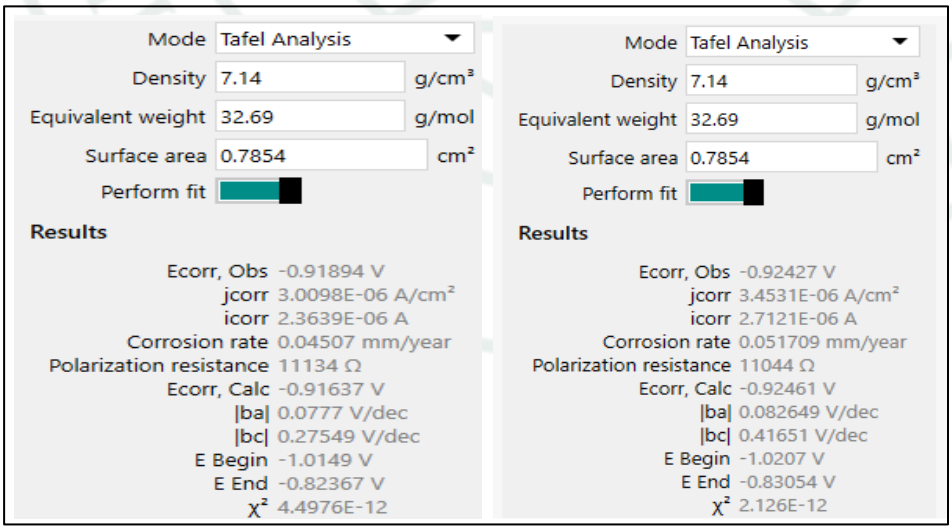



*Nota*. La figura representa los resultados de la velocidad de corrosión del acero corrugado galvanizado con el agua subsuelo de Jayllihuaya.

## D. Resultados de experimentos de la corrosión del acero corrugado galvanizado con agua de subsuelo de Salcedo

**Figura 43**

*Resultados experimentales de la corrosión del acero corrugado con agua de subsuelo de Salcedo*




*Nota*. La figura representa los resultados de la velocidad de corrosión del acero corrugado galvanizado con el agua subsuelo de Salcedo.

**Tabla 19**

*Resumen experimental de la velocidad de corrosión del acero corrugado galvanizado en el área de estudio*

| Zonas | Velocidad de corrosión mm/año |
|---|---|
| FIGIM-UNA | 0.047669 |
| | 0.052655 |
| Jayllihaya | 0.068756 |
| | 0.060729 |
| Salcedo | 0.04507 |
| | 0.051709 |
| Promedio | 0.054 |

*Nota*. La tabla representa el promedio de los resultados de la velocidad de corrosión del acero corrugado galvanizado de las aéreas de estudio.

De las figuras 41, 42, 43 del proceso experimental de corrosión del acero corrugado galvanizado con agua de subsuelo del área de estudio, con el Potenciostato/Galvanostato, en la celda ASTM con electrodo de trabajo de acero corrugado galvanizado, contra electrodo de oro, electrodo de referencia Ag/AgCl y software NOVA, se ha tenido una velocidad promedio de corrosión de 0.054 mm/año, tabla 19, se calcula el cambio por efecto de la corrosión de la columna C-03:

- Con el promedio de la velocidad de corrosión del acero corrugado galvanizado de 0.054 mm/año la columna C-03 con 12 varillas de acero corrugado galvanizado de 3/4” pasa a una columna C-03 con 12 varillas de acero corrugado galvanizado 5/8” de acuerdo al siguiente calculo:

  Diferencia de diámetro = 1.91 cm (Ø 3/4”) – 1.59 cm (Ø5/8”)

  = 0.32 cm = 3.200 mm (tabla 16)

- El tiempo estimado que demora por la velocidad de corrosión de una varilla de 3/4” en convierta en una varilla de 3/8”es:

  Tiempo en años: 3.20 mm ÷ 0.054 mm/año = 59.259 años, tabla 20

**Tabla 20**

*Resultados antes y después del proceso de corrosión del acero galvanizado*

| Acero corrugado galvanizado en la columna C-03 antes de la corrosión | | Acero corrugado galvanizado en la columna C-03 después de 59.259 años por efecto de la corrosión | |
|---|---|---|---|
| 3/4" | $d_y$ = 19.10 mm | 5/8 “ | $d_y$ = 15.90 mm |

*Nota*. La tabla representa la disminución del diámetro de las varillas de 3/4 a 5/8 por efecto de la corrosión en la columna de estudio C-3.

En la Tabla 20, se presentan los resultados de la experimentación del acero corrugado galvanizado, en la columna C-03 con 12 varillas de 3/4" después de 59.259 años pasa a una columna C-03 con 12 varillas de 5/8”. Según Ingenieros Asesores (2025) la vida útil proyectada para edificaciones de concreto armado destinadas a vivienda u oficinas es de 50 años. En consecuencia, los aceros corrugados galvanizados de la columna C-03 cumple con el tiempo de servicio establecido en el expediente técnico.

## 5.3. Resultados comparativos de la corrosión del acero corrugado con al acero corrugado galvanizado antes y después de la corrosión

**Tabla 21**

*Resultados comparativos de la experimentación de la corrosión del acero corrugado con al acero corrugado galvanizado antes y después de la corrosión*

| Acero corrugado | | | | Acero corrugado galvanizado | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Antes de la corrosión | | Después 29.630 años de corrosión | | Antes de la corrosión | | Después 59.259 años de corrosión | |
| 3/4" | **$d_y$**=19.10 mm | 5/8 “ | **$d_y$**=15.90 mm | 3/4" | **$d_y$**=19.10 mm | 5/8 “ | **$d_y$**=15.90 mm |

*Nota*. La tabla representa la comparación del tiempo que demora en disminuir las varillas de 3/4 a 5/8 del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado.

En la tabla 21, se visualiza los resultados experimentales de la comparación de la corrosión del acero corrugado con al acero galvanizado antes y después de la corrosión en las tres zonas de estudio; figuras 32, 33, 34, tabla 15 de la corrosión del acero corrugado en mm/año y figuras 41, 42, 43 y tabla 19 de la corrosión del acero corrugado galvanizado se tiene:

- Los ensayos han determinado la velocidad promedio de corrosión de 0.108 mm/año del acero corrugado, con este valor, las varillas de la columna C-03 de 12Ø3/4" después de 29.630 años se convertirán en una columna C-03 con 12Ø5/8”.

- Los ensayos para el acero corrugado galvanizado con una velocidad promedio de corrosión de 0.054 mm/año, después de 59.259 años, la columna C-03 de 12Ø3/4" se convertirá en una columna C-03 con 12Ø5/8”

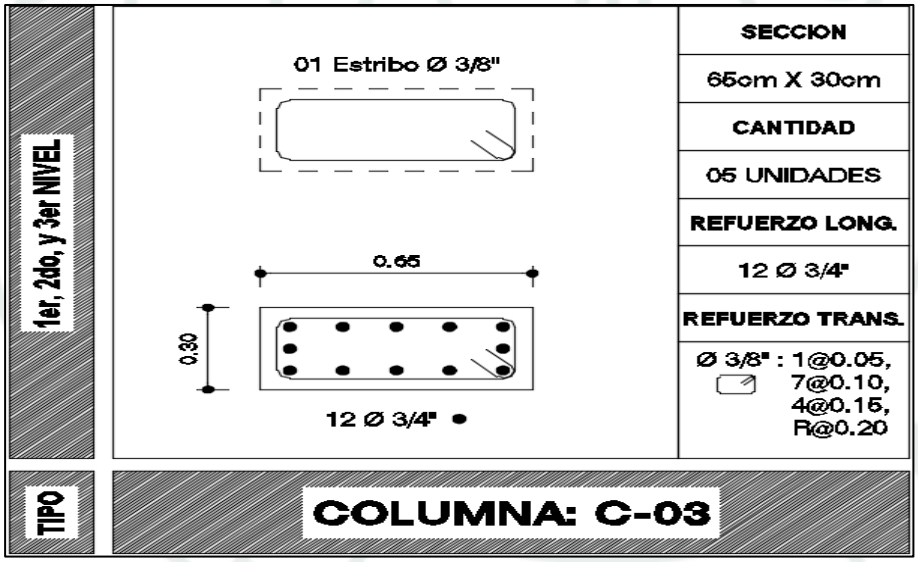
## 5.4. Resultados del estudio de los diagramas de interacción de la corrosión del acero corrugado pasivado antes y después de la corrosión en la zona de exposición al agua de subsuelo

### 5.4.1. Diagrama de interacción del acero corrugado antes del proceso de corrosión

Se realiza el cálculo del diagrama de interacción considerando la columna C-03 del expediente técnico, tomando esta como elemento de referencia para el análisis por soportar mayor carga de las columnas adecuadas para el estudio de la corrosión del acero corrugado y del acero galvanizado. Figura 44.

**Figura 44**

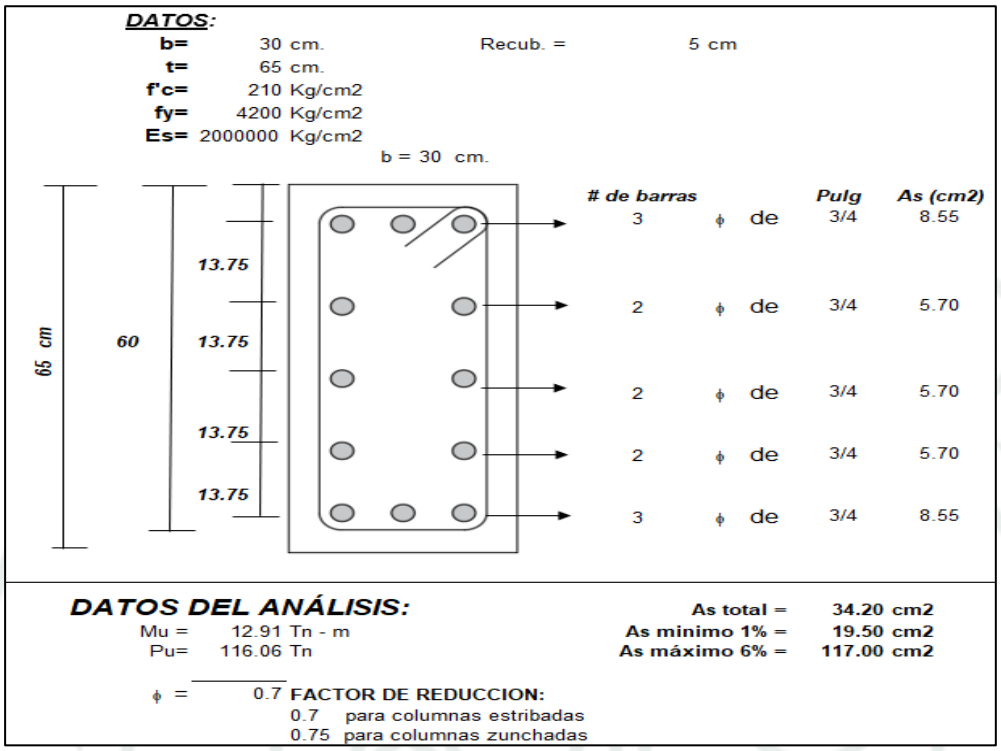
*Columna C-03 en estudio del expediente técnico, antes del proceso de corrosión*




*Nota*. La figura representa la columna en estudio C-3 antes del proceso de corrosión.

**Figura 45**

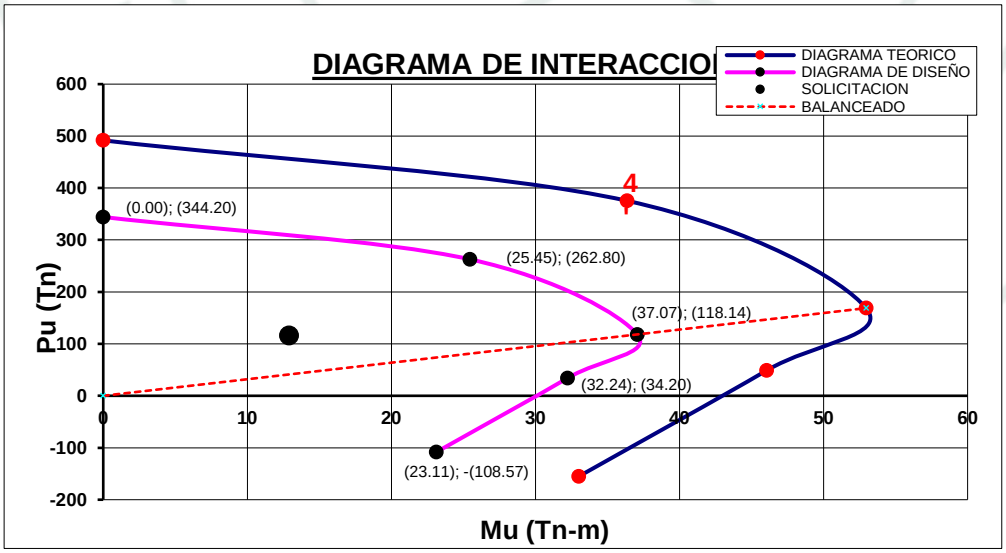
*Datos de análisis de la columna C-03, antes del proceso de corrosión del acero corrugado*




*Nota*. La figura representa los datos de análisis de la columna en estudio C-3 antes del proceso de corrosión. Tomada de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

**Figura 46**

*Diagrama de interacción de la columna C-03, antes del proceso de corrosión*




*Nota*. La figura representa el diagrama de interacción de la columna C-3 antes del proceso de corrosión.

**Tabla 22**

*Resumen de puntos del diagrama de interacción de la columna C-03 del acero corrugado antes del proceso de corrosión*

| Punto | C | Teórico | | Practico | | Balanceado | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mu | Pu | Mu | Pu | Mu | Pu |
| ***3*** | 5.00 | 33.01 | -155.10 | 23.11 | -108.57 | 0.00 | 0.00 |
| ***5*** | 20.15 | 46.05 | 48.85 | 32.24 | 34.20 | 52.95 | 168.77 |
| ***Cb*** | 35.29 | 52.95 | 168.77 | 37.07 | 118.14 | | |
| ***4*** | 60 | 36.36 | 375.43 | 25.45 | 262.80 | | |
| ***1*** | | 0.00 | 491.72 | 0.00 | 344.20 | | |

*Nota*. La figura representa los puntos del diagrama de interacción de la columna C-3 antes del proceso de corrosión.

En la figura 46 se observa el diagrama de interacción de la corrosión del acero corrugado, columna C-3 figura 44, los datos de análisis en la figura 45, la columna está constituida por 12 varillas 3/4" antes del proceso de corrosión, soporta una carga axial de 344.200 Tn y un momento máximo resistente de 37.070 Tn, la capacidad resistente está dentro de los límites de seguridad estructural, se evidencia el resumen de puntos en la tabla 22.

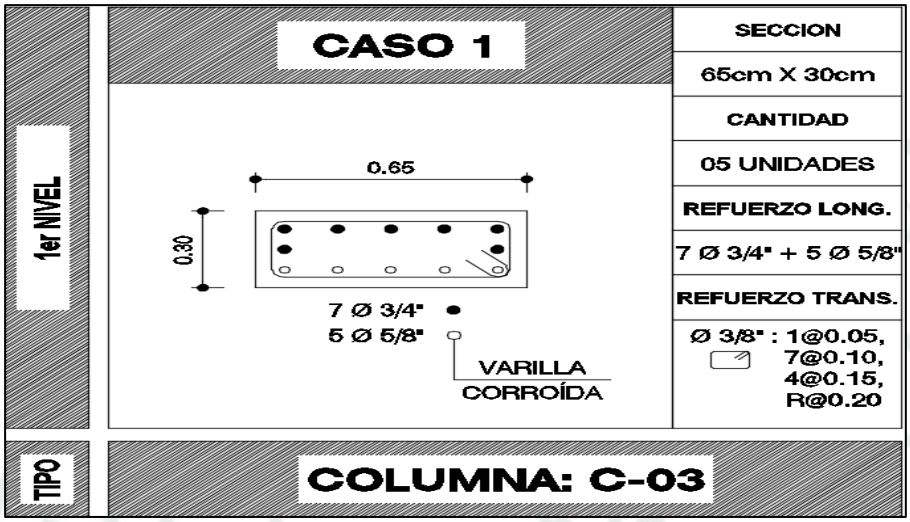
### 5.4.1. Diagramas de interacción de posibles casos de corrosión del acero corrugado

El nivel freático de las construcciones cerca del lago Titicaca es alto según la tabla 12, en las áreas perforadas la distancia en marzo de la superficie al nivel freático se tiene: FIGIM UNA a 0.400 m, Jayllihuaya a 0.490 m y Salcedo a 1.530 m. De acuerdo al expediente técnico en la figura 16 se presenta las características de la columna C-03; se aprecia del fondo hacia la superficie: un enrocado, luego una sub zapata, posteriormente una loza y por último la columna. Por estas características estructurales de la columna C-03, la probabilidad del ingreso del agua de subsuelo al acero de refuerzo va a ser por los lados, en ese sentido se propone 04 posibles casos de corrosión para la columna C-03 considerados en el punto 5.2.1 sub punto E, que son analizados con los diagramas de interacción:

## A. Caso 01, la columna C-03 con 07 varillas de 3/4” y 05 varillas posibles corroídas

**Figura 47**

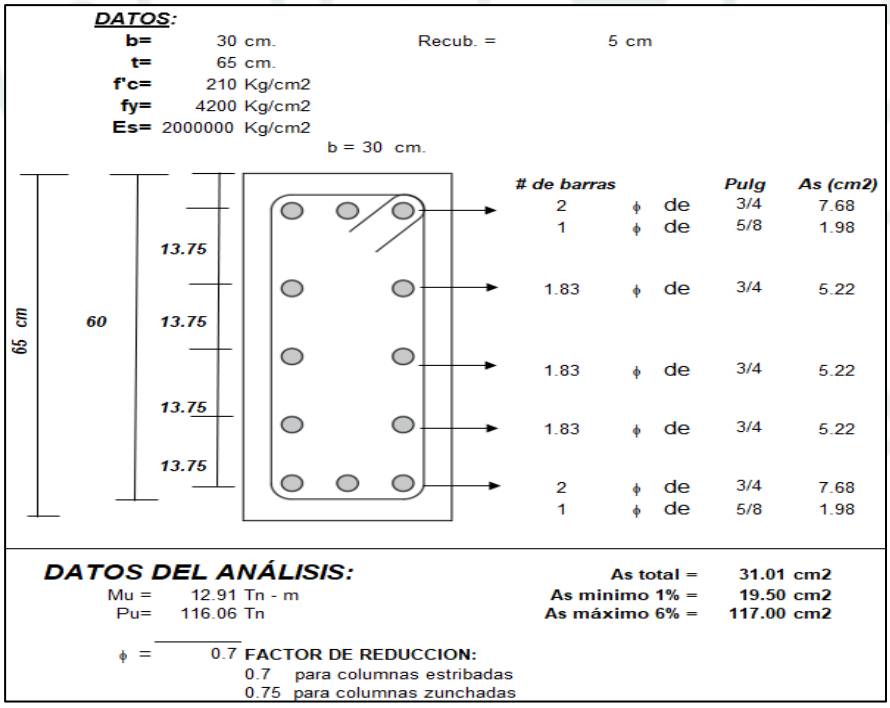
*Columna C-03 después del proceso de corrosión, 05 varillas corroídas*




*Nota.* La figura representa la columna en estudio C-3 del con 5 varillas de 3/4 han pasado a 5/8 por el proceso de corrosión.

**Figura 48**

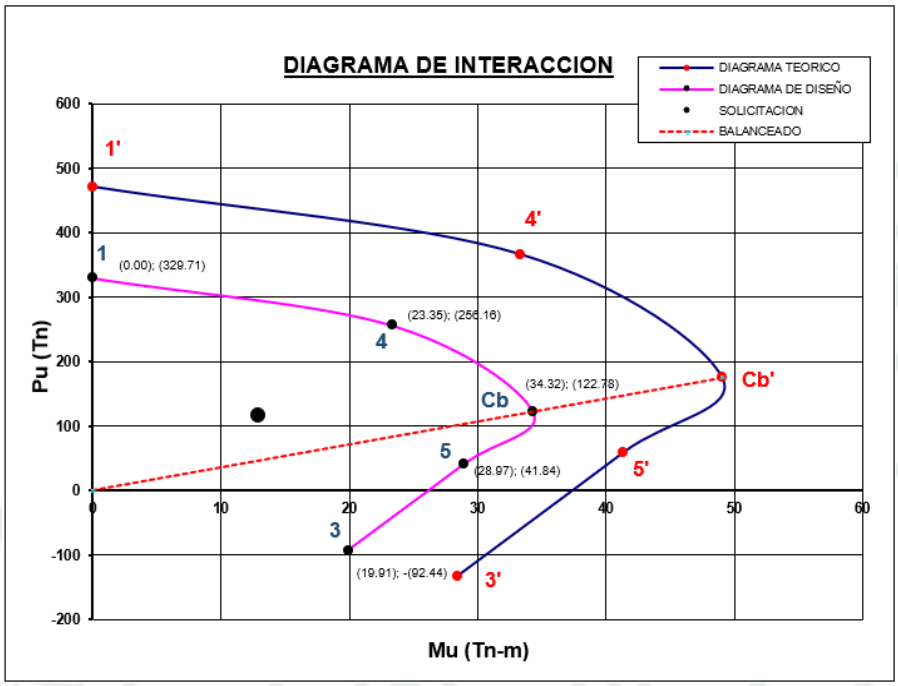
*Datos de análisis de la columna C-03 del caso 01 posible del proceso de corrosión del acero corrugado*




*Nota*. La figura representa los datos de análisis de la columna en estudio C-3 caso 1.

**Figura 49**

*Diagrama de interacción del caso 01 de la columna C-03 después del proceso de corrosión, 05 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa el diagrama de interacción de la columna C-3 caso 1.

En la figura 49 se observa el diagrama de interacción del caso 01 de posible corrosión del acero corrugado, figura 47 la columna C-03 y con los datos de análisis figura 48, con 07 varillas de 3/4” sin corroerse y 05 varillas de la columna corroídas las cuales se han reducido su diámetro de 3/4" a 5/8"**.** Esta disminución en el diámetro del acero provoca una reducción en la capacidad resistente del elemento estructural.

De acuerdo con el diagrama de interacción**,** la carga axial máxima de la columna se reduce de 344.20 Tn a 334.82 Tn**,** mientras que el momento máximo resistente disminuye de 37.07 Tn a 35.36 Tn**.**

A pesar de esta reducción en la capacidad resistente, la carga última solicitante aún se encuentra dentro de la curva de capacidad de la columna**,** lo que indica que el elemento continúa trabajando dentro de los límites de seguridad estructural. Esto evidencia que el diseño original de la columna sometida a flexo compresión presenta una capacidad considerablemente superior a la demanda estructural. El resumen de puntos se observa en la tabla 23.

**Tabla 23**

*Resumen de puntos caso 01, del diagrama de interacción del acero corrugado*

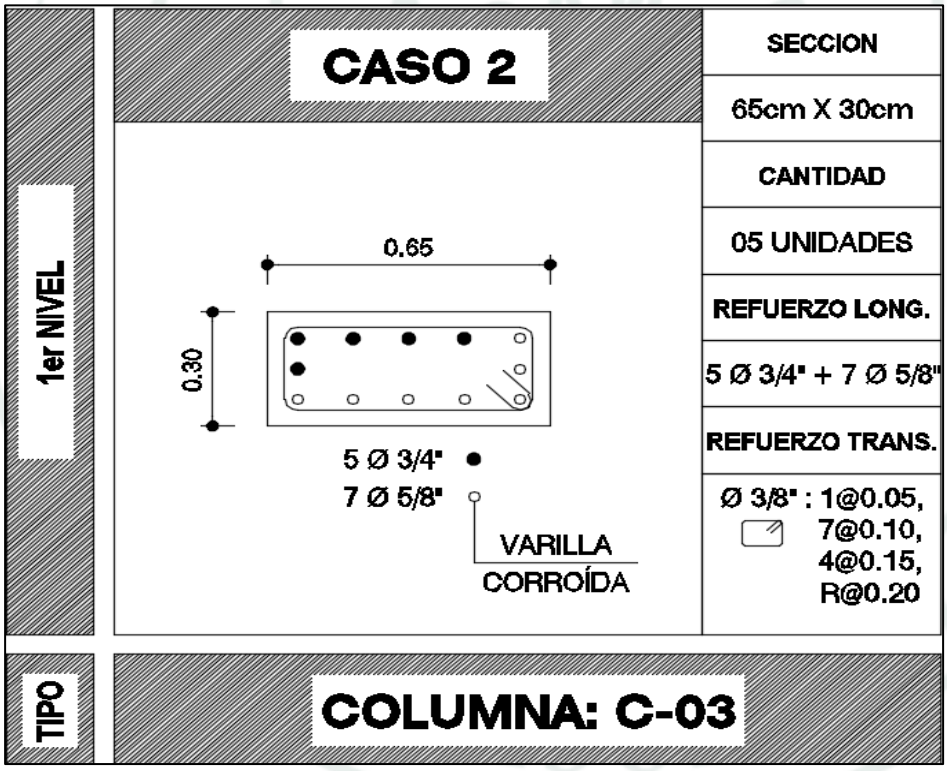
| Punto | C | Teórico | | Practico | | Balanceado | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mu | Pu | Mu | Pu | Mu | Pu |
| ***3*** | 5.00 | 30.63 | -139.37 | 21.44 | -97.56 | 0.00 | 0.00 |
| ***5*** | 20.15 | 43.66 | 52.45 | 30.56 | 36.71 | 50.51 | 168.08 |
| ***Cb*** | 35.29 | 50.51 | 168.08 | 35.36 | 117.66 | | |
| ***4*** | 60 | 34.68 | 365.94 | 24.27 | 256.16 | | |
| ***1*** | | 0.00 | 478.32 | 0.00 | 334.82 | | |

*Nota*. La figura representa los puntos del diagrama de interacción columna C-3 caso 1.

## B. Caso 02, de la columna C-03 con 05 varillas de 3/4” y 07 varillas posibles corroídas

**Figura 50**

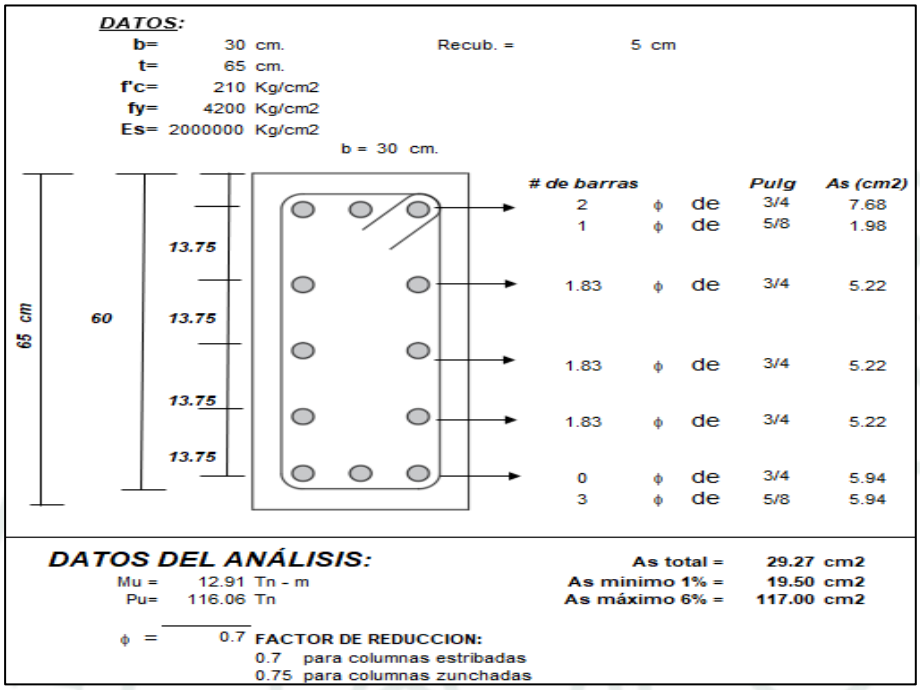
*Columna C-03 después del proceso de corrosión, 07 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa la columna en estudio C-3 con 7 varillas de 3/4 han pasado a 5/8 por el proceso de corrosión.

**Figura 51**

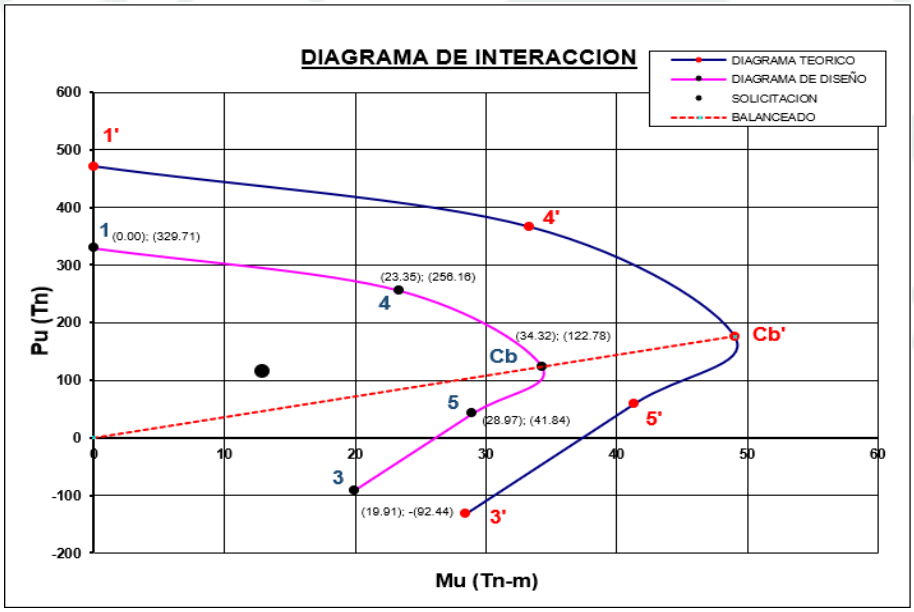
*Datos de análisis de la columna C-03 del caso 02 del proceso de corrosión del acero corrugado*




*Nota*. La figura representa los datos de análisis de la columna en estudio C-3 caso 2.

**Figura 52**

*Diagrama de interacción de la columna C-03 caso 2 después del proceso de corrosión, 07 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa el diagrama de interacción de la columna C-3 caso 2.

En la figura 52 se presenta el diagrama de interacción del caso 02 de posible corrosión del acero corrugado, las características de la columna C-03 figura 50, con los datos de análisis figura 51, en este proceso de corrosión 05 varillas de 3/4” no se han corroído y 07 varillas de la columna se han corroído, estas últimas varillas se han reducido su diámetro de 3/4" a 5/8"**.** Esta disminución en el diámetro del acero provoca una reducción en la capacidad resistente del elemento estructural.

De acuerdo con el diagrama de interacción**,** la carga axial máxima de la columna se reduce de 344.20 Tn a 329.71 Tn**,** mientras que el momento máximo resistente disminuye de 37.07 Tn a 34.32 Tn**.**

A pesar de esta reducción en la capacidad resistente, la carga última solicitante aún se encuentra dentro de la curva de capacidad de la columna**,** lo que indica que el elemento continúa trabajando dentro de los límites de seguridad estructural. Esto evidencia que el diseño original de la columna sometida a flexo compresión presenta una capacidad considerablemente superior a la demanda estructural. El resumen de puntos se observa en la tabla 24.

**Tabla 24**

*Resumen de puntos del caso 2 de la columna C-03 después del proceso de corrosión*

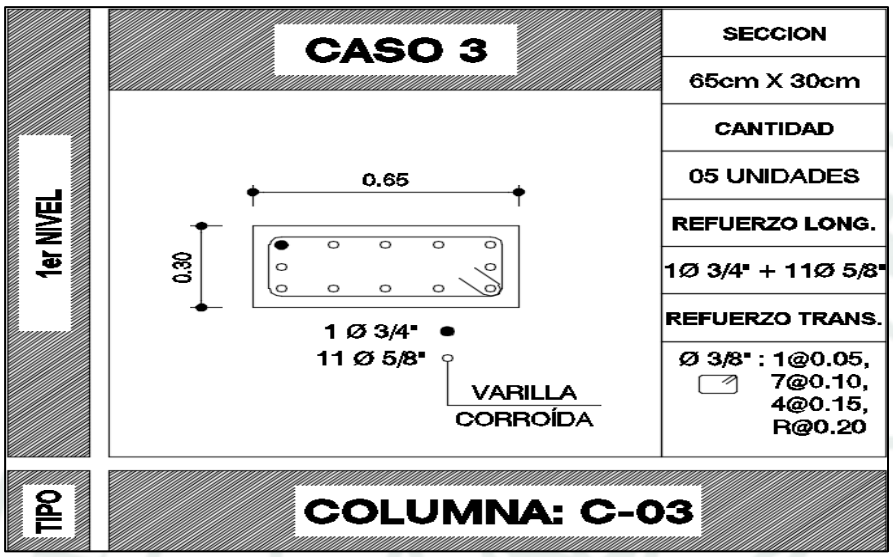
| **Punto** | **C** | **Teórico** | | **Práctico** | | **Balanceado** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Mu** | **Pu** | **Mu** | **Pu** | **Mu** | **Pu** |
| *3* | 5.00 | 28.45 | -132.06 | 19.91 | -92.44 | 0.00 | 0.00 |
| *5* | 20.15 | 41.39 | 59.76 | 28.97 | 41.84 | 49.03 | 175.40 |
| *Cb* | 35.29 | 49.03 | 175.40 | 34.32 | 122.78 | | |
| *4* | 60 | 33.36 | 365.94 | 23.35 | 256.16 | | |
| *1* | | 0.00 | 471.01 | 0.00 | 329.71 | | |

*Nota*. La figura representa los puntos del diagrama de interacción columna C-3 caso 2.

## C. Caso 03, de la columna C-03 con 01 varillas de 3/4” y 11 varillas posibles corroídas

**Figura 53**

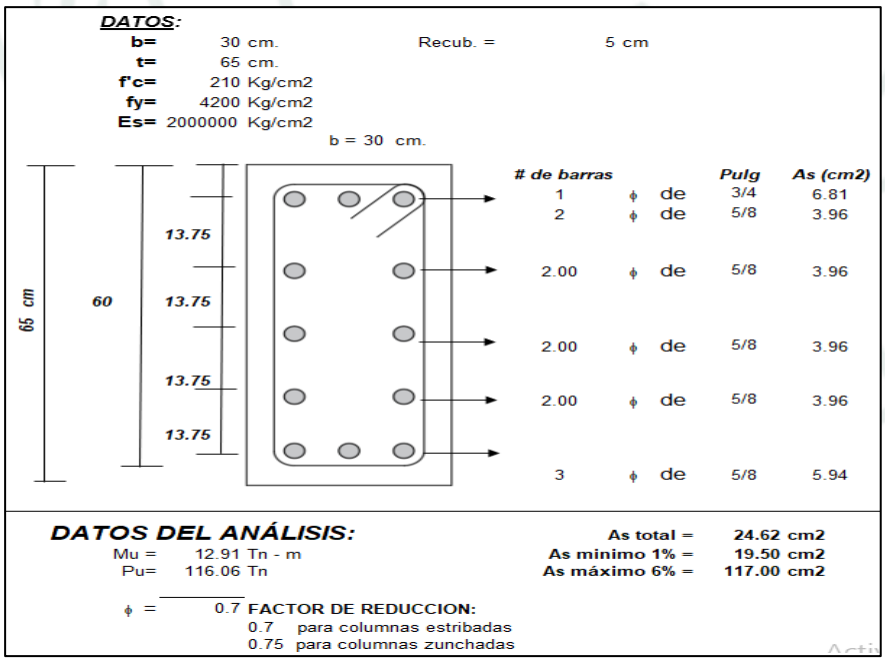
*Columna C-03 después del proceso de corrosión, 11 varillas corroídas*




*Nota.* La figura representa la columna en estudio C-3 con 11 varillas de 3/4 han pasado a 5/8 por el proceso de corrosión.

**Figura 54**

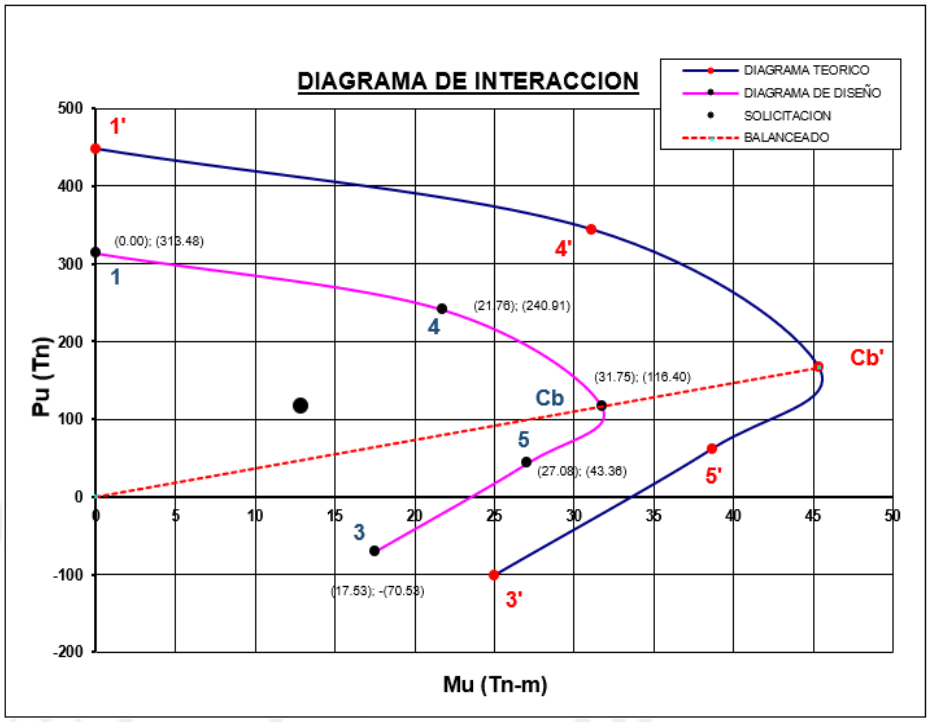
*Datos de análisis de la columna C-03 del caso 03 del proceso de corrosión del acero corrugado*




*Nota.* La figura representa los datos de análisis de la columna en estudio C-3 caso 3.

**Figura 55**

*Diagrama de interacción de la columna C-03 caso 3 después del proceso de corrosión, 11 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa el diagrama de interacción de la columna C-3 caso 3.

En la figura 55 se observa el diagrama de interacción del caso 03 de posible corrosión del acero corrugado, la columna C-03 figura 53, con los datos de análisis figura 54, en este proceso de corrosión 01 varillas de 3/4" no se han corroído y 11 varillas se han corroído, las varillas corroídas se han reducido de diámetro de 3/4" a 5/8"**.** Esta disminución en el diámetro del acero corrugado provoca una reducción en la capacidad resistente del elemento estructural.

De acuerdo con el diagrama de interacción**,** la carga axial máxima de la columna se reduce de 344.20 Tn a 316.04 Tn**,** mientras que el momento máximo resistente disminuye de 37.07 ton a 32.64 Tn**.**

A pesar de esta reducción en la capacidad resistente, la carga última solicitante aún se encuentra dentro de la curva de capacidad de la columna**,** lo que indica que el elemento continúa trabajando dentro de los límites de seguridad estructural. Esto evidencia que el diseño original de la columna sometida a flexo compresión presenta una capacidad considerablemente superior a la demanda estructural. El resumen de puntos se evidencia en la tabla 25.

**Tabla 25**

*Resumen de puntos del caso 03 de la columna C-03 después del proceso de corrosión*

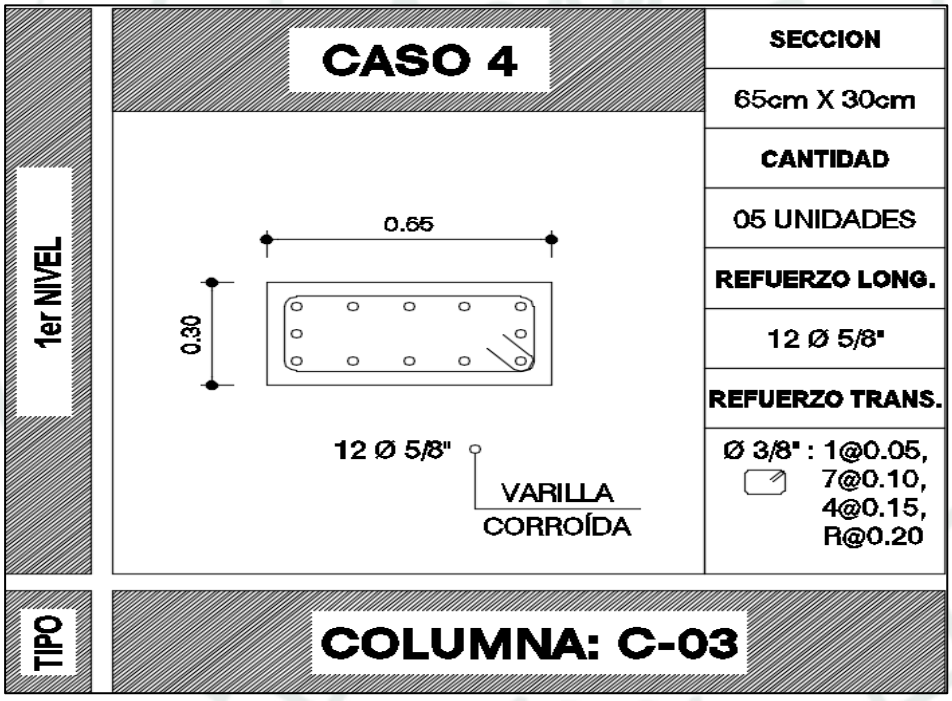
| Punto | C | Teórico | | Práctico | | Balanceado | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mu | Pu | Mu | Pu | Mu | Pu |
| *3* | 5.00 | 24.97 | -100.75 | 17.48 | -70.53 | 0.00 | 0.00 |
| *5* | 20.15 | 39.62 | 65.87 | 27.74 | 46.11 | 46.63 | 169.95 |
| *Cb* | 35.29 | 46.63 | 169.95 | 32.64 | 118.96 | | |
| *4* | 60 | 31.73 | 348.95 | 22.21 | 244.27 | | |
| *1* | | 0.00 | 451.48 | 0.00 | 316.04 | | |

*Nota*. La figura representa los puntos del diagrama de interacción columna C-3 caso 3.

## D. Caso 04, de la columna C-03 con 0 varillas de 3/4" y 12 varillas posibles corroídas

**Figura 56**

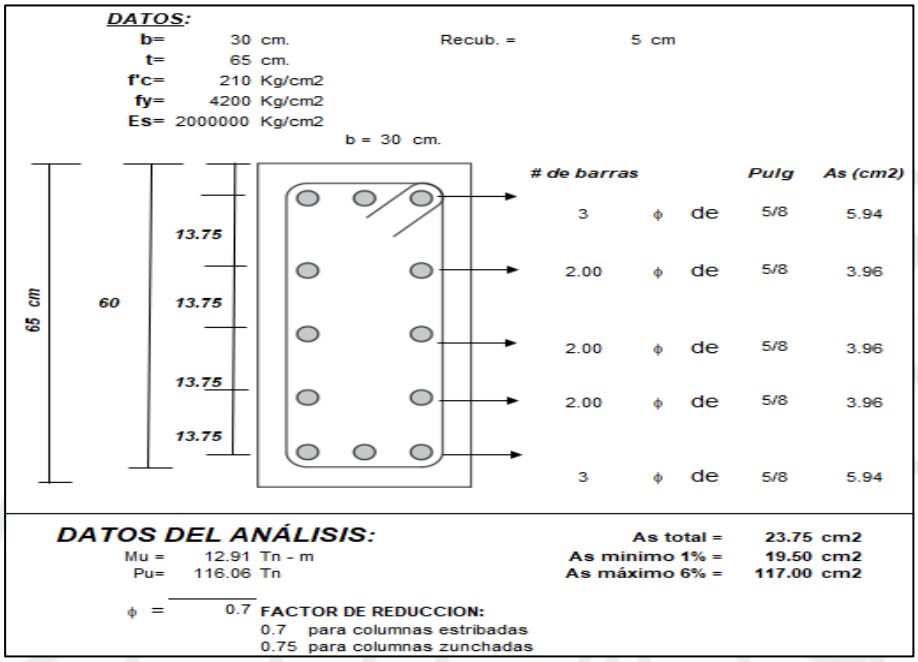
*Columna C-03 después del proceso de corrosión, 12 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa la columna en estudio C-3 con 12 varillas de 3/4 han pasado a 5/8 por el proceso de corrosión.

**Figura 57**

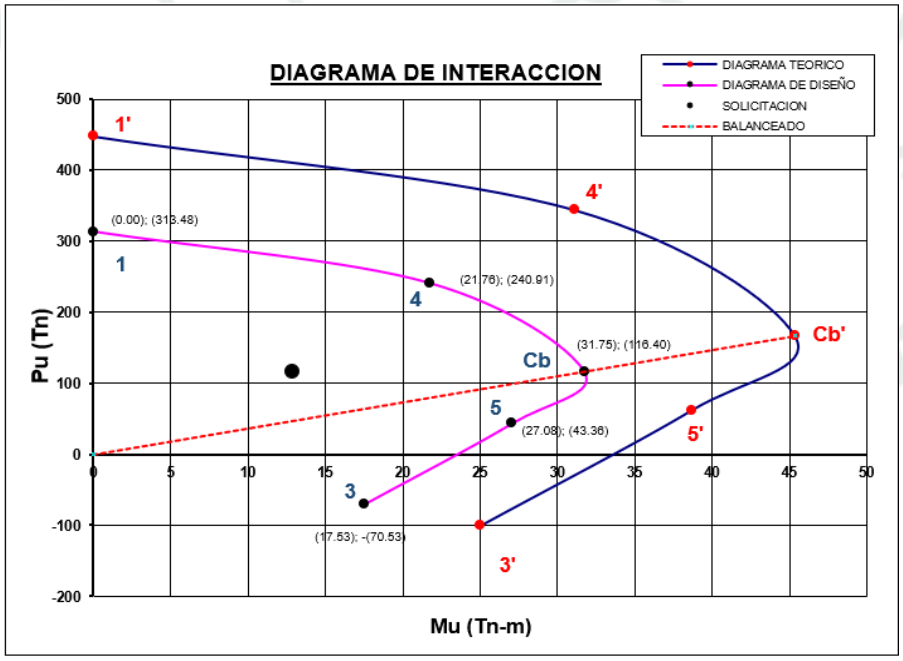
*Datos de análisis de la columna C-03 del caso 04 del proceso de corrosión del acero corrugado*




*Nota*. La figura representa los datos de análisis de la columna en estudio C-3 caso 4.

**Figura 58**

*Diagrama de interacción de la columna C-03 después del proceso de corrosión, 12 varillas corroídas*




*Nota*. La figura representa el diagrama de interacción de la columna C-3 caso 4.

En la figura 58 se observa el diagrama de interacción del caso 04, la posible corrosión de la columna C-03 en la figura 56, los datos de análisis en la figura 57 del proceso de corrosión del acero corrugado, en la columna C-03 las 12 varillas de 3/4" han sufrido el proceso de corrosión, al corroerse las varillas de 3/4" se ha reducido de diámetro de 3/4" a 5/8". Esta disminución en el diámetro del acero corrugado ha provoca una reducción en la capacidad resistente del elemento estructural.

De acuerdo con el diagrama de interacción, la carga axial máxima de la columna se ha reducido de 344.20 ton a 313.48 Tn, mientras que el momento máximo resistente disminuye de 37.07 Tn a 31.75 Tn.

A pesar de esta reducción en la capacidad resistente, la carga última solicitante aún se encuentra dentro de la curva de capacidad de la columna, lo que indica que el elemento continúa trabajando dentro de los límites de seguridad estructural. Esto evidencia que el diseño original de la columna sometida a flexo compresión presenta una capacidad considerablemente superior a la demanda estructural. El resumen de los puntos se tiene en la tabla 26.

**Tabla 26**

*Resumen de puntos del caso 04 de la columna C-03 después del proceso de corrosión*

| Punto | C | Teórico | | Practico | | Balanceado | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mu | Pu | Mu | Pu | Mu | Pu |
| *3* | 5.00 | 25.04 | -100.75 | 17.53 | -70.53 | 0.00 | 0.00 |
| *5* | 20.15 | 38.69 | 61.95 | 27.08 | 43.36 | 45.36 | 166.29 |
| *Cb* | 35.29 | 45.36 | 166.29 | 31.75 | 116.40 | | |
| *4* | 60 | 31.09 | 344.16 | 21.76 | 240.91 | | |
| *1* | | 0.00 | 447.83 | 0.00 | 313.48 | | |

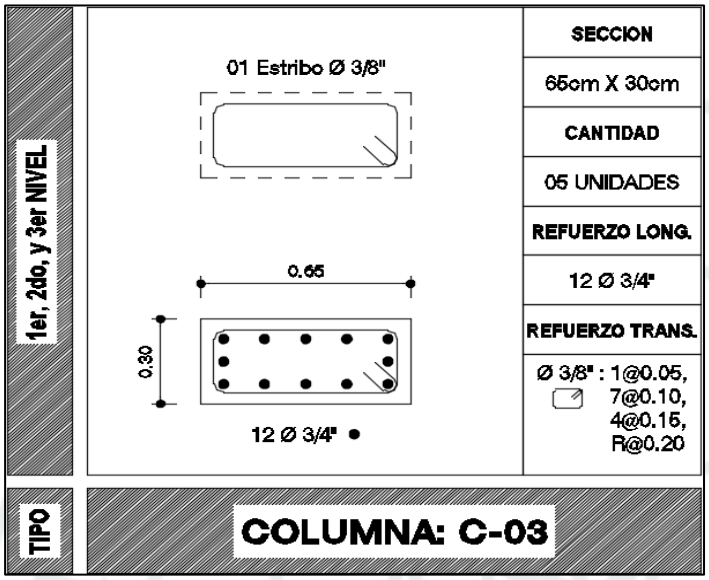
*Nota*. La figura representa los puntos del diagrama de interacción columna C-3 caso 4.

### 5.4.2. Diagrama de interacción del acero corrugado galvanizado antes de la corrosión y durante 59.259 años

De acuerdo a los resultados de la experimentación realizada el acero corrugado galvanizado se corroe con una velocidad de corrosión de 0.054 mm/año, esto ha determinado que la columna C-03 en estudio de 12Ø3/4" se mantiene durante 59.259 años figuras: 59, 60 y 61 y luego se convierte en una columna C-03 con 12Ø5/8”.

**Figura 59**

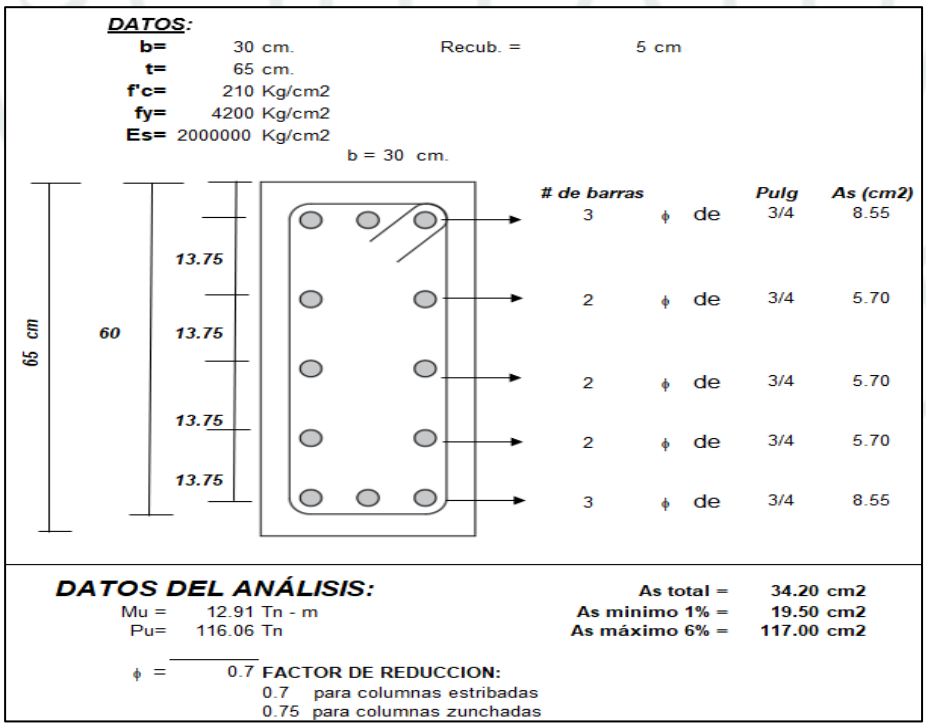
*Columna C-03 en estudio del expediente técnico, antes del proceso de corrosión, con acero galvanizado*




*Nota*. La figura representa la columna en estudio C-3 antes del proceso de corrosión y durante 59.259 años. Adecuada de Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

**Figura 60**

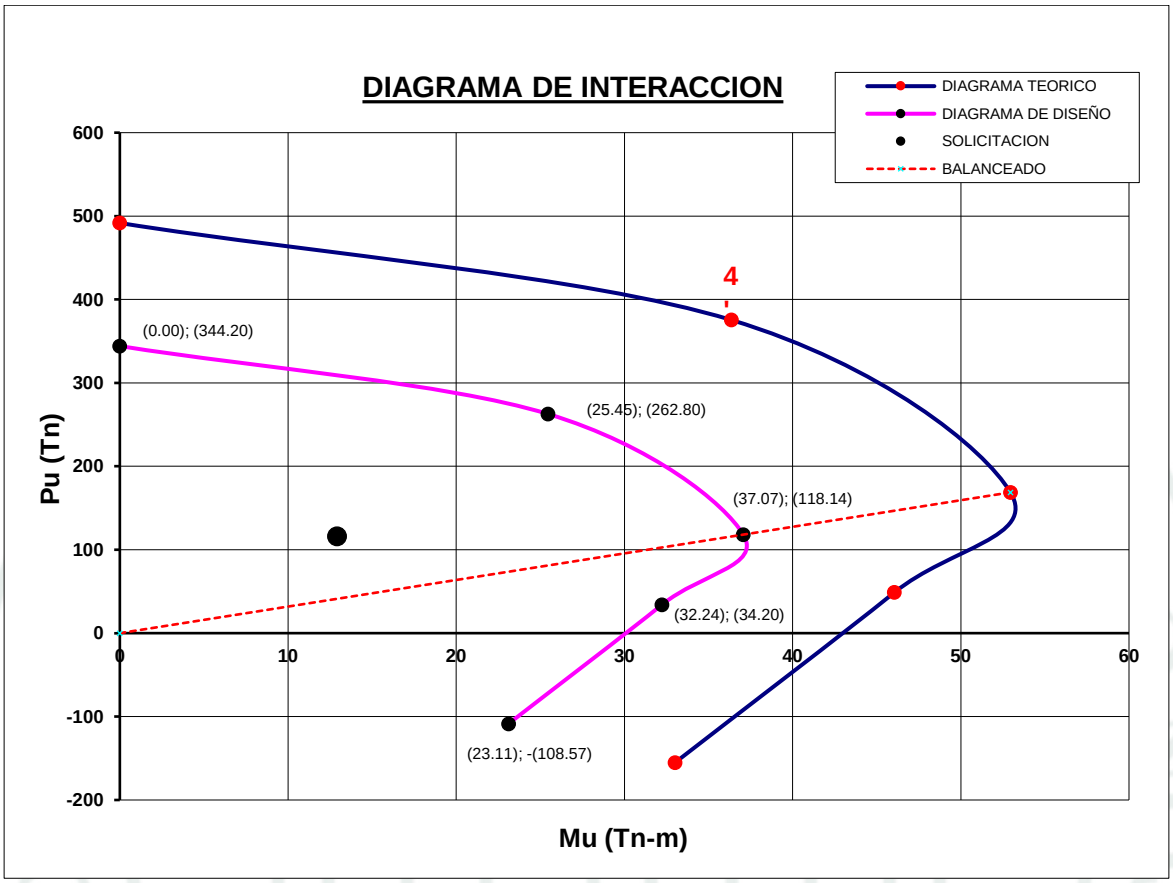
*Datos de análisis de la columna C-03 del proceso de corrosión del acero galvanizado*




*Nota*. La figura representa los datos de análisis de la columna en estudio C-3 del acero galvanizado.

**Figura 61**

*Diagrama de interacción de la columna C-03, antes del proceso de corrosión*




*Nota*. La figura representa el diagrama de interacción de la columna C-3 acero galvanizado.

En la figura 61 se observa el diagrama de interacción de la corrosión del acero corrugado galvanizado, la columna C-03 en estudio con 12 varillas 3/4" figura 59, con el análisis de los datos figura 60; justifica porque columna C-03 con 12 varillas de acero corrugado galvanizado de 3/4” se mantiene durante 59.259 años y luego pasa a una columna C-03 con 12 varillas de acero corrugado galvanizado de 5/8” y según Ingenieros Asesores (2025), la vida útil de una edificación de concreto armado destinada a vivienda u oficinas es de 50 años. Por lo tanto, la columna C-03 constituida por 12 varillas 3/4" de acero corrugado galvanizado soporta una carga axial de 344.200 Tn y un momento máximo resistente de 37.070 Tn, esta capacidad resistente está dentro de los límites de seguridad estructural.

## 5.5. Comparación de los diagramas de interacción del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado

**Tabla 27**

*Resultados comparativos de los diagramas de interacción del acero corrugado con al acero corrugado galvanizado antes y después de la corrosión*

| Tiempo que soporta una carga axial de 344.200 t y momento máximo resistente de 37.070 Tn, la columna C-03 en estudio | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Por la corrosión del acero corrugado en años** | | | | **Por la corrosión del acero corrugado galvanizado en años** | | | | | | |
| 10 | 20 | 30 | 40 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| X | X | X | | X | X | X | X | X | X | |

*Nota*. La tabla representa los años que soporta la carga axial por efecto de la corrosión el acero corrugado y el acero galvanizado.

En la tabla 27, se observa que el acero corrugado por la velocidad de corrosión de 0.108 mm/año las varillas de 3/4" en la columna C-03 soporta una carga axial de 344.200 Tn y momento máximo resistente de 37.070 Tn por un periodo de 29.630 años y por la velocidad de corrosión de 0.054 mm/año acero corrugado galvanizado las varillas de 3/4" en la columna C-03 soporta la misma carga axial de 344.200 Tn y el mismo momento máximo resistente de 37.070 Tn por un periodo de 59.259 años cumpliendo la vida de una estructura.

## 5.6. Referencia de costos

Se presentan los costos comparativos de la utilización del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado, excluyendo los costos asociados al proceso de experimentación.

### 5.6.1. Costo del acero corrugado

Fierro de 3/4" x 9 m A615 ASTM para construcción de aceros Arequipa S/. 78.270 (Promart).

### 5.6.2. Cantidad del zinc en el acero corrugado galvanizado

Según, Wzaceros.com (2026), la vida útil del acero galvanizado durante 59.259 años requiere una capa de zinc galvanizado de 4.200 milésimas de pulgada, para el cálculo se aplica la siguiente relación (figura 62):

$$\mathbf{e} = \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{\rho} \times \boldsymbol{S}}$$ (Galvanized-coil.com 2025)

e: 4.200 milésimas de pulgada es igual a 0.0107 cm (espesor de la capa de zinc del acero galvanizado)

m: Masa de la capa del zinc del acero galvanizado

ρ: 7.140 g/cm3 (peso específico del zinc)

S: 5400.410 cm2 (área de la superficie lateral de una varilla de acero corrugado de 3/4")

Reemplazando valores se tiene:

$$0.0107\ \text{Cm} = \frac{m(g)}{7.140\frac{g}{cm3} \times 5400.410 cm2}$$

Masa (m), de zinc depositado en una varilla de 3/4" es de 412.581 g

### 5.6.3. Costo del zinc en el acero corrugado galvanizado de 3/4"

Se calcula con los siguientes datos:

Precio del zinc = U$ 3.263/ kg (Futuros zinc – MZNc1, diciembre 2025)

Zinc en cada varilla de 3/4" = 0.413 kg

Valor del zinc en cada varilla = S/. 4.638

Valor de la varilla = S/. 78.270 (Promart)

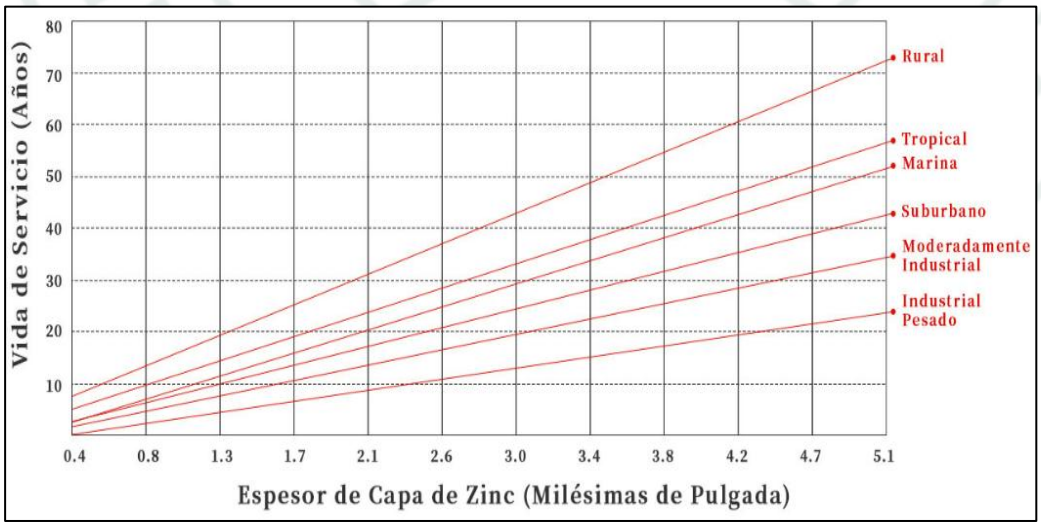
Por lo tanto, una varilla de 3/4" más el zinc del galvanizado

= S/. 78.270 + 4.638

= S/. 82.808.

**Figura 62**

*Vida de servicio y espesor de la capa de zinc del acero galvanizado*




*Nota*. La figura representa la vida de servicio del acero galvanizado de acuerdo al espesor de la capa de zinc. Tomado de Wzaceros.com,2026.

**Tabla 28**

*Resumen comparativo del costo de una varilla de 3/4" entre el acero corrugado y el acero corrugado galvanizado*

| **Costo comparativo en soles de una varilla de acero corrugado de 3/4"** | |
|---|---|
| Acero corrugado pasivado | Acero corrugado galvanizado con el valor del zinc sin mano de obra |
| S/. 78.270 | S/. 82.808 |
| **Costo comparativo en soles de una varilla de acero corrugado de 3/4"** | |
| Acero corrugado pasivado | Acero corrugado galvanizado con el valor del zinc y el 30% de mano de obra |
| S/. 78.270 | S/. 107.650 |

*Nota.* La tabla representa una referencia de costos del acero corrugado y del acero galvanizado.

En la figura 62 se observa el espesor de 4.200 milésimas de pulgada para un tiempo de vida de servicio del acero galvanizado de 59.259 años por efecto de la corrosión. En la tabla 28 se observa que la diferencia del costo del acero corrugado de 3/4" con el acero corrugado galvanizado, solamente en costo de zinc es de S/. 4.538 soles, cuya varilla costaría S/. 82.808 soles. Considerando el 30% del costo de mano de obra, asciende a un total por varilla a S/. 107.650 soles.

## CONCLUSIONES

- El estudio comparativo del proceso experimental de la corrosión del acero permitió tener conocimiento, que el acero de refuerzo pasivado presenta una mayor velocidad de corrosión que el acero de refuerzo galvanizado en el concreto armado de construcciones ubicadas cerca del lago Titicaca.

- Las mediciones de la resistencia eléctrica de las probetas de concreto, realizadas después de su fabricación, tras el secado y luego de su inmersión en una solución 1 M de cloruro de sodio, permitieron determinar la permeabilidad del concreto en construcciones cerca del lago Titicaca.

- Los ensayos experimentales de las curvas de polarización y las pendientes de Tafel del acero corrugado determinaron una velocidad de corrosión de 0.108 mm/año, como consecuencia, una varilla de 3/4" se reduce a 5/8" en aproximadamente 29.630 años debido al proceso corrosivo. Por otro lado, el acero corrugado galvanizado presentó una velocidad de corrosión de 0.054 mm/año, lo que implica que una varilla de 3/4" se reduce a una sección de 5/8" en aproximadamente 59.259 años

- Los cálculos de los diagramas de interacción aplicados a la columna en estudio C-03, reforzada con 12 varillas de 3/4" de acero corrugado antes del proceso de corrosión soportan una carga axial de 344.200 Tn y un momento máximo resistente de 37.070 Tn, después de 29.630 años de exposición al proceso de corrosión, las 12 varillas de acero corrugado se reducen a 5/8", alcanzando una capacidad de carga axial de 313.48 Tn y un momento máximo resistente de 31.75 Tn. Mientras que los diagramas de interacción aplicados a la misma columna C-03, con 12 varillas de 3/4" de acero corrugado galvanizado, la columna se mantiene durante 59.259 años de exposición al proceso de corrosión, soportando una capacidad de carga axial de 344.200 Tn y un momento máximo resistente de 37.070 Tn, esta condición se encuentra dentro de los límites de seguridad estructural, lo que demuestra que el uso de acero corrugado galvanizado permite cumplir con el periodo de vida útil del concreto armado en construcciones cerca del lago Titicaca.

## RECOMENDACIONES

- Para fortalecer el estudio comparativo de la corrosión del acero de refuerzo pasivado y del acero de refuerzo galvanizado en el concreto armado de construcciones ubicadas cerca del lago Titicaca, se recomienda evaluar tanto la estabilidad de la capa pasivadora del acero corrugado como la integridad de la película protectora de zinc del acero corrugado galvanizado, en función de parámetros como el pH, conductividad eléctrica y la concentración de cloruros, sulfatos, carbonatos y nitratos durante los ensayos de velocidad de corrosión de los aceros en estudio.

- Se recomienda la fabricación de probetas de concreto armado reforzadas con acero corrugado y acero corrugado galvanizado, las cuales deben ser sometidas a contacto con agua de subsuelo proveniente de las zonas FIGIM-UNA, Jayllihuaya y Salcedo, con el objetivo de evaluar la permeabilidad y el comportamiento frente a la corrosión en condiciones que simulen el entorno cercano al lago Titicaca. Esto permitirá obtener resultados más representativos del comportamiento real del concreto armado en condiciones de campo.

- Para el estudio de la velocidad de corrosión del acero corrugado y del acero corrugado galvanizado, se recomienda no limitar el análisis únicamente a las curvas de polarización y a las pendientes de Tafel obtenidas mediante el Potenciostato/Galvanostato. Es necesario complementar estos resultados con un análisis microscópico del acero, orientado a evaluar la pérdida de sección, así como con un análisis microscópico del concreto, con el fin de identificar posibles cambios en su microestructura asociados a la dureza del agua.

- Para optimizar la aplicación de los diagramas de interacción en condiciones de exposición al agua de subsuelo, antes y después del proceso de corrosión del acero de refuerzo pasivado y del acero galvanizado en construcciones cercanas al lago Titicaca, se recomienda emplearlos en el análisis de probetas de concreto sometidas a distintos ensayos con agua proveniente de las zonas de FIGIM-UNA, Jayllihuaya y Salcedo. Esto permitirá obtener una evaluación más representativa del comportamiento estructural bajo condiciones reales de exposición.

## REFERENCIAS


Aceromafe (2022). *Propiedades y ventajas del acero estructural*. https://www.aceromafe.com/que-es-el-acero-estructural/

Acerostorices.com.mx (2023). *La corrosión del acero y como evitarla*. https://acerostorices.com.mx/blog/que-es-la-corrosion-del-acero/

Alas, M. (2019). *Investigación del efecto de la corrosión del acero en estructuras de concreto armado*. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo Facultad de Ingeniería.

American Galvanizers Association (2001). Barras de refuerzo galvanizadas y reacciones en el hormigón. https://galvanizeit.org/knowledgebase/article/galvanized-rebar-and-reactions-in-concrete

Andrade, C. (2020). Modelado de la corrosión de la armadura y estado límite de deterioro. Scielo México. https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.478

Asociación Técnica Española de Galvanización ATEG (2025). *Corrosión del acero* https://www.ateg.es/la-galvanizacion/corrosion-del-acero.

Bentz, E. (2001). *Análisis seccional del hormigón armado mediante el campo de compresión Field Theory*. Toronto, Canadá.

Best Support Underground (2025). *La relación agua-cemento un frágil equilibrio* https://bestsupportunderground.com/relacion-agua-cemento/

Bulu, P. (2014). *Comportamiento a la corrosión del acero de refuerzo en hormigón expuesto a un ambiente compuesto de cloruro y sulfato.* Science direct. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.026

Cedeño, B. (2021). *Análisis de las curvas de interacción en flexo compresión del código ACI318-19.* [Tesis de Magister. Pontificia Universidad Católica de Chile]. https://masterieg.uc.cl/wp content/uploads/2022/08/A_G_2021_Bolivar_Cedeno_C.pdf

Cemento Yura (2022). *Ficha técnica cemento Rumi*. https://www.yura.com.pe/wp-content/uploads/ficha-tecnica-rumi-ip.pdf

Cemex Latam (2023). *Agregados*. https://www.cemexlatam.com/es/productos-y-servicios/productos/agregados

Chang, D. (2015). *Estudio de relaciones momento-curvatura en secciones de concreto armado y concreto preesforzado sometidas a flexión*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6826

Chang, R. (1999). Química. México. Mc Graw Hill

Chávez, J. e Inquilla, L. (2022). *Estudio correlacional de la resistencia a compresión, tracción y flexión del concreto normal, sometidas a diferentes temperaturas de curado, Puno.* [Tesis de Ingeniero. Universidad nacional del altiplano de Puno]. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18376

Chemistry Libre Texts (2022). *Conductividad eléctrica de soluciones acuosas*. https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Laboratory_Experiments/Wet_Lab_Experiments/General_Chemistry_Labs/Online_Chemistry_Lab_Manual/Chem_9_Experiments/07%3A_Electrical_Conductivity_of_Aqueous_Solutions_(Experiment)

Chemistry Libre Texts (2021). *Electroquica y conductividad* https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Thermodynamics_and_Chemical_Equilibrium_(Ellgen)/17%3A_Electrochemistry/17.09%3A_Electrochemistry_and_Conductivity

Chemistry Libre Texts (2024). *Conductividad eléctrica* https://chem.libretexts.org/Courses/Los_Medanos_College/Chemistry_6_and_Chemistry_7_Combined_Laboratory_Manual_(Los_Medanos_College)/01%3A_Experiments/1.21%3A_Experiment_622_Electrical_Conductivity_1_1_3

Chiné, B., Cuevas, R., Jiménez, R. y Ortiz, G. (2019). *Estudio experimental de la carbonatación del concreto*. Tecnologico de Costa Rica. Vol. 32, Núm. 2: Abril-Junio 2019. http://dx.doi.org/10.18845/tm.v32i2.4350.

Concrelab (2021). *Importancia de la calidad del agua para el concreto*. https://www.concrelab.com/agua-concreto/

Concreteras en Puebla (2023). *Fenómenos químicos y físicos que afectan la calidad del concreto*. https://www.concretosolido.mx/fenomenos-quimicos-y-fisicos-que-afectan-la-calidad-del-concreto/

ConcretOnline (2018). *La corrosión de la armadura en el hormigón armado*. https://www.concretonline.com/hormigon/la-corrosion-de-las-armaduras-en-el-hormigon-armado

CTLGroup Qatar (2019). *Ataque del cloruro en estructuras de hormigón* https://www.ctlgroupqatar.com/single-post/2019/02/02/chloride-attacks-on-concrete-structures

Del Valle, A., Pérez, T. y Martínez, M. (2001). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Instituto mexicano de transporte*. https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt182.pdf.

Donadio, M., Capacho, J. y Santander, L. (2023). Gestión Integral de la corrosión. *Revista Alconpat.* donadio.michel@fr.sika.com

Estudocu (2019). *Termodinámica de la corrosión electroquímica*. Pontificia universidad Catolica del Peru. https://www.studocu.com/pe/u/54950887?sid=01721901577

Fluke (2024). La Ley de Ohm.https://www.fluke.com/es-pe/informacion/blog/electrica/que-es-la-ley-de-ohm

Gamry Instruments (2025). *Tutorial sobre la resistencia a la polarización*. https://www.gamry.com/application-notes/corrosion-coatings/corrosion-techniques-polarization-resistance/

García, D. (2017). *Manual para la elaboración de diagramas momento-curvatura de secciones de concreto reforzado.* Universidad de Pamplona. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/3712/1/Garcia_2017_TG.pdf

García, M. (2024). *Corrosión del acero de refuerzo*. https://360enconcreto.com/blog/detalle/corrocion-del-acero-de-refuerzo/

Godinez, E., Velasquez, I., Silvestre, R. y Tena, A. ( ). *Influencia de diferentes variables en la determinación de rigideces efectivas de secciones de concreto reforzado sujetas a flexión. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. https://www.researchgate.net/publication/349485918_Influencia_de_diferentes_variab

les_en_la_determinacion_de_rigideces_efectivas_de_secciones_de_concreto_reforzado_sujetas_a_flexion

Galvanized-coil.com (2025). Calculo preciso del grosor de la capa de zinc. https://latiza.zinc.org/wp-content/uploads/sites/10/2017/02/GalvInfoNote1_6.pdf

Harshit, A., Amol, A. y Salman, M. (2024). *Evaluación del rendimiento de los inhibidores de corrosión de alcoaminas para su uso como aditivo en estructuras de hormigón armado: investigación experimental y mecanismo de acción*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110266

Hernández., Pérez, J., Martínez, M., Torres, J., Castañeda, F., Morales, J. y Antaño, R. (2019). *Evaluación de corrosión de la zona soldada entre acero al carbono y acero inoxidable incrustados en concreto y expuestos a un entorno marino.* Science Direct. www.electrochemsci.org

Hormigón al día (2023). *Prediciendo la permeabilidad del hormigón para el establecimiento de modelos de vida útil.* https://hormigonaldia.ich.cl/destacado-aci/prediciendo-del-hormigon-para-el-establecimiento-de-modelos-de-vida-util/

ICOTEC (2013). *Resistencia vs. relación A/C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento*. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3211/resistencia_relacion_ac_concreto_tres_edades.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ingeniería (2011). *Corrosión del acero de refuerzo*. Instituto Mexicano del Cemento y del concreto. http://www.imcyc.com/revistacyt/oct11/artingenieria.html

Ingenieros Asesores (2025). *Vida útil de una construcción según su tipo*. https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt292.pdf

Isostatika (2021). *La corrosión en el acero en edificación*. https://isostatika.com/blog/corrosion-acero-edificacion/

Korec, E., Jirásek, M., Wong, H. y Martínez, E. (2024). *Unravelling the interplay between steel rebar corrosion rate and corrosion-induced cracking of reinforced concrete*. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107647

Laidler, K. y Meiser J. (1997). Fisicoquimica. Continental, S.A.C.V.

Londoño, E. (2025). *Lo que debes saber sobre el ataque de sulfatos en el concreto* https://360enconcreto.com/blog/detalle/ataque-de-sulfato-en-el-concreto/

Maoyao, X., Rui, G., Qisong, L. y Zhixiang, Y. (2024). *Prediction model for the bond behaviour of low-corrosion reinforced concrete considering corrosion time variability.* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137891

Medina, J., Almansa, L. y Ollerc, S. (2014). *Modelización numérica del comportamiento estructural cíclico de barras esbeltas de acero con pandeo restringido. Revista internacional de métodos numéricos para cálculos y diseño en ingeniería.* https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.07.008

Metrohm (2022). *Manual del Potenciostato/Galvanostato 302N* https://www.metrohm.com/es_es/products/a/ut30/aut302n_s.html

Muñoz, H. *(2020). Barra de Refuerzo Galvanizada*. Galvanolatina. https://galvalatina.com/2020/10/03/barra-de-refuerzo-galvanizada/

NACE (2019). Corrosión. https://inspectioneering.com/tag/nace

Norma AASHTO T 259-02 (2021). Método estándar de prueba para la resistencia del hormigón a la penetración de iones cloruro. Asociación Estadounidense de funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte.

Norma ASTM C1876 Internacional (2023). Método de prueba estándar para la resistividad eléctrica a granel o la conductividad a granel del hormigón https://www.astm.org/c1876-19.html

Nova (2022). *Software avanzado para la investigación electroquímica*. Metrohm. https://www.metrohm.com/es_es/products/nov/nova.html

NRMCA (2020). *Corrosión del acero en el concreto*. https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2020/04/CIP25es.pdf.

Orozco Lab (2025). *¿Qué es el pH? ¿Cuál es su importancia? Explicado*. https://www.orozcolab.com.mx/blog/que-es-el-ph-cual-es-su-importancia-explicado

Ottazzi, G. (2004). *Material de Apoyo para la Enseñanza de los Cursos de Diseño y Comportamiento del Concreto Armado* (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú). http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/1055

Proquimia (2020). *Pasivado del acero en caliente exento de cromo hexavalente*. https://www.proquimia.com/galvanizado-de-acero-en-caliente/

Quelcahuanca, W. (2020). *Diseño estructural para edificación de cinco niveles en suelos blandos, con el modelo interacción suelo-estructura, Bahía de Puno*. [Tesis de ingeniero. Universidad CesarVallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/20.500.12692/75518/1/Quelcahuanca_HWB-SD.pdf

Quiroga, C. (2021). El acero en la ingeniería civil, usos ventajas y limitaciones. Universidad Cooperativa de Colombia. https://repository.ucc.edu.co/bitstreams/5af1fe47-95a5-4acf-8c4b-ac5dfc0843ae/download

Quispe, D. (2019). *Evaluación de la resistencia a compresión del concreto en edificaciones comunes de la ciudad de puno*. [Tesis de Ingeniero. Universidad Nacional del Altiplano]. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/10434

Repositorio Imarpe (2019). Aspectos fisicoquímicos del lago Titica. https://biblioteca.imarpe.gob.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=2992

Rivva, E. (2000). *Naturaleza y materiales del concreto* https://es.scribd.com/doc/298319772/Materiales-Para-El-Concreto-Enrique-Rivva-Lopez

Román, J., Vera, R., Bagnara, M., Carvajal, A. y Aperador, W. (3013). *Efecto de los iones cloruro en la corrosión del acero galvanizado en estructuras de hormigón armado*. Instituto de Química, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Roymaplas (2025). *Proceso electrolítico* https://roymaplast.com/proceso-electrolitico/

Scribd (2026). Corrosión del acero por cloruros en concreto. https://es.scribd.com/document/52788870/Accion-del-cloruro-en-el-concreto-armado

Saldaña, E. (2020). *Factores que influyen la permeabilidad del concreto* https://es.linkedin.com/pulse/factores-que-influyen-la-permeabilidad-del-concreto-salda%C3%B1a-alaya

Sanchez, S., Cuevas, S., Ramos, R., Cortes, A., Vasquez, R. y Arroyo, R. (2021). *Influencia de la distribución del acero de refuerzo longitudinal en los diagramas de interacción de columnas sólidas circular.* Ciencias Exactas y Aplicadas. https://doi.org/10.30878/ces.v29n3a7

Science Direct.com (2026). Oxido ferroso del acero de refuerzo en el concreto. https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/ferrous-oxide

Slab Peru (2022). *Métodos de análisis químicos en el agua* https://slabperu.com/metodos-de-analisis-quimicos-en-el-agua/

Slideshare (2026). Tecnología del concreto. https://es.slideshare.net/slideshow/clase-agua-tecnologia-del-concreto-utp-1pptx/261794782

Studocu (2010). Permeabilidad y porosidad del concreto. https://www.studocu.com/co/document/corporacion-universitaria-de-la-costa/mecanica-de-solidos/ojsitmgestor-adelarevista06articulo09/76996219

Tang, H., Maekawa, K. y Hai, K. (2023). *Corrosión por microceldas y macroceldas de barras de acero en losas de hormigón armado en diferentes ambientes corrosivos y configuraciones cátodo/ánodo.* Science Direct. Volumen 138. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104989

Ternium, US (2020). *Diferencias entre la oxidación y la corrosión del acero*. https://www.ternium.com/es/novedades/noticias/la-oxidacion-y-la-corrosion-del-acero--13540664220

Torres, A., Martínez, M. y Castro, P. (2018). *Primera estructurade concreto duradera en el mundo hecha con acero inoxidable.* Science Direct. https://doi.org/10.1016/j.hya.2018.05.004

Toxement (2017). *Patología corrosión en el acero de refuerzo*. https://www.toxement.com.co/media/3413/patologi-a_corrosio-n.pdf

UNAM-Facultad de Ingeniería (2024). *Agregados para el concreto*. https://www.ingenieria.unam.mx/luiscr/licenciatura_ic/1444_pcee/1444_material/agregados.pdf

Vedantu (2026). Resistividad. https://www.vedantu.com/formula/resistivity-formula

Velesmoro, C. y Ana, C. (2013). *Propiedades Físicas del concreto en presencia de nitratos.* Universidad Central de Venezuela. https://saber.ucv.ve/bitstream/10872/12168/1/TESIS%20PROPIEDADES%2BFISICAS%2BDEL%2BCONCRETO%2BEN%2BPRESENCIA%2BDE%2BNITRATOS.pdf

Villa, P. (2021). *Identificación del grado de corrosión, procedimientos no destructivos*. Universidad Politecnica de Madrid. https://oa.upm.es/69682/1/TFG_Enero22_Villa_Sanz_Paula.pdf

Villao, R. (2021). Actualidad de las técnicas de análisis de corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Journal of Engineering Science*. https://doi.org/10.53734/esci.vol3.id210

Weather Spark (2026). El clima en Puno. https://es.weatherspark.com/y/26593/Clima-promedio-en-Puno-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o

Weber ES (2024). *Como pasivar y reparar elementos estructurales de concreto armado*. https://www.es.weber/tratamiento-de-hormigon/como-pasivar-y-reparar-elementos-estructurales-de-hormigon

Zohairya, A., Alshararib, F. y Salimc, H. (2020). *Modelo analítico y estudio paramétrico de vigas mixtas de hormigón armado y acero*. Science Direct. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.060

**ANEXOS**

**Anexo 1**

*Documento de autorización de uso del laboratorio para las pruebas experimentales de corrosión del acero*

Universidad Nacional del Altiplano – Puno
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA
**DECANATO**

## CONSTANCIA N° 015-2025-D-FIGIM-UNA-PUNO

**EL QUE SUSCRIBE, DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – PUNO.**

**HACE CONSTAR:**

Que, el Sr. **BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME,** ha realizado pruebas experimentales de Corrosión del Acero Corrugado en el Laboratorio de Electrometalurgia y Corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, desde el 01 de abril al 09 de mayo del año en curso - bajo supervisión, para su tesis titulada: "ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO PASIVADO CON EL ACERO GALVANIZADO EN EL CONCRETO ARMADO DE CONSTRUCCIONES CERCA DEL LAGO TITICACA".

La experimentación comprendió las siguientes actividades:

- Uso del expediente técnico: *Mejoramiento del servicio de formación académica en la Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica de la UNA, y uso de agua de subsuelo.*
- Preparación de electrodos de trabajo de acero corrugado y acero galvanizado.
- Utilización del Potenciostato/galvanostato para los ensayos de las curvas de polarización en la celda ASTM y el Software NOVA.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado, para los fines que estime por conveniente.

Puno, 28 de noviembre del 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL altiplano – PUNO – Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica – DECANO

Dr. DANTE ATILIO SALAS AVILA
Decano de la FIGIM-UNA

c.c.
Arch.2025
DASA/igf.-

**Anexo 2**

*Ubicación de la obra en el departamento de Puno*




Fuente: Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

**Anexo 3**

*Ubicación de la zona FIGIM UNA dentro de la Ciudad Universitaria*



Fuente: Unidad Ejecutora de Inversiones UNA.

**Anexo 4**

*Nivel del agua de subsuelo zona FIGIM-UNA, primera semana de enero*



**Anexo 5**

*Tesista en el lugar del agua de subsuelo zona FIGIM-UNA*



**Anexo 6**

*Nivel del agua de subsuelo zona FIGIM-UNA, segunda semana de marzo*



**Anexo 7**

*Ubicación del agua de subsuelo zona Jayllihuaya*



**Anexo 8**

*Nivel del agua de subsuelo zona Jayllihuaya, primera semana de enero*



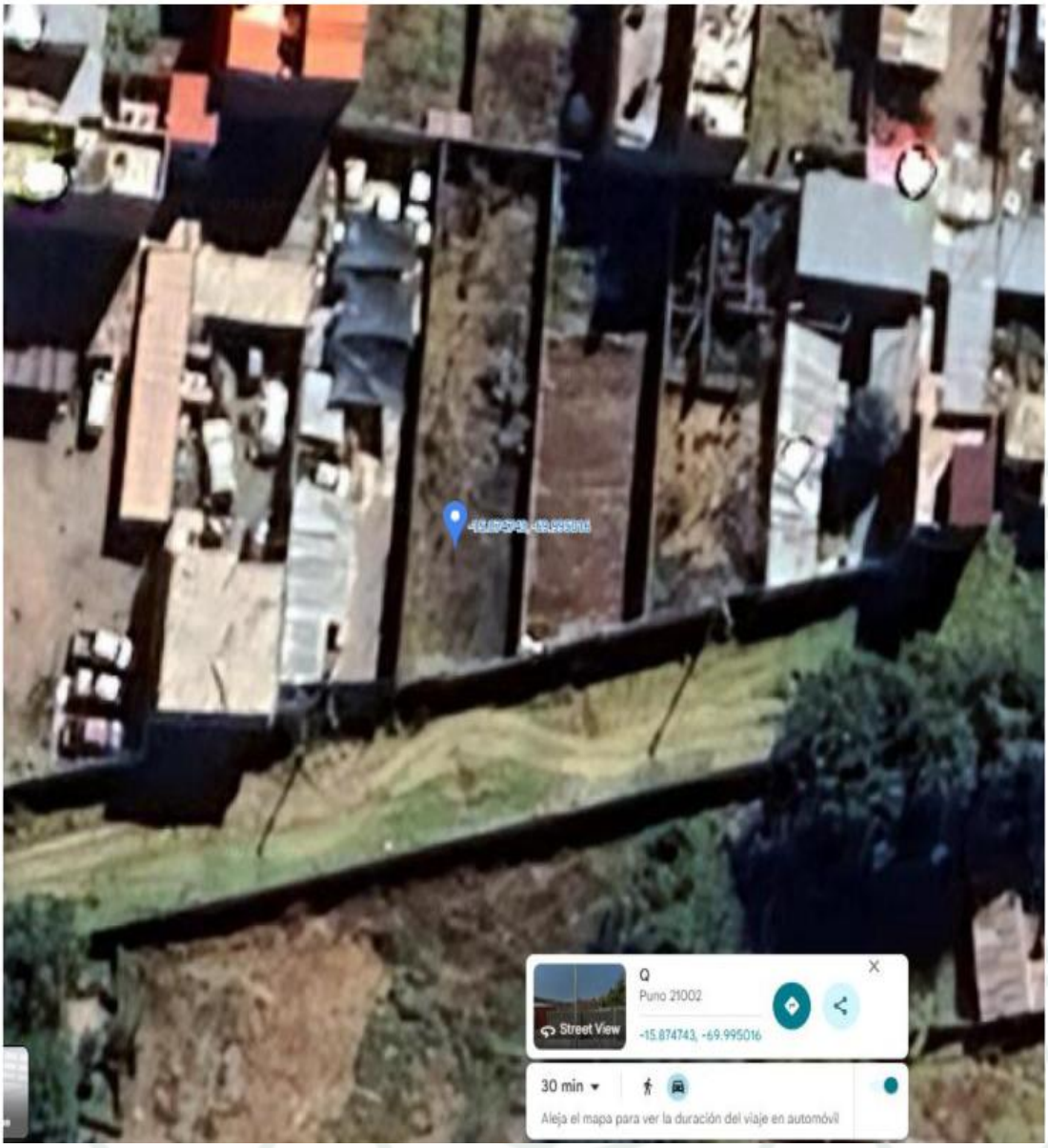
**Anexo 9**

*Nivel freático del agua de subsuelo de la Zona de Jayllihuaya, segunda semana de marzo*



**Anexo 10**

*Ubicación del agua de subsuelo zona Salcedo*



**Anexo 11**

*Nivel del agua de subsuelo zona Salcedo, primera semana de enero*



**Anexo 12**

*Resultados del análisis del agua de subsuelo FIGIM UNA*

# Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

*Clave generada : 8259D363*

## INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-25-00009

**Fecha de emisión:6/2/2025**



**Señores** : BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Dirección** : URB. LOS ZAFIROS E-18 PAUCARPATA
**Atención** : BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Proyecto** : TESIS

### PROTOCOLO DE MUESTREO

**Muestreo realizado por** : Cliente : BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Registro de muestreo** : Cadena de custodia N°: 009-25
**Plan de muestreo** : Muestreado por el cliente
**Procedimiento Aplicado** : Muestreado por el cliente

**Fecha de recepción** : 22/1/2025
**Fecha de ensayo** : 22/1/2025
**Nro de muestras** : 1

| Cod. Interno L.A.S. | (c) Nombre de muestra | (c) Matriz de la muestra | (c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart. | (c) Punto de muestreo y/o coordenadas | (c) Fecha de inicio de muestreo | (c) Hora de inicio de muestreo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| AG25000010 | PC2-FIGIM | Agua Natural - Subterránea - Agua Termal | PUNO / PUNO / PERU | 15°49'24" 70°01'10.6" | 21/1/2025 | 17:00 |

| Condiciones de recepción de la muestra |
|---|
| Contenedor no refrigerado |

| Observación |
|---|
| Datos proporcionados por el cliente. |

### MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

| Código | Título | Rango de método analítico |
|---|---|---|
| *3030 | pH. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. pH Value. Electrometric Method. - pH | [0 - 14] Unidad de pH |
| *3033 | Sulfatos. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO4(2-) E, 24th Ed. Sulfate. Turbidimetric Method | [10 - 4000] mg/L |
| *3086 | Conductividad Eléctrica. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24th Ed. Conductivity. Laboratory Method. - C E | [> 0.01 - 24800] µS/cm |
| *3093 | Nitratos. SMEWW - APHA - AWWA - WEF Part 4500-NO3- C, 24th Ed. Nitrogen (Nitrate). Second-Derivative Ultraviolet Spectrophotometric Method. | [> 0.2 - 1100] mg/L |
| *818 | Carbonatos (CaCO3). SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 24th Ed. Alkalinity. Titration method. | [> 2.5 - 1000] mg CaCO3/L |
| *823 | Cloruros. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-Cl C, 24th Ed. CHLORIDE. Mercuric Nitrate Method | [> 1.1 - 5000] mg/L |

### RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

| Código Interno L.A.S. | Nombre de Muestra | *3030 | *3033 | *3086 | *3093 | *818 | *823 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | pH (Compensado a 25°C) | $SO_4^{2-}$ | C E (Compensado a 25°C) | $NO_3^-$ | Carbonatos $CaCO_3$ | $Cl^-$ |
| | | Unidad de pH | mg/L | µS/cm | mg/L | mg $CaCO_3$/L | mg/L |
| AG25000010 | PC2-FIGIM | 7,347 | 200,1 | 1200,0 | 24,80 | *<1 | 126 |

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

**Anexo 13**

*Resultados del análisis del agua de subsuelo Jayllihuaya*

Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**

INACAL DA - Perú Laboratorio de Calibración Acreditado

Registro N°LC - 050

*Clave generada : E44E4729*

## INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-26-00029

**Fecha de emisión:26/02/2026**



**Señores** : BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Dirección** : URB. LOS ZAFIROS E 18 PAUCARPATA
**Atención** : BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Proyecto** : --

### PROTOCOLO DE MUESTREO

**Muestreo realizado por** : Cliente BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Registro de muestreo** : Cadena de custodia N°: 017-26
**Plan de muestreo** : Muestreado por el cliente
**Procedimiento Aplicado** : Muestreado por el cliente

**Fecha de recepción** : 27/01/2026
**Fecha de ensayo** : 27/01/2026
**Nro de muestras** : 1

| Cod. Interno L.A.S. | (c) Nombre de muestra | (c) Matriz de la muestra | (c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart. | (c) Punto de muestreo y/o coordenadas | (c) Fecha de inicio de muestreo | (c) Hora de inicio de muestreo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| AG26000035 | JAYLLAHUAYA | Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial | JAYLLIHUAYA - PUNO - PUNO | -15.875411 , -69.975701 | 24/01/2026 | 10:50 |

**Condiciones de recepción de la muestra**
Contenedor no refrigerado

### RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

| Código Interno L.A.S. | Nombre de Muestra | *3016 | *3030 | *3033 | *3125 | *818 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $NO_3^-$ | pH (Compensado a 25°C) | $SO_4^{=}$ | C E (Compensado a 25°C) | Carbonatos ´CaCO3 |
| | | mg/L | Unidad de pH | mg/L | µS/cm | mg $CaCO_3$/L |
| AG26000035 | JAYLLAHUAYA | 10,60 | 7,256 | [b]<10,00 | 375,6 | [a]<1 |

### MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

| Código | Título | Rango de método analítico |
|---|---|---|
| *3016 | Método de Ensayo para nitrógeno como nitrato por fotometría en agua | [* 0.0834 - 30] mg/L |
| *3030 | pH. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. pH Value. Electrometric Method. - pH | [0 - 14] Unidad de pH |
| *3033 | Sulfatos. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO4(2-) E, 24th Ed. Sulfate. Turbidimetric Method | [10 - 4800] mg/L |
| *3125 | Conductividad Electrica. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24th Ed. Conductivity: Laboratory Method. - C.E. | [* 0.01 - 24800] µS/cm |
| *818 | Carbonatos (CaCO3). SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 24th Ed. Alkalinity: Titration method | [* 2.5 - 1000] mg CaCO3/L |

* : Límite detección  * : Límite de cuantificación

### RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO

| Código Interno L.A.S. | Nombre de Muestra | #23 |
|---|---|---|
| | | $Cl^-$ |
| | | mg/L |
| AG26000035 | JAYLLAHUAYA | 8,5 |

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico CIP 19474

**Anexo 14**

*Resultados del análisis del agua de subsuelo Salcedo*

# Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

*Clave generada : 912AD616*

## *INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-26-00035*

**Fecha de emisión:26/02/2026**



**Señores** : BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Dirección** : URB. LOS ZAFIROS E-18 PAUCARPATA
**Atención** : BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Proyecto** : --

### *PROTOCOLO DE MUESTREO*

**Muestreo realizado por** : Cliente BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME
**Registro de muestreo** : Cadena de custodia N°: 017-26
**Plan de muestreo** : Muestreado por el cliente
**Procedimiento Aplicado** : Muestreado por el cliente

**Fecha de recepción** : 27/01/2026
**Fecha de ensayo** : 27/01/2026
**Nro de muestras** : 1

| Cod. Interno L.A.S. | (c) Nombre de muestra | (c) Matriz de la muestra | (c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart. | (c) Punto de muestreo y/o coordenadas | (c) Fecha de inicio de muestreo | (c) Hora de inicio de muestreo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| AG26000036 | SALCEDO | Agua Natural - Subterránea - Agua de Manantial | SALCEDO - PUNO - PUNO | -15.874743 , -69.995016 | 25/01/2026 | 10:50 |

**Condiciones de recepción de la muestra**
Contenedor no refrigerado

### *RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO*

| Código Interno L.A.S. | Nombre de Muestra | *3016 | *3030 | *3033 | *3125 | *818 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $NO_3^-$ | pH (Compensado a 25°C) | $SO_4^{=}$ | C E (Compensado a 25°C) | Carbonatos ˙CaCO3 |
| | | mg/L | Unidad de pH | mg/L | µS/cm | mg $CaCO_3$/L |
| AG26000036 | SALCEDO | 11,86 | 7,621 | 90,8 | 731,3 | [a]<1 |

### *MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS*

| Código | Título | Rango de método analítico |
|---|---|---|
| *3016 | Método de Ensayo para nitrógeno como nitrato por fotometría en agua | [= 0.0034 - 30] mg/L |
| *3030 | pH. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. pH Value. Electrometric Method. - pH | [0 - 14] Unidad de pH |
| *3033 | Sulfatos. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO4(-)-E, 24th Ed. Sulfate. Turbidimetric Method | [10 - 4000] mg/L |
| *3125 | Conductividad Eléctrica. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24th Ed. Conductivity. Laboratory Method. - C E | [= 0.01 - 24800] µS/cm |
| *818 | Carbonatos (CaCO3). SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 24th Ed. Alkalinity. Titration method. | [= 2.5 - 1000] mg CaCO3/L |

[a] : Límite detección [b] : Límite de cuantificación

### *RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO*

| Código Interno L.A.S. | Nombre de Muestra | 823 |
|---|---|---|
| | | $Cl^-$ |
| | | mg/L |
| AG26000036 | SALCEDO | 51,4 |

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico CIP 19474

**Anexo 15**

*Ficha técnica del acero corrugado*

# Fierro Corrugado

## ASTM A706 - GRADO 60 / NTP 339.186 - GRADO 420

**DENOMINACIÓN:**
Fierro Corrugado ASTM A706-Grado 60 / NTP 339.186 Grado 420.

**DESCRIPCIÓN:**
Barras de acero microaleado de alta ductilidad, rectas de sección circular, con resaltes Hi-bond de alta adherencia con el concreto.

**USOS:**
El acero A706 se usa como refuerzo para concreto armado, en estructuras sismorresistentes - según lo especificado en el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú (Norma E.060) y el Reglamento del American Concrete Institute (ACI 318, sección 21) - y donde se requiera el soldado de las estructuras.

**NORMAS TÉCNICAS:**
- ASTM A706/A706M - 16 Grado 60
- NTP 339.186:2018 Grado 420
- NTE E.060:2009 CONCRETO ARMADO punto 21.3.3

**PRESENTACIÓN:**
Se produce en barras de 9 m y 12 m de longitud en los siguientes diámetros: 6mm, 8mm, 3/8", 12mm, 1/2", 5/8", 3/4", 1", 1 1/4", 1 3/8". Previo acuerdo, se puede producir en otros diámetros y longitudes requeridos por los clientes. Se suministra en paquetes de 2 toneladas, en varillas y como Acero Dimensionado.

**DIMENSIONES Y PESOS NOMINALES:**

| DIÁMETRO DE BARRA | | SECCIÓN ($mm^2$) | PERÍMETRO (mm) | PESO NOMINAL (kg/m) |
|---|---|---|---|---|
| Pulg. | mm | | | |
| - | 6.0 | 28 | 18.8 | 0.222 |
| - | 8.0 | 50 | 25.1 | 0.395 |
| 3/8" | 9.52 | 71 | 29.9 | 0.560 |
| - | 12.0 | 113 | 37.7 | 0.888 |
| 1/2" | 12.7 | 129 | 39.9 | 0.994 |
| 5/8" | 15.9 | 199 | 49.9 | 1.552 |
| 3/4" | 19.1 | 284 | 59.8 | 2.235 |
| 1" | 25.4 | 510 | 79.8 | 3.973 |
| 1 1/4" | 32.3 | 819 | 101.3 | 6.404 |
| 1 3/8" | 35.8 | 1006 | 112.5 | 7.907 |

**COMPOSICIÓN QUÍMICA EN LA CUCHARA (%):**
Por su bajo contenido de carbono, es un material con mayor soldabilidad que las barras de construcción ASTM A615 Grado 60 // NTP341.031:2018 - Grado 420.

C = 0.30% máx. Mn = 1.50% máx. Si = 0.50% máx.
P = 0.035% máx. S = 0.045% máx.
Carbono Equivalente (CE) = 0.55% máx., para garantizar buena soldabilidad. Es calculado con la siguiente fórmula:

$$CE = \%C + \%Mn/6 + \%Cu/40 + \%Ni/20 + \%Cr/10 - \%Mo/50 - \%V/10$$

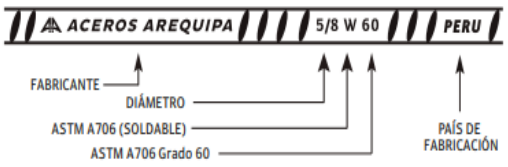
**PROPIEDADES MECÁNICAS:**

| | |
|---|---|
| Límite de Fluencia (fy) | = 420 MPa - 540 MPa |
| Resistencia a la Tracción (R) | = 550 MPa, mínimo. |
| Relación R/fy | ≥ 1.25 |
| Alargamiento en 200 mm: | |
| Diámetros: | |
| 6mm, 8mm, 3/8", 12 mm, 1/2", 5/8" y 3/4" | = 14% mínimo. |
| 1", 1 1/4" y 1 3/8" | = 12% mínimo. |
| Doblado a 180° | = Bueno en todos los diámetros. |

Los diámetros de doblado especificados por las Normas Técnicas para la pueba de doblado son:

| DIÁMETRO DE BARRA (d) mm | DIÁMETRO DOBLADO | mm |
|---|---|---|
| 6mm | 3d | 18 |
| 8mm | 3d | 24 |
| 3/8" | 3d | 28.6 |
| 12mm | 3d | 36 |
| 1/2" | 3d | 38.1 |
| 5/8" | 3d | 47.6 |
| 3/4" | 5d | 95.3 |
| 1" | 5d | 127.0 |
| 1.1/4" | 7d | 222.3 |
| 1.3/8" | 7d | 244.5 |

**IDENTIFICACIÓN:**
Los fierros son identificados por marcas de laminación en alto relieve que indican el fabricante, el diámetro, la norma, el grado del acero y el país de fabricación. Se le reconoce por la letra "W" (soldable).




QCQA01 - F119 / 06 / JUN 19

**Anexo 16**

*Ficha técnica del acero galvanizado*

ASTM International ha traducido la norma A 767/A 767M, pero reconoce que la traducción ha atravesado un proceso de revisión limitado. Esta traducción es sólo de referencia. Sólo la versión inglesa tal como la publicada y sujeta a los derechos de autor de la ASTM constituye la versión oficial. Toda reproducción de la presente traducción sin la autorización escrita de la ASTM está estrictamente prohibida de acuerdo a las leyes americanas e internacionales relativas a los derechos de autor.
ASTM International has translated A 767/A 767M, but recognizes that the translation has gone through a limited review process. This translation is for reference purposes only. Only the English edition as published and copyrighted by ASTM shall be considered the official version. Reproduction of this translation, without ASTM's written permission, is strictly forbidden under U.S. and international copyright laws.

**Designación: A 767/A 767M–09**

# Especificación normalizada para

# Barras de acero cincadas (galvanizadas) para refuerzo de concreto[1]

Esta norma ha sido publicada bajo la designación fija A 767/A 767M; el número inmediatamente siguiente a la designación indica el año de adopción inicial o, en caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última reaprobación. Una épsilon (ε) como superíndice indica una modificación editorial desde la última revisión o reaprobación.

*Esta norma ha sido aprobada para su uso por agencias del Department of Defense.*

## 1. Alcance*

1.1 Esta especificación trata sobre las barras de refuerzo de acero con cincados protectores aplicados por inmersión de las barras de refuerzo apropiadamente preparadas dentro de un baño de cinc derretido.

1.2 Esta especificación es aplicable para órdenes de pedido ya sea en unidades pulgada-libra (como especificación A 767) o en unidades SI (como especificación A 767M).

1.3 Los valores dados en unidades SI o en unidades pulgada-libra son considerados como los estándares. Dentro del texto, las unidades pulgada-libra figuran entre corchetes. Los valores dados en cada sistema no son exactamente equivalentes. Por lo tanto, cada sistema se debe usar independientemente del otro. La combinación de valores de los dos sistemas puede resultar en una no conformidad con esta especificación.

**Anexo 17**

*Diseño de mezcla del concreto fc = 210 Kg/cm2*

GEOTECNIA INGENIERIA SCRL

**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y CONCRETO**

Jr. DANTE NAVA Nº 119-A Cel.950-031842 - 951-993616 RPM*0209187

E-mail.moisesaraca@hotmail.com

## DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO
## f'c. = 210 Kg./cm2

**OBRA** : MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE FORMACION ACADEMICA EN LA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA Y METALURGICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**UBICACIÓN** : DISTRITO PUNO - PROVINCIA PUNO - REGION PUNO **FECHA** 02 DE NOVIEMBRE 2021

**SOLICITANTE** : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO **ING. RESPONSABLE . M.A.CH.**

**CANTERA** : RIO CUTIMBO **TECNICO** B.H.Y.

**MUESTRA** : AGREGADO

### CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS AGREGADOS

| DESCRIPCION | | UNIDAD | CEMENTO | AGREGADOS | |
|---|---|---|---|---|---|
| PROCEDENCIA | VILUYO | | TIPO IP | FINO | GRUESO |
| TAMAÑO MAXIMO NOMINAL | | Pulg. | | N°4 | 1 " |
| PESO UNITARIO SUELTO | | Kg/m3 | | 1376 | 1455 |
| PESO UNITARIO COMPACTO | | Kg/m3 | | 1596 | 1575 |
| PESO ESPECIFICO | | gr./cc | 2.99 | 2.48 | 2.58 |
| ABSORCION | | % | | 2.11 | 1.87 |
| MODULO DE FINURA | | | | 2.99 | 7.19 |
| CONTENIDO DE HUMEDAD | | % | | 3.75 | 2.10 |

### DOSIFICACION

55

| F'c | SLUMP | CONTENIDO | RELACION | AIRE | CANTIDAD DE CEMNTO | | MODULO DE FINURA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| f'cr. Kg/cm2 | Pulg. | DE AGUA Lt. | A/C | (%) | Kg./m3 | bolsas | DEL AGR.GRUESO |
| --- | 3"-4" | 195 | 0.49 | 1.50 | 402 | 9.46 | 5.1 |

### DOSIFICACION EN PESO

| DESCRIPCION | PESO ESTIMADO SECO/m3 | VOLUMEN ABSOLUTO m3 | DISEÑO UNIT.SECO | DISEÑO EN OBRA | DISEÑO UNIT. EN OBRA |
|---|---|---|---|---|---|
| CEMENTO | 402.06 | 0.1345 | 1.00 | 402 | 1.00 |
| AGREGADO FINO | 763.79 | 0.3081 | 1.90 | 792 | 1.97 |
| AGREGADO GRUESO | 897.10 | 0.3474 | 2.23 | 916 | 2.28 |
| AGUA (Ltros.) | 195.00 | 0.1950 | 0.49 | 180 | 0.45 |
| AIRE | 1.50 | 0.0150 | | | |

### DOSIFICACION EN OBRA

| DESCRIPCION | BOLSA/C=42.5 Kg. | PROPORCION | M3 (metro cubico) |
|---|---|---|---|
| CEMENTO | 42.50 | 1.00 | 0.13 |
| AGREGADO FINO | 83.76 | 2.16 | 0.32 |
| AGREGADO GRUESO | 96.82 | 2.36 | 0.35 |
| AGUA | 19.07 Ltros. | 19.07 Ltros. | 0.20 |

**OBSERVACION :** * EL AGUA ES VARIABLE SE DEBE CONTROLAR EN OBRA

**Anexo 18**

*Diseño de mezcla del concreto fc = 175 Kg/cm2*

GEOTECNIA INGENIERIA SCRL

**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y CONCRETO**
Jr. DANTE NAVA Nº 119-A Cel.950-031842 - 951-993616 RPM*0209187
E-mail.moisesaraca@hotmail.com

## DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO
## f'c. = 175 Kg./cm2

**OBRA** : MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE FORMACION ACADEMICA EN LA FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA Y METALURGICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**UBICACIÓN** : DISTRITO PUNO - PROVINCIA PUNO - REGION PUNO **FECHA** 02 DE NOVIEMBRE 2021

**SOLICITANTE** : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO **ING. RESPONSABLE . M.A.CH.**

**CANTERA** : RIO CUTIMBO **TECNICO** B.H.Y.

**MUESTRA** : AGREGADO

### CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS AGREGADOS

| DESCRIPCION | | UNIDAD | CEMENTO | AGREGADOS | |
|---|---|---|---|---|---|
| PROCEDENCIA | RIO MAURE | | TIPO IP | FINO | GRUESO |
| TAMAÑO MAXIMO NOMINAL | | Pulg. | | N°4 | 1" |
| PESO UNITARIO SUELTO | | Kg/m3 | | 1376 | 1455 |
| PESO UNITARIO COMPACTA | | Kg/m3 | | 1596 | 1575 |
| PESO ESPECIFICO | | gr./cc | 2.99 | 2.48 | 2.58 |
| ABSORCION | | % | | 2.11 | 1.87 |
| MODULO DE FINURA | | | | 2.99 | 7.19 |
| CONTENIDO DE HUMEDAD | | % | | 3.75 | 2.10 |

604

### DOSIFICACION

55

| F'c | SLUMP | CONTENIDO | 0 | AIRE | CANTIDAD DE CEMNTO | | MODULO DE FINURA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| f'cr. Kg/cm2 | Pulg. | DE AGUA Lt. | 5 | (%) | Kg./m3 | bolsas | DEL AGR.GRUESO |
| --- | 3"-4" | 195 | 0.56 | 1.50 | 349 | 8.22 | 5.1 |

### DOSIFICACION EN PESO

| DESCRIPCION | PESO ESTIMADO SECO/m3 | VOLUMEN ABSOLUTO m3 | DISEÑO UNIT.SECO | DISEÑO EN OBRA | DISEÑO UNIT. EN OBRA |
|---|---|---|---|---|---|
| CEMENTO | 349.46 | 0.1169 | 1.00 | 349 | 1.00 |
| AGREGADO FINO | 784.29 | 0.3164 | 2.24 | 814 | 2.33 |
| AGREGADO GRUESO | 921.18 | 0.3568 | 2.64 | 941 | 2.69 |
| AGUA (Ltros.) | 195.00 | 0.1950 | 0.56 | 180 | 0.52 |
| AIRE | 1.50 | 0.0150 | | | |

0.673123

### DOSIFICACION EN OBRA

| DESCRIPCION | BOLSA/C= 42.5 Kg. | PROPORCION | M3 (metro cubico) |
|---|---|---|---|
| CEMENTO | 42.50 | 1.00 | 0.12 |
| AGREGADO FINO | 98.96 | 2.55 | 0.33 |
| AGREGADO GRUESO | 114.38 | 2.79 | 0.36 |
| AGUA | 21.89 Ltros. | 21.89 Ltros. | 0.20 |

**OBSERVACION :** * EL AGUA ES VARIABLE SE DEBE CONTROLAR EN OBRA

**Anexo 19**

*Cemento rumi utilizado en la experimentación*



**Anexo 20**

*Potenciostato/Galvanostato instalado en la experimentación*



**Anexo 21**

*Comprobante de servicio de galvanizado en caliente del acero corrugado*

**GALVASUR**
**CHOQQUEMAMANI CCAHUAYA CIRILO**
CAL. EEUU MZA. C LOTE. 18 A.V. APTASA PQUE INDUST. RIO SECO 2 CUADRAS INKABOR
CERRO COLORADO - AREQUIPA - AREQUIPA

**BOLETA DE VENTA ELECTRONICA**
**RUC: 10242914916**
**EB01-8**

Fecha de Vencimiento :
Fecha de Emisión : **15/09/2025**
Señor(es) : **BENJAMIN MANUEL CORDOVA JAIME**
DNI : **73022739**
Tipo de Moneda : **SOLES**
Observación :

| Cantidad | Unidad Medida | Descripción | Valor Unitario(*) | Descuento(*) | Importe de Venta(**) | ICBPER |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 13.65 | KILOGRAMO | SERVICIO DE GALVANIZADO EN CALIENTE DE BARRA CORRUGADA DE 5/8 X 90CM=4 UNI, 3/4 X 90 CM =4UN | 8.5056 | 0.00 | 136.9996992 | 0.00 |

Otros Cargos : S/ 0.00
Otros Tributos : S/0.00
ICBPER : S/ 0.00
Importe Total : S/137.00

**SON: CIENTO TREINTA Y SIETE Y 00/100 SOLES**

(*) Sin impuestos.
(**) Incluye impuestos, de ser Op. Gravada.

| | |
|---|---|
| Op. Gravada : | S/ 116.10 |
| Op. Exonerada : | S/ 0.00 |
| Op. Inafecta : | S/ 0.00 |
| ISC : | S/ 0.00 |
| IGV : | S/ 20.90 |
| ICBPER : | S/ 0.00 |
| Otros Cargos : | S/ 0.00 |
| Otros Tributos : | S/ 0.00 |
| Monto de Redondeo : | S/ 0.00 |
| **Importe Total :** | **S/ 137.00** |

*Esta es una representación impresa de la Boleta de Venta Electrónica, generada en el Sistema de la SUNAT. El Emisor Electrónico puede verificarla utilizando su clave SOL, el Adquirente o Usuario puede consultar su validez en SUNAT Virtual: www.sunat.gob.pe, en Opciones sin Clave SOL/ Consulta de Validez del CPE.*

**Anexo 22**

*Datos experimentales de la corrosión del acero corrugado para la construcción de las curvas de polarización, reacción catódica FIGIM UNA.*

| ***CORROSION DEL ACERO CON AGUA SUBTERRANEA, ZONA FIGIM-UNA*** | |
|---|---|
| **Potencial Aplicado (V)** | **Densidad de Corriente (mA/cm2)** |
| -0.543 | 0.041 |
| -0.542 | 0.037 |
| -0.541 | 0.034 |
| -0.540 | 0.032 |
| -0.539 | 0.030 |
| -0.538 | 0.029 |
| -0.537 | 0.028 |
| -0.536 | 0.027 |
| -0.535 | 0.026 |
| -0.534 | 0.025 |
| -0.533 | 0.025 |
| -0.532 | 0.024 |
| -0.531 | 0.024 |
| -0.529 | 0.023 |
| -0.528 | 0.022 |
| -0.527 | 0.022 |
| -0.526 | 0.022 |
| -0.525 | 0.021 |
| -0.524 | 0.021 |
| -0.523 | 0.020 |
| -0.522 | 0.020 |
| -0.521 | 0.020 |
| -0.520 | 0.019 |
| -0.519 | 0.019 |
| -0.518 | 0.019 |
| -0.517 | 0.018 |
| -0.516 | 0.018 |
| -0.515 | 0.018 |

| Potencial Aplicado (V) | Densidad de Corriente (mA/cm2) |
|---|---|
| -0.513 | 0.017 |
| -0.512 | 0.017 |
| -0.511 | 0.017 |
| -0.510 | 0.017 |
| -0.509 | 0.016 |
| -0.508 | 0.016 |
| -0.507 | 0.016 |
| -0.506 | 0.016 |
| -0.505 | 0.015 |
| -0.504 | 0.015 |
| -0.503 | 0.015 |
| -0.502 | 0.015 |
| -0.501 | 0.014 |
| -0.500 | 0.014 |
| -0.499 | 0.014 |
| -0.497 | 0.014 |
| -0.496 | 0.013 |
| -0.495 | 0.013 |
| -0.494 | 0.013 |
| -0.493 | 0.013 |
| -0.492 | 0.013 |
| -0.491 | 0.012 |
| -0.490 | 0.012 |
| -0.489 | 0.012 |
| -0.488 | 0.012 |
| -0.487 | 0.012 |
| -0.486 | 0.011 |
| -0.485 | 0.011 |
| -0.484 | 0.011 |
| -0.482 | 0.011 |
| -0.481 | 0.011 |
| -0.480 | 0.010 |
| -0.479 | 0.010 |

| Potencial Aplicado (V) | Densidad de Corriente (mA/cm2) |
|---|---|
| -0.478 | 0.010 |
| -0.477 | 0.010 |
| -0.476 | 0.009 |
| -0.475 | 0.009 |
| -0.474 | 0.009 |
| -0.473 | 0.009 |
| -0.472 | 0.009 |
| -0.471 | 0.008 |
| -0.470 | 0.008 |
| -0.469 | 0.008 |
| -0.468 | 0.008 |
| -0.466 | 0.007 |
| -0.465 | 0.007 |
| -0.464 | 0.007 |
| -0.463 | 0.007 |
| -0.462 | 0.006 |
| -0.461 | 0.006 |
| -0.460 | 0.006 |
| -0.459 | 0.006 |
| -0.458 | 0.005 |
| -0.457 | 0.005 |
| -0.456 | 0.005 |
| -0.455 | 0.004 |
| -0.454 | 0.004 |
| -0.453 | 0.004 |
| -0.452 | 0.003 |
| -0.450 | 0.003 |
| -0.449 | 0.003 |
| -0.448 | 0.002 |
| -0.447 | 0.002 |
| -0.446 | 0.002 |
| -0.445 | 0.001 |
| -0.444 | 0.001 |

| Potencial Aplicado (V) | Densidad de Corriente (mA/cm2) |
|---|---|
| -0.443 | 0.001 |
| -0.442 | 0.000 |
| -0.441 | 0.000 |
| -0.440 | 0.001 |
| -0.439 | 0.001 |
| -0.438 | 0.002 |
| -0.437 | 0.002 |
| -0.435 | 0.003 |
| -0.434 | 0.003 |
| -0.433 | 0.004 |
| -0.432 | 0.004 |
| -0.431 | 0.005 |
| -0.430 | 0.005 |
| -0.429 | 0.006 |
| -0.428 | 0.006 |
| -0.427 | 0.007 |
| -0.426 | 0.008 |
| -0.425 | 0.008 |
| -0.424 | 0.009 |
| -0.423 | 0.009 |
| -0.422 | 0.010 |
| -0.421 | 0.011 |
| -0.419 | 0.011 |
| -0.418 | 0.012 |
| -0.417 | 0.013 |
| -0.416 | 0.014 |
| -0.415 | 0.014 |
| -0.414 | 0.015 |
| -0.413 | 0.016 |
| -0.412 | 0.017 |
| -0.411 | 0.017 |
| -0.410 | 0.018 |
| -0.409 | 0.019 |

| Potencial Aplicado (V) | Densidad de Corriente (mA/cm2) |
|---|---|
| -0.408 | 0.020 |
| -0.407 | 0.021 |
| -0.406 | 0.022 |
| -0.405 | 0.023 |
| -0.403 | 0.024 |
| -0.402 | 0.024 |
| -0.401 | 0.025 |
| -0.400 | 0.026 |
| -0.399 | 0.027 |
| -0.398 | 0.028 |
| -0.397 | 0.029 |
| -0.396 | 0.030 |
| -0.395 | 0.032 |
| -0.394 | 0.033 |
| -0.393 | 0.034 |
| -0.392 | 0.035 |
| -0.391 | 0.036 |
| -0.390 | 0.037 |
| -0.388 | 0.038 |
| -0.387 | 0.039 |
| -0.386 | 0.041 |
| -0.385 | 0.042 |
| -0.384 | 0.043 |
| -0.383 | 0.044 |
| -0.382 | 0.046 |
| -0.381 | 0.047 |
| -0.380 | 0.048 |
| -0.379 | 0.050 |
| -0.378 | 0.051 |
| -0.377 | 0.053 |
| -0.376 | 0.054 |
| -0.375 | 0.055 |
| -0.374 | 0.057 |

| Potencial Aplicado (V) | Densidad de Corriente (mA/cm2) |
|---|---|
| -0.372 | 0.058 |
| -0.371 | 0.060 |
| -0.370 | 0.061 |
| -0.369 | 0.063 |
| -0.368 | 0.064 |
| -0.367 | 0.066 |
| -0.366 | 0.068 |
| -0.365 | 0.069 |
| -0.364 | 0.071 |
| -0.363 | 0.073 |
| -0.362 | 0.074 |
| -0.361 | 0.076 |
| -0.360 | 0.078 |
| -0.359 | 0.079 |
| -0.358 | 0.081 |
| -0.356 | 0.083 |
| -0.355 | 0.085 |
| -0.354 | 0.087 |
| -0.353 | 0.089 |
| -0.352 | 0.091 |
| -0.351 | 0.093 |
| -0.350 | 0.095 |
| -0.349 | 0.097 |
| -0.348 | 0.099 |
| -0.347 | 0.101 |
| -0.346 | 0.103 |
| -0.345 | 0.106 |
| -0.344 | 0.108 |