

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Evaluación de la durabilidad del hormigón armado en tres estructuras en
Manta posterior al sismo del 2016 con ensayos no destructivos”

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Máster en Estructuras Civiles Sismorresistentes

Presentado por:

Miguel Ángel Balcázar Balcázar

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, por el apoyo constante que me han brindado a lo largo de mi formación personal y académica. Su esfuerzo, comprensión y confianza han sido fundamentales para alcanzar este objetivo. Cada logro es reflejo del sacrificio, la guía y los valores que me han inculcado.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), por abrirme las puertas a una formación académica de calidad y por brindarme los conocimientos necesarios para el desarrollo del presente trabajo. Destaco su compromiso con la excelencia, la investigación y los altos estándares en la formación de profesionales, los cuales han contribuido de manera significativa a mi crecimiento académico y personal.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*nombre de los participantes*) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

.....
Ing. Miguel Ángel Balcázar Balcázar

EVALUADORES

.....
M.Sc Nadia Quijano Arteaga

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
M.Sc Samantha Hidalgo Astudillo

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
PhD. Juan Carlos Guerra Mera

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El proyecto evalúa la durabilidad del hormigón armado en tres estructuras de Manta, en contexto post-sismo del 16 de abril de 2016 y exposición al ambiente costero. El objetivo es diagnosticar la condición del material y estimar indirectamente el riesgo de corrosión del acero para orientar mantenimiento; se plantea como hipótesis que menor distancia a la costa y mayor edad se asocian con indicadores menos favorables, justificándose por la necesidad de diagnósticos no invasivos en edificaciones en servicio. Se seleccionaron tres casos (E-1 a 0.5 km, E-2 a 1 km y E-3 a 4 km de la línea costera), se definieron puntos en vigas y columnas mediante inspección visual y se aplicaron ensayos no destructivos: esclerometría (R_c), velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistividad eléctrica superficial (Wenner); además, se estimó la intensidad de corriente de corrosión (I_c) y se ejecutó análisis estadístico comparativo y multivariado. Los resultados indicaron que E-1 registró VPU $<3,3$ km/s, $R_s <10$ $k\Omega \cdot cm$ e $I_c >1$ $\mu A/cm^2$, con mayor afectación en columnas. En E-2 y E-3 se obtuvieron R_c y VPU mayores y baja variabilidad, aunque I_c permaneció >1 $\mu A/cm^2$, concentrándose en vigas en E-2 y en columnas en E-3; el modelo identificó a R_s y VPU como variables influyentes sobre I_c ($p < 0,05$). Se concluye que la combinación de END y análisis estadístico permite un diagnóstico consistente de durabilidad y riesgo de corrosión, y prioriza inspecciones y mantenimiento preventivo en elementos críticos y define criterios para seguimiento periódico en ambiente marino.

Palabras clave: Durabilidad; Hormigón armado; Resistividad; Pulso ultrasónico; Corrosión.

ABSTRACT

This project assesses the durability of reinforced concrete in three in-service residential buildings in Manta, Ecuador, considering post-earthquake conditions (16 April 2016) and different levels of coastal exposure. The objective is to characterize the current condition of concrete and indirectly appraise reinforcement corrosion risk to prioritize preventive maintenance; it is hypothesized that higher marine exposure is associated with less favorable durability indicators. The work is justified because it uses non-invasive techniques applicable to occupied buildings. A visual survey was used to define representative points on beams and columns, and non-destructive tests were applied: rebound hammer testing to estimate compressive strength (R_c), ultrasonic pulse velocity (UPV) to evaluate internal continuity, and surface electrical resistivity (Wenner) as an indicator related to ionic transport; corrosion current density (I_c) was also computed and classified. Data processing included descriptive comparison, analysis of variance, and multiple linear regression with I_c as the dependent variable and R_s –UPV as predictors. Results showed that the most exposed structure had UPV < 3.3 km/s and R_s < 10 k Ω ·cm, together with I_c > 1 μ A/cm², indicating conditions favorable to intense atmospheric corrosion, with higher relative severity in columns. The other structures exhibited higher R_c and UPV with low variability, although I_c remained > 1 μ A/cm² and the most affected element type differed between cases. Overall, the combined END approach provides a consistent diagnosis of durability and corrosion risk, and decreasing R_s and UPV significantly predicts increasing I_c (p < 0.05).

Keywords: Durability; Reinforced concrete; Surface resistivity; Ultrasonic pulse velocity; Corrosion.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| EVALUADORES..... | 5 |
| RESUMEN..... | 6 |
| <i>ABSTRACT</i> | 7 |
| ÍNDICE GENERAL | 8 |
| ABREVIATURAS..... | 11 |
| SIMBOLOGÍA | 12 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 13 |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 14 |
| CAPÍTULO 1..... | 15 |
| Introducción..... | 15 |
| 1.1 Introducción..... | 15 |
| 1.2 Antecedentes | 17 |
| 1.3 Localización..... | 20 |
| 1.4 Estudios previos | 22 |
| 1.5 Problemática a resolver..... | 25 |
| 1.6 Justificación..... | 27 |
| 1.7 Objetivos | 29 |
| 1.7.1 Objetivo General..... | 29 |
| 1.7.2 Objetivos Específicos..... | 30 |
| CAPÍTULO 2..... | 31 |
| Desarrollo del proyecto..... | 31 |
| 2.1 Marco conceptual | 31 |
| 2.1.1 Durabilidad del hormigón armado y vida útil en ambiente costero..... | 31 |

| | | |
|------------------------------|--|----|
| 2.1.2 | Factores que influyen en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en estructuras de hormigón armado..... | 31 |
| 2.1.3 | Ambiente costero y mecanismos de ingreso de agentes agresivos..... | 36 |
| 2.1.4 | Corrosión del acero de refuerzo: pasivación, despasivación y factores que la controlan..... | 36 |
| 2.1.5 | Alcalinidad del hormigón, pasividad del acero y ruptura de pasividad ... | 38 |
| 2.1.6 | Mecanismos de deterioro relevantes para el estudio..... | 40 |
| 2.1.7 | Condición post-sismo 2016 y durabilidad en estructuras operativas | 43 |
| 2.1.8 | Ensayos no destructivos aplicados a durabilidad..... | 44 |
| 2.1.9 | Integración conceptual: lectura conjunta UPV–resistividad–condiciones de servicio | 47 |
| 2.2 | Marco metodológico | 49 |
| 2.2.1 | Enfoque, tipo y diseño de investigación..... | 49 |
| 2.2.2 | Enfoque, tipo y diseño de investigación..... | 49 |
| 2.2.3 | Área de estudio..... | 49 |
| 2.2.4 | Selección del elemento representativo | 50 |
| 2.2.5 | Ensayo 1: Resistividad eléctrica aparente (ρ)..... | 51 |
| 2.2.6 | Ensayo 2: Pulso ultrasónico (UPV)..... | 54 |
| 2.2.7 | Procesamiento de datos e integración resistividad–UPV para concluir durabilidad..... | 54 |
| 2.2.8 | Inspección visual preliminar y selección de puntos de medición | 55 |
| CAPÍTULO 3..... | | 61 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | | 61 |
| 3.1 | Resultados | 61 |
| 3.2 | Análisis de resultados..... | 69 |
| 3.2.1 | DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS..... | 70 |
| CAPÍTULO 4..... | | 75 |

Conclusiones Y Recomendaciones 75

 Conclusiones..... 75

 Recomendaciones..... 76

BIBLIOGRAFÍA..... 77

PLANOS Y ANEXOS..... 79

ABREVIATURAS

| | |
|------------|--|
| ACI: | American Concrete Institute |
| ASTM: | American Society for Testing and Materials |
| ISO: | International Organization for Standardization |
| NACE: | National Association of Corrosion Engineer(s) |
| ESPOL: | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| END: | Ensayos No Destructivos |
| UPV / VPU: | Ultrasonic Pulse Velocity / Velocidad de Pulso Ultrasónico |
| D.S.: | Desviación estándar |
| C.V. (%): | Coefficiente de variación |
| Dif. Sig.: | Diferencia significativa |
| P.E.: | Parámetros estadísticos |
| Rs: | Resistividad eléctrica superficial del hormigón ($k\Omega \cdot cm$) |

SIMBOLOGÍA

| | |
|---------------------------|--|
| ρ | Resistividad eléctrica (aparente) ($k\Omega \cdot \text{cm}$) |
| i_c | Densidad de corriente de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) |
| m | Metro |
| cm | Centímetro |
| mm | Milímetro |
| km | Kilómetro |
| Ω | Ohmio (unidad de resistencia eléctrica) |
| $k\Omega$ | Kilo-ohmio ($10^3\Omega$) |
| $k\Omega \cdot \text{cm}$ | Kilo-ohmio por centímetro |
| m/s | Metro por segundo (unidad de velocidad) |
| km/s | Kilómetro por segundo (unidad de velocidad) |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Mapa de localización de E1–E3 en Manta (Google Earth 2025)..... | 21 |
| Ilustración 2. Deterioro del hormigón por corrosión del acero (Romo Martínez, 2020).. | 37 |
| Ilustración 3. Mecanismo de corrosión por picaduras (pitting) inducida por cloruros en acero de refuerzo embebido en hormigón. (Rivera Vélez, 2024). | 39 |
| Ilustración 4. Manifestaciones típicas de corrosión inducida por cloruros en elemento de hormigón armado (ambiente marino–costero): manchas de óxido y deterioro del recubrimiento. (Magalhães, 2024). | 41 |
| Ilustración 5. Evidencia de corrosión del refuerzo asociada a carbonatación y pérdida de alcalinidad del hormigón (ejemplo fotográfico). Alario Catalá (2014)..... | 42 |
| Ilustración 6. Fisuras y discontinuidades en elemento de hormigón armado como rutas preferenciales de ingreso de agentes agresivos. (Moreno, 2018). | 43 |
| Ilustración 7. Resistividad eléctrica en elementos de hormigón armado | 46 |
| Ilustración 8. Pulso ultrasónico (UPV) en elementos de hormigón armado | 47 |
| Ilustración 9. Criterios de velocidad de pulso (UPV) para la clasificación de la calidad del hormigón. (Bureau of Indian Standards, 2019) | 55 |
| Ilustración 10. Comportamiento de la resistencia a la compresión (R_c) a), y la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) b)..... | 63 |
| Ilustración 11. Comportamiento de la resistividad (R_s) a), y la intensidad de corriente de corrosión (I_c) b). | 64 |
| Ilustración 12. Comportamiento de la resistencia a la compresión (R_c) a), y la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) b)..... | 65 |
| Ilustración 13. Comportamiento de la resistividad (R_s) a), y la intensidad de corriente de corrosión (I_c) b). | 65 |
| Ilustración 14. Comportamiento de la resistencia a la compresión (R_c) a), y la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) b)..... | 67 |
| Ilustración 15. Comportamiento de la resistividad (R_s) a), y la intensidad de corriente de corrosión (I_c) b). | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Caracterización general de las estructuras seleccionadas | 21 |
| Tabla 2: Plan de puntos por estructura (mínimo 4 puntos: vigas y columnas)..... | 24 |
| Tabla 3. Factores que influyen en la corrosión del acero de refuerzo en hormigón armado | 34 |
| Tabla 4. Plan de puntos (modelo para las 3 estructuras) | 51 |
| Tabla 5. Intervalos de clasificación de I_c ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) y nivel de corrosión..... | 53 |
| Tabla 6. Valores promedios (P), desviaciones estándar ($D.S$) y coeficiente de variación ($C.V$) para cada parámetro medido en los elementos estructurales. Análisis de varianza (F y p) | 62 |
| Tabla 7. Regresiones lineales múltiples ajustadas para cada elemento estructural.. | 63 |
| Tabla 8. Valores promedios (P), desviaciones estándar ($D.S$) y coeficiente de variación ($C.V$) para cada parámetro medido en los elementos estructurales. Análisis de varianza (F y p) | 65 |
| Tabla 9. Análisis multivariado en los elementos estructurales..... | 66 |
| Tabla 10. Valores promedios (P), desviaciones estándar ($D.S$) y coeficiente de variación ($C.V$) para cada parámetro medido en los elementos estructurales. Análisis de varianza (F y p) | 68 |
| Tabla 11. Regresiones lineales múltiples ajustadas para cada elemento estructural | 68 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El ambiente marino está conformado por varios factores que incrementa el deterioro de las estructuras que se ubican y están expuestas dentro de esta atmósfera costera. La ciudad de Manta, ubicada en la provincia de Manabí-Ecuador, ha desarrollado su potencial constructivo en una zona de nivel extremo de agresividad corrosiva (CX), lo que incrementa el deterioro prematuro de los materiales de construcción, incluyendo las estructuras de hormigón armado. En este tipo de ambiente costero, la presencia de humedad, aerosoles marinos y sales tienen a reducir la vida útil del material, especialmente cuando el hormigón presenta una red porosa conectada o discontinuidades que facilitan el transporte de agentes agresivos. En el contexto ecuatoriano, varias investigaciones han advertido que las condiciones atmosféricas costeras de Manabí, requieren una atención específica al desempeño por durabilidad del hormigón y a los mecanismos de deterioro más probables en servicio. (Guerra Mera, 2023).

En estructuras de hormigón armado, la durabilidad se entiende como la capacidad de mantener un desempeño aceptable durante la vida útil prevista frente a acciones ambientales y de servicio. En ambientes marinos o marino-industriales, la agresividad atmosférica puede alcanzar categorías elevadas o extremas, lo cual refuerza la pertinencia de evaluar condiciones de exposición y su relación con el estado del material a escala de estructuras reales. (International Organization for Standardization [ISO], 2012).

Adicionalmente, el análisis de durabilidad en estructuras ubicadas en la ciudad de Manta adquiere relevancia al considerar el antecedente del sismo del 16 de abril de 2016, el cual pudo inducir fisuración o microdaños en elementos estructurales, incrementando la permeabilidad efectiva y la variabilidad del hormigón en obra. Este antecedente se incorpora como contexto post-evento, sin que el presente estudio tenga como propósito un análisis sísmico de desempeño o capacidad

resistente. En consecuencia, el interés investigativo se centra en la durabilidad de las estructuras y su degradación en el tiempo bajo exposición costera.

La evidencia regional de las edificaciones emplazadas y evaluadas en el perfil costero, respalda la necesidad de realizar nuevos estudios comparativos referenciales a la línea costera. En investigaciones realizadas en Manta se han evaluado la durabilidad de elementos estructurales en múltiples edificaciones ubicadas a diferentes distancias del mar, mostrando que la ubicación y el ambiente de exposición son variables relevantes para interpretar el estado del hormigón y su deficiencia al deterioro. (Pérez & Guerra, 2024). Varias investigaciones realizadas recientemente a lo largo del perfil costero de Manabí, como Crucita y Pedernales, con selección de casos a distintas distancias respecto de la costa, han reportado deterioro en estructuras de hormigón armado asociado a la corrosión atmosférica, lo que refuerza el enfoque de análisis por gradiente ambiental y calidad del material (Rincón et al., 2025).

En este marco, la presente investigación plantea la evaluación de la durabilidad del hormigón armado en tres estructuras emplazadas en la ciudad de Manta, posteriores al sismo de 2016, mediante el uso de ensayos no destructivos con énfasis en resistividad eléctrica superficial y velocidad de pulso ultrasónico (VPU), considerando como criterio comparativo la cercanía a la zona costera. La resistividad eléctrica se emplea como un indicador indirecto de la facilidad de transporte iónico y, por extensión, de la resistencia del hormigón frente a la penetración de agentes agresivos disueltos; este enfoque está respaldado por métodos estandarizados para resistividad superficial o volumétrica como aproximación rápida a la resistencia al ingreso de cloruros. (ASTM International, 2023).

Por su parte, la VPU se utiliza para caracterizar la uniformidad y calidad relativa del hormigón, así como para indicar la posible presencia de discontinuidades internas (vacíos, fisuras) o cambios de condición, aspectos que influyen en la durabilidad al modificar la conectividad de poros y la facilidad de ingreso de

humedad y sales. (ASTM International, 2023). La integración de resistividad y la VPU permite construir una interpretación más sólida. Mientras la resistividad aproxima el comportamiento asociado al transporte, la VPU aporta información sobre continuidad interna y heterogeneidad del material, variables críticas en estructuras expuestas a ambientes agresivos.

Finalmente, se reconoce que el fenómeno de corrosión del acero de refuerzo en concreto es multicausal y depende del ambiente, la calidad del hormigón y la disponibilidad de agentes agresivos; por ello, la literatura técnica resalta la importancia de caracterizar condiciones que favorecen el inicio y propagación de la corrosión en estructuras de hormigón armado. (American Concrete Institute [ACI], 2001). En concordancia con lo anterior, el alcance del estudio se limita a una evaluación orientada a durabilidad, sin incluir rediseño, refuerzo estructural ni verificación detallada de capacidad, buscando aportar una base técnica para priorizar atención, monitoreo o mantenimiento preventivo según el nivel relativo de exposición y desempeño observado en las tres estructuras seleccionadas.

1.2 Antecedentes

La durabilidad del hormigón armado constituye un eje central en la ingeniería de estructuras, especialmente en ambientes agresivos donde la humedad, las sales disueltas y los ciclos de mojado–secado aceleran mecanismos de deterioro que reducen la vida útil de los elementos y elevan los costos de mantenimiento. A nivel internacional, el estudio de la durabilidad ha impulsado el uso de indicadores no destructivos capaces de caracterizar el comportamiento del hormigón frente al transporte de agentes agresivos y la condición interna del material. En este marco, la resistividad eléctrica se ha consolidado como un parámetro de gran interés por su relación con la movilidad iónica y la facilidad con la que pueden sostenerse procesos electroquímicos; por ello, revisiones especializadas destacan su utilidad como indicador indirecto para evaluar desempeño por durabilidad y su vínculo con variables asociadas a penetración de cloruros y susceptibilidad a corrosión (Azarsa & Gupta, 2017). De manera complementaria, la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se reconoce como un ensayo no destructivo útil para evaluar uniformidad, continuidad interna y potencial presencia de

discontinuidades (vacíos o fisuración), aportando evidencia sobre la calidad relativa del hormigón, aspecto que influye en la durabilidad al modificar rutas preferenciales de ingreso de humedad y sales; investigaciones recientes continúan ampliando su aplicación como técnica de caracterización y diagnóstico en cementicios, reforzando su valor para estudios en estructuras reales (Zhang et al., 2024).

En cuanto a la estandarización, la práctica internacional incorpora guías y métodos para aplicar estas técnicas en evaluación de estructuras existentes. La norma ASTM C597, respalda la medición del pulso ultrasónico a través del hormigón como un recurso no destructivo para caracterizar variabilidad y condición interna (ASTM International, 2023). Para resistividad, existen enfoques que emplean resistividad superficial como indicación de la capacidad del hormigón para resistir el ingreso de cloruros, con amplia aceptación en la práctica y en el control de calidad por su rapidez y practicidad; por ejemplo, trabajos aplicados han discutido su uso como alternativa evaluativa frente a métodos eléctricos más tradicionales, fortaleciendo su validez como indicador operacional de desempeño por durabilidad (Tanesi, 2012). En paralelo, marcos normativos de corrosividad atmosférica permiten sustentar que, en ambientes con alta agresividad, la exposición condiciona el deterioro y, por tanto, la evaluación de durabilidad debe considerar el entorno como variable determinante (International Organization for Standardization [ISO], 2012).

A nivel nacional (Ecuador), el empleo de ensayos no destructivos se encuentra respaldado por el marco técnico de la construcción. La Norma Ecuatoriana de la Construcción reconoce el uso de técnicas no destructivas en hormigón armado, incluyendo explícitamente el pulso ultrasónico como herramientas aplicables para evaluación de condición y control, lo que legitima su aplicación en estudios de estructuras existentes dentro del contexto nacional (NEC-SE-HM, 2014). En el ámbito académico ecuatoriano se evidencia la utilización de la VPU en trabajos de titulación y documentos técnicos orientados a la caracterización del hormigón armado, discutiendo factores de influencia en la medición y criterios de

interpretación en presencia de acero de refuerzo y variaciones constructivas; estas aproximaciones aportan bases prácticas cuando el ensayo se traslada a vigas y columnas en edificaciones reales (Rosales, 2024). Sin embargo, un gran porcentaje de las investigaciones y publicaciones a escala nacional, se concentra en ensayos de laboratorio o en caracterizaciones puntuales, por lo que sigue siendo relevante fortalecer el estudio de estructuras reales bajo condiciones ambientales propias de cada región.

En el nivel local, la provincia de Manabí y particularmente el entorno urbano-costero de Manta representa un contexto crítico debido a la influencia del ambiente marino. En esta línea, se han presentado análisis que discuten el desempeño por durabilidad del hormigón en el perfil costero de Manabí y la necesidad de adoptar criterios de evaluación acordes con la agresividad del ambiente, planteando que el enfoque en durabilidad debe ser prioritario en la toma de decisiones sobre estructuras existentes en la zona (Guerra Mera, 2023). Asimismo, se han reportado estudios que abordan el deterioro asociado a corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado ubicadas en zonas costeras de Manabí, organizando la selección de casos bajo el criterio de distancia a la costa, lo cual refuerza la pertinencia del análisis por gradiente ambiental para interpretar variaciones en condición y deterioro (Guerrero et al., 2025; Rincón et al., 2025). De forma más específica, existen investigaciones desarrolladas en Manta que evaluaron la durabilidad de elementos estructurales en edificaciones ubicadas a diferentes distancias desde la línea costera, demostrando que la cercanía al mar es una variable de exposición relevante para interpretar el estado del hormigón armado en servicio (Pérez & Guerra, 2024).

A partir de esta evidencia, se identifica una necesidad clara a pesar que en Manabí, específicamente en Manta hay investigaciones relacionadas a la durabilidad y deterioro en el entorno costero, aún es limitada la evidencia publicada que plantee, de forma explícita y acotada, un diagnóstico comparativo centrado en la integración de resistividad eléctrica y pulso ultrasónico como núcleo metodológico para interpretar la durabilidad del hormigón en estructuras,

especialmente cuando se busca una lectura coherente entre la facilidad de transporte iónico y el comportamiento asociado a la humedad/sales (aproximado por resistividad) y, la continuidad interna y uniformidad del material (aproximado por VPU). Esta brecha es relevante porque ambos ensayos, considerados en conjunto, permiten una interpretación complementaria: la resistividad aporta un indicador indirecto del entorno interno del hormigón frente a procesos de transporte y condiciones favorables para deterioro; mientras que, la VPU ayuda a explicar si la variabilidad puede estar asociada a defectos internos, fisuración o heterogeneidad del material, lo cual tiene implicaciones directas sobre la permeabilidad efectiva y, por tanto, sobre la durabilidad.

Finalmente, en el caso particular de Manta, el antecedente del sismo del 16 de abril de 2016, aporta un contexto post-evento que puede asociarse a fisuración o microdaño en elementos, incrementando la variabilidad del hormigón y condicionando su exposición futura en un ambiente agresivo; sin embargo, este antecedente se incorpora únicamente como contexto, sin convertir el estudio en un análisis sísmico estructural. En consecuencia, la investigación propuesta se justifica como un aporte aplicable para evaluar tres estructuras de hormigón armado, considerando la gradiente ambiental de cercanía a la costa, por medio de ensayos no destructivos respaldados por la práctica técnica y normativa, generando insumos útiles para priorizar atención, monitoreo o mantenimiento preventivo.

1.3 Localización

La investigación se desarrolló en la ciudad de Manta, provincia de Manabí, Ecuador. El área de estudio comprende a tres edificaciones residenciales de hormigón armado (E1 - E3), que se encuentran en servicio, en el periodo posterior al terremoto del 16 de abril de 2016, y que fueron seleccionadas por su cercanía a la línea costera, en un rango aproximado entre 1 y 4 km, con el fin de priorizar condiciones de exposición asociadas a ambiente costero, la ubicación de estas estructuras se detalla en la ilustración 1.



Ilustración 1. Mapa de localización de E1–E3 en Manta (Google Earth 2025).

Tabla 1. Caracterización general de las estructuras seleccionadas.

| Código | Tipo / uso | Zona UTM | Este (m E) | Sur (m S) | Distancia aprox. a la costa (km) | Elementos a ensayar | Mínimo de puntos |
|--------|---|----------|------------|------------|----------------------------------|---------------------|------------------|
| E1 | Edificio 3 pisos (oficinas, locales y departamento) | 17 | 530926.00 | 9895012.00 | 0.5 | Vigas y columnas | 4 |
| E2 | Edificio de 3 pisos (departamento) | 17 | 530484.00 | 9894881.00 | 1.0 | Vigas y columnas | 4 |
| E3 | Casa de dos pisos | 17 | 534555.00 | 9891577.00 | 4.0 | Vigas y columnas | 4 |

La tabla 1, se presenta de forma sintética, las tres unidades de análisis consideradas en el estudio (E1 - E3), incorporando información clave para su identificación, localización y planificación del levantamiento de datos. Para cada estructura se consigna: Su código, tipo/uso (vivienda o edificio con uso mixto/residencial), su ubicación geográfica mediante coordenadas UTM Zona 17 (Este y Sur, en metros), la distancia aproximada a la línea de costa (km), variable relevante por el incremento esperado de la agresividad ambiental en ambientes marinos/costeros, y el alcance de evaluación en campo, definido por los elementos a ensayar (vigas y columnas) y un mínimo de seis elementos de medición por estructura, lo cual garantiza una cobertura básica y comparable entre casos.

En conjunto, la tabla evidencia que las estructuras se distribuyen en un gradiente de exposición costera, desde E3 (4,0 km, menor influencia directa del aerosol marino), E2 (1,0 km, exposición intermedia) y E1 (0,5 km, exposición alta). Esta distribución permite contrastar el comportamiento del hormigón armado bajo diferentes niveles de proximidad al mar, manteniendo constante el tipo de elementos evaluados (vigas y columnas) y el número mínimo de puntos de ensayo, lo que favorece la comparabilidad de resultados entre estructuras.

1.4 Estudios previos

Las tres estructuras seleccionadas (E1-E3), corresponden a edificaciones existentes ubicadas en la ciudad de Manta, las misma que está en servicio. En el marco del estudio, se incorpora el antecedente del sismo del 16 de abril de 2016 únicamente como contexto temporal relevante (post-evento), sin que ello implique una evaluación sísmica del desempeño estructural. El enfoque del proyecto se limitó a la evaluación de la condición del hormigón armado con criterio de durabilidad, por lo que, antes de ejecutar ensayos no destructivos, se desarrolló una etapa de estudios previos centrada en un reconocimiento general y una inspección visual sistemática.

En esta etapa se realizó un reconocimiento general de cada estructura con el propósito de identificar los elementos de hormigón armado que fueran accesibles para el levantamiento de información en campo. Considerando la configuración típica de las edificaciones y la relevancia de los elementos para la durabilidad, se definieron vigas y columnas como unidades principales de evaluación, dado que: representan componentes estructurales predominantes, suelen encontrarse expuestos a microambientes diferenciados (zonas interiores y perimetrales), y permiten establecer puntos comparables entre estructuras manteniendo consistencia del muestreo.

Posteriormente, se estableció un procedimiento de inspección visual sistemática para registrar manifestaciones potencialmente asociadas a durabilidad en los elementos seleccionados. Es importante precisar que, en esta fase, solo se realizó inspección visual, es decir, no se ejecutaron ensayos de medición ni

pruebas instrumentales; la finalidad fue reconocer condiciones aparentes del material y definir de manera técnica los puntos de evaluación para la etapa posterior de ensayos.

La inspección visual se aplicó con un criterio de recorrido ordenado, priorizando:

- Elementos perimetrales o semi-expuestos, tales como vigas de borde, columnas cercanas a fachadas, patios o zonas ventiladas, donde se presume una mayor interacción con el ambiente (humedad, ventilación, posibles aerosoles marinos).
- Elementos interiores de control, tales como vigas y columnas dentro de zonas secas o cerradas (pasillos, salas u otras áreas protegidas), utilizados como referencia comparativa dentro de la misma estructura.

Durante la inspección visual se registraron, cuando fueron observables, manifestaciones típicamente asociadas a condición superficial del hormigón y posibles procesos de degradación en servicio, tales como: presencia de humedad superficial persistente, manchas o escurrimientos, eflorescencias, fisuración visible en recubrimiento, disgregación o desprendimientos localizados, y cualquier evidencia de exposición del recubrimiento en zonas puntuales. El registro se realizó con el objetivo de identificar los elementos más representativos para el contraste “expuesto vs. interior”, sin emitir diagnósticos concluyentes en esta etapa, dado que la inspección visual por sí sola no permite cuantificar propiedades de durabilidad ni determinar mecanismos con certeza.

Como producto de esta fase, se definió un plan mínimo de seis puntos por estructura, distribuidos en tres vigas y tres columnas, procurando que exista al menos un punto exterior/semi-exterior y un punto interior (control) por cada tipo de elemento. Esta selección busca asegurar una cobertura básica homogénea entre estructuras y, al mismo tiempo, capturar la influencia del microambiente inmediato sobre el comportamiento del hormigón armado, manteniendo la comparabilidad para la etapa posterior de ensayos.

Tabla 2. Plan de puntos por estructura (mínimo 4 puntos: vigas y columnas)

| Estructura | Código | Elemento | Exposición | Ubicación interna (redacción sin domicilios) |
|-------------------|---------------|-----------------|--------------------------|---|
| E1 | E1-V-P1 | Viga | Exterior / semi-exterior | Planta baja, viga perimetral en zona de fachada o patio (mayor exposición). |
| E1 | E1-V-P2 | Viga | Interior (control) | Planta alta, viga interior en área seca (control). |
| E1 | E1-C-P3 | Columna | Exterior / semi-exterior | Planta baja, columna perimetral cercana a zona ventilada/expuesta. |
| E1 | E1-C-P4 | Columna | Interior (control) | Planta baja, columna interior en sala/pasillo (control). |
| E2 | E2-V-P1 | Viga | Exterior / semi-exterior | Único nivel, viga perimetral en zona exterior (fachada/patio). |
| E2 | E2-V-P2 | Viga | Interior (control) | Único nivel, viga interior en área seca (control). |
| E2 | E2-C-P3 | Columna | Exterior / semi-exterior | Único nivel, columna perimetral en zona expuesta. |
| E2 | E2-C-P4 | Columna | Interior (control) | Único nivel, columna interior cercana a circulación/sala (control). |
| E3 | E3-V-P1 | Viga | Exterior / semi-exterior | Planta baja, viga de borde en área abierta o de acceso (mayor exposición). |
| E3 | E3-V-P2 | Viga | Interior (control) | Nivel intermedio, viga interior en área cerrada (control). |
| E3 | E3-C-P3 | Columna | Exterior / semi-exterior | Planta baja, columna perimetral en zona ventilada/expuesta. |
| E3 | E3-C-P4 | Columna | Interior (control) | Planta baja o nivel intermedio, columna interior en pasillo/hall (control). |

La tabla 2, organiza el resultado operativo del reconocimiento general y de la inspección visual preliminar. En cada estructura se definieron cuatro puntos mínimos (≥ 4) sobre vigas y columnas como unidades principales de evaluación, diferenciando condiciones de mayor exposición (exterior/semi-exterior) y condiciones protegidas (interior-control). La codificación E#-V/C-P# asegura trazabilidad y facilita la posterior asociación de resultados por estructura, elemento y punto.

Adicionalmente, la interpretación comparativa del plan de puntos considera la antigüedad aproximada de las estructuras, como variable contextual vinculada al tiempo de servicio: E1 es la más antigua (40 años), E3 presenta una antigüedad intermedia (25 años) y E2 es la más joven (15 años). Esta caracterización temporal es relevante porque el tiempo de exposición acumulada puede influir en la manifestación y progresión de deterioro asociado a durabilidad, por lo que los puntos definidos en cada estructura permiten evaluar elementos representativos

bajo microambientes contrastantes (expuesto vs interior), considerando simultáneamente diferencias entre estructuras por tiempo de servicio.

En conjunto, el esquema estandarizado de selección favorece que, en la etapa posterior de ensayos no destructivos, se pueda interpretar el comportamiento del hormigón armado diferenciando el efecto del microambiente dentro de una misma estructura y las diferencias entre estructuras asociadas al tiempo de servicio y a su contexto general de exposición, manteniendo constante el tipo de elementos y el número mínimo de puntos evaluados.

1.5 Problemática a resolver

En la ciudad de Manta, numerosas edificaciones de hormigón armado continúan en servicio y habitadas a pesar de haber estado expuestas al sismo del 16 de abril de 2016. Reconocimientos técnicos posteriores al evento han documentado que, en el contexto urbano de Manabí, las edificaciones pueden presentar daños de distinta severidad, incluyendo manifestaciones que van desde afectaciones no estructurales hasta daños más relevantes según tipología y condiciones particulares (Aguiar & Haro, 2016). Sin embargo, en estructuras existentes que permanecen operativas, es frecuente que no se disponga de información actualizada y verificable sobre el estado real de los materiales, especialmente del hormigón, cuyo desempeño por durabilidad puede degradarse sin ser evidente a simple vista.

El problema central radica en que se desconoce la condición del hormigón armado en estructuras que siguen siendo utilizadas diariamente, lo que introduce incertidumbre al considerar su condición de servicio y habitabilidad. Esta incertidumbre no solo se asocia a posibles daños visibles, sino también a alteraciones menos evidentes del material, por ejemplo: fisuras finas, discontinuidades internas, heterogeneidad o pérdida de calidad que pueden incrementar la vulnerabilidad del hormigón frente a mecanismos de deterioro. Esta situación adquiere mayor relevancia en Manta por su entorno urbano-costero, donde la agresividad ambiental puede acelerar procesos de degradación y comprometer la durabilidad del sistema hormigón–acero.

Frente a esta problemática, se requiere una forma de identificar el estado del hormigón en edificaciones habitadas y en uso, evitando intervenciones invasivas. En este marco, la investigación plantea resolver la incertidumbre sobre la condición de la estructura mediante una evaluación basada en ensayos no destructivos (END), seleccionados por su aplicabilidad en estructuras existentes, rapidez y su capacidad para aportar indicadores de calidad y durabilidad. La propia normativa ecuatoriana reconoce la utilidad de los END para evaluación y comparación en obra, señalando explícitamente técnicas como el esclerómetro, la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y otras herramientas aplicables para analizar el “hormigón sospechoso” y apoyar decisiones de control y evaluación (NEC-SE-HM, 2015).

En particular, la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se empleó para caracterizar la uniformidad y la calidad relativa del hormigón, así como para indicar la presencia de discontinuidades internas (vacíos, fisuras) y para apoyar la estimación de severidad de deterioro o agrietamiento cuando se aplica como levantamiento en estructuras (ASTM International, 2023). Complementariamente, la resistividad eléctrica superficial se incorporó como un indicador de durabilidad asociado al transporte iónico en la red porosa del hormigón; en la literatura técnica se reconoce que la resistividad del hormigón se relaciona con características relevantes de durabilidad y se utiliza ampliamente como medida indirecta vinculada a la facilidad de ingreso/movilidad de agentes agresivos (Azarsa & Gupta, 2017). Finalmente, la esclerometría se integró como apoyo para estimar la dureza superficial y la variabilidad relativa del hormigón en diferentes puntos del elemento, útil para identificar zonas con comportamiento diferenciado dentro de una misma estructura (NEC-SE-HM, 2014).

En síntesis, la problemática a resolver se define como: la falta de información objetiva y actual sobre la durabilidad del hormigón armado en estructuras habitadas y en servicio en Manta, expuestas al contexto post-sismo 2016 y al ambiente urbano-costero; y, la necesidad de contar con un método técnicamente

sustentado y no invasivo para caracterizar el estado del material. La investigación propone atender esta brecha mediante una estrategia de END basada en: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica superficial y esclerometría, aplicada en vigas y columnas seleccionadas, con el objetivo de generar evidencia comparable sobre la condición del hormigón y apoyar la interpretación de su desempeño por durabilidad.

1.6 Justificación

La presente investigación se justifica en la necesidad de contar con un diagnóstico técnico actualizado, de tres estructuras de hormigón armado emplazadas en la ciudad de Manta que, pese haber estado expuestas al sismo del 16 de abril de 2016, continúan en servicio (habitadas y operativas). En el periodo post-terremoto, y sin asumir daños específicos en los casos de estudio, es pertinente reconocer que pueden existir condiciones que influyan en el desempeño por durabilidad —por ejemplo, fisuración residual o reparaciones localizadas— que no siempre son evidentes y que incrementan la incertidumbre respecto al estado real del material y su comportamiento futuro. Esta incertidumbre se vuelve más relevante por tratarse de un entorno urbano-costero, donde la exposición ambiental puede favorecer el ingreso de agentes agresivos al hormigón; en términos generales, la clasificación de la corrosividad atmosférica sustenta que el ambiente condiciona los procesos de degradación y, por ello, debe considerarse como variable de análisis en zonas costeras (International Organization for Standardization [ISO], 2012). En este marco, la investigación no busca “certificar” la seguridad estructural por capacidad resistente, sino aportar evidencia objetiva sobre la condición del hormigón con enfoque de durabilidad, útil para orientar atención técnica, monitoreo y decisiones de mantenimiento en edificaciones existentes.

Desde el punto de vista metodológico, el estudio se justifica porque plantea una estrategia compatible con estructuras en uso, basada en ensayos no destructivos (END), que permiten obtener indicadores sin realizar intervenciones invasivas ni afectar significativamente la habitabilidad. Esta elección responde a tres razones principales: primero, la naturaleza del problema exige evaluar la condición del

hormigón en elementos reales (vigas y columnas) sin extraer testigos ni generar afectaciones relevantes; segundo, al tratarse de estructuras en servicio, se requiere un esquema de evaluación rápida, repetible y comparable entre casos; y, tercero, al existir variaciones de microambiente dentro de una misma edificación (zonas exteriores/semi-exteriores versus interiores), es necesario un enfoque que permita capturar diferencias espaciales con un plan de medición sistemático. En consecuencia, la metodología prioriza el uso combinado de velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica superficial y esclerometría, por su complementariedad y por estar respaldados en la práctica técnica: el VPU se emplea como indicador de continuidad interna y uniformidad, útil para identificar variabilidad del material y posibles discontinuidades internas, contando además con un método estandarizado para su aplicación en concreto (ASTM International, 2023); la resistividad eléctrica superficial se incorpora como un indicador ligado al transporte iónico en la red porosa del hormigón y, por tanto, a su desempeño por durabilidad, reconocido y discutido en la literatura especializada como parámetro relevante para evaluación de durabilidad (Azarsa & Gupta, 2017); y la esclerometría se integra como apoyo para reconocer variabilidad de dureza superficial y aportar un criterio adicional de comparación entre puntos dentro del elemento, lo que fortalece la interpretación conjunta. La pertinencia de emplear END en obra se refuerza porque la NEC-SE-HM reconoce su uso como herramientas aplicables para evaluar hormigón en situaciones donde se requiere valorar condición o comparar comportamiento dentro de una misma obra, mencionando explícitamente ensayos como el pulso ultrasónico y el esclerómetro (Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), 2015).

Asimismo, la investigación se justifica por el diseño de muestreo y comparación adoptado para la selección de estructuras, la misma que se organiza bajo un criterio de exposición costera y contexto post-2016; mientras que, dentro de cada estructura, se define un plan mínimo estandarizado de medición sobre vigas y columnas, seleccionando puntos con condición exterior/semi-exterior (mayor interacción ambiental) y puntos interiores de control (condición más protegida). Este enfoque, precedido por una inspección visual sistemática (solo visual, sin

ensayos en esa fase), permitió identificar elementos accesibles y representativos, que reducen sesgos operativos al mantener constantes los tipos de elementos evaluados y el número mínimo de puntos por estructura. En términos prácticos, este esquema metodológico busca que los indicadores de VPU, resistividad eléctrica superficial y esclerometría puedan analizar el efecto del microambiente (expuesto vs. interior) y las diferencias entre estructuras asociadas a su contexto de exposición, lo cual aporta valor aplicado para caracterizar la condición del hormigón en edificaciones reales.

Finalmente, el estudio también se justifica por su contribución a la sostenibilidad y a la gestión responsable del entorno construido. Se alinea con el objetivo de desarrollo sostenible numeral 9 del cantón, al fortalecer prácticas de evaluación y mantenimiento de infraestructura mediante un diagnóstico técnico basado en métodos no destructivos; con el ODS 11 al aportar evidencia que favorece decisiones informadas sobre conservación y habitabilidad en comunidades urbanas; y con el ODS 12 al promover un uso más eficiente de recursos al apoyar enfoques de mantenimiento preventivo y prolongación de vida útil de estructuras, evitando intervenciones innecesarias o reemplazos prematuros (Naciones Unidas, s. f.-a; Naciones Unidas, s. f.-b; Naciones Unidas, s. f.-c). En conjunto, la justificación de esta investigación se sostiene en su pertinencia técnica, metodológica y social: atender la incertidumbre sobre la condición del hormigón armado en estructuras que continúan operativas en Manta, bajo exposición costera y contexto post-2016, mediante un diagnóstico no invasivo, reproducible y aplicable a la toma de decisiones con enfoque de durabilidad.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo General

Evaluar la durabilidad del hormigón armado en tres estructuras en servicio de la ciudad de Manta, en el contexto post-sismo 2016; con énfasis en exposición costera, haciendo uso de ensayos no destructivos.

1.7.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las tres estructuras seleccionadas y sus zonas de exposición (cercanía a costa, ambiente exterior/interior y condiciones de servicio post-sismo), para definir áreas representativas de evaluación comparativa.
- Evaluar el comportamiento del hormigón y el transporte de los agentes agresivos mediante resistividad eléctrica superficial, velocidad de pulso ultrasónico.
- Demostrar la resistencia mecánica del hormigón a partir de la esclerometría.
- Comparar los indicadores obtenidos por estructura mediante la intensidad de corrosión y nivel de riesgo indirecto de corrosión

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Durabilidad del hormigón armado y vida útil en ambiente costero

La durabilidad del hormigón armado se entiende, como la capacidad del material y del sistema acero–hormigón para mantener su desempeño en el tiempo bajo acciones ambientales y de servicio, sin que el deterioro alcance niveles que comprometan su funcionalidad o demanden intervenciones prematuras. En estructuras existentes, la durabilidad se expresa como una relación entre la calidad del hormigón de recubrimiento (microestructura, conectividad de poros, continuidad interna), la exposición ambiental (sales marinas, humedad, ciclos de mojado–secado, temperatura), y las condiciones de servicio (fisuración, mantenimiento, reparaciones y uso). Esta visión es coherente con enfoques regionales de durabilidad en ambientes marinos, donde la agresividad del medio afecta la evolución del desempeño del hormigón y la susceptibilidad a corrosión del refuerzo (Trocónis et al., 2006).

En zonas costeras, la durabilidad del hormigón armado suele controlarse por la facilidad con que el material permite el transporte de agentes agresivos (principalmente cloruros) y por la permanencia de condiciones electroquímicas favorables a la corrosión. Por ello, el diagnóstico de durabilidad se apoya en indicadores indirectos del transporte iónico y de la continuidad/calidad interna del hormigón, destacando la resistividad eléctrica superficial y el pulso ultrasónico (VPU) como ensayos no destructivos útiles para inferir vulnerabilidad del recubrimiento y heterogeneidades internas (AASHTO, 2013; ASTM, 2016).

2.1.2 Factores que influyen en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en estructuras de hormigón armado

En ambientes costeros, la corrosión atmosférica se define por la interacción entre variables climáticas y niveles de agentes corrosivos depositados,

principalmente sales marinas, que condicionan la disponibilidad de humedad superficial y el transporte iónico. En la clasificación de corrosividad atmosférica, se reconoce que el incremento de corrosividad está controlado por el complejo temperatura–humedad (incluyendo el tiempo de humectación o time of wetness) y por la presencia de agentes corrosivos/polución (por ejemplo, cloruros y compuestos sulfurosos), además de condiciones de exposición del componente (ISO, 2012).

Desde una perspectiva de microclima costero aplicado a concreto reforzado, revisiones recientes enfatizan que la corrosión inducida por cloruros en estructuras cercanas al mar no depende únicamente de “estar en zona marina”, sino de un conjunto de variables ambientales acopladas que afectan tanto el transporte de cloruros como el umbral de iniciación de corrosión (Das et al., 2025). Entre las variables microclimáticas más relevantes se destacan: temperatura, viento (que controla el transporte de aerosol marino), lluvia (lavado o aporte de humedad), duración de ciclos húmedo–seco, e ingreso de CO₂ (relacionado con carbonatación), las cuales en conjunto pueden acelerar o retardar la iniciación/propagación (Das et al., 2025).

En investigaciones climáticas de corrosión marina se ha mostrado que, en zonas costeras, los cloruros suelen ser un impulsor dominante de la corrosión frente a otros contaminantes, y que la variabilidad de parámetros meteorológicos (humedad, temperatura y condiciones asociadas a depósito salino) es decisiva para explicar tasas de corrosión observadas en campo (Daneshian et al., 2023).

Con base en lo anterior, para el acero de refuerzo embebido en el concreto en atmósfera costera marina, los factores que controlan el riesgo/velocidad de corrosión atmosférica pueden organizarse en dos grupos complementarios:

a) Factores ambientales (atmósfera y microclima):

1. Tiempo de humectación (TOW) y humedad relativa: determinan cuánto tiempo existe una película de electrolito activa en superficie/poros,

condición necesaria para sostener reacciones electroquímicas (ISO, 2012).

2. Temperatura: afecta la cinética de reacciones y la humedad de equilibrio del material; forma parte del complejo temperatura–humedad en corrosividad atmosférica (ISO, 2012).
3. Depósito de cloruros (aerosol marino): depende de distancia a costa, dirección/intensidad de viento y rugosidad/obstáculos; es crítico en atmósfera marina y explica diferencias espaciales en corrosión (Daneshian et al., 2023; Das et al., 2025).
4. Lluvia y ciclos húmedo–seco: la lluvia puede lavar sales, pero también incrementa humectación; los ciclos controlan la concentración de sales y la continuidad del electrolito (Das et al., 2025).
5. Polución atmosférica (SO_2 y otros): contribuye a la corrosividad atmosférica en combinación con humedad; se incluye como parte de los “otros agentes corrosivos” en la clasificación de corrosividad (ISO, 2012).

b) Factores del material y del elemento (concreto como medio de protección):

1. Calidad del recubrimiento (porosidad/conectividad) y resistividad eléctrica: una resistividad baja suele asociarse a mayor facilidad de transporte iónico y a un medio más favorable para procesos electroquímicos, por lo que se usa como indicador indirecto relevante en diagnósticos de durabilidad.
2. Fisuras (visibles o microfisuración): generan rutas preferenciales para ingreso de humedad y sales, aumentando la heterogeneidad del transporte y elevando vulnerabilidad local (Das et al., 2025).
3. Carbonatación (ingreso de CO_2): puede reducir la alcalinidad del recubrimiento y, en combinación con cloruros y humedad, modificar el estado de protección del acero (Das et al., 2025).
4. Condición de exposición del componente (orientación, abrigo, zonas de escurrimiento/salpicadura): en corrosividad atmosférica se reconoce que

la forma de exposición del elemento influye en el impacto del ambiente (ISO, 2012).

En síntesis, la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en entornos costeros marino es un fenómeno generado por el microclima (humedad/tiempo de humectación, temperatura, viento, lluvia y ciclos húmedo–seco) y por la carga salina/polución; sin embargo, su manifestación real en una estructura depende de cómo el hormigón, a través de su recubrimiento (calidad, fisuración y propiedades de transporte), logra o no actuar como barrera frente al ingreso y transporte de agentes agresivos (Daneshian et al., 2023).

Tabla 3. Factores que influyen en la corrosión del acero de refuerzo en hormigón armado.

| Factores dependientes del hormigón | Factores dependientes del acero de refuerzo | Factores dependientes del medio de exposición |
|---|--|--|
| Dosificación (relación agua/cemento, diseño de mezclas) | Condición superficial (óxidos y recubrimientos) | Iones cloruro |
| Compacidad y homogeneidad | Tensiones mecánicas | Carbonatación |
| Espesor de recubrimiento | — | Humedad relativa |
| Permeabilidad y porosidad | — | Temperatura |
| Existencia de fisuras y grietas | — | Efectos del oxígeno |

La tabla 3, organiza los factores que influyen en la corrosión del acero de refuerzo en tres grupos complementarios: factores del hormigón, factores del acero y factores del medio de exposición. Esta clasificación ayuda a comprender que la corrosión no depende de una sola variable, sino de la interacción entre la capacidad protectora del recubrimiento, el estado del refuerzo y la agresividad ambiental (ACI Comité 222, 2019).

En primer lugar, los factores dependientes del hormigón controlan la función de “barrera” del recubrimiento. Una dosificación adecuada (en particular, una menor relación agua/cemento), así como una buena compacidad y homogeneidad,

tienden a disminuir la conectividad de poros y a limitar el transporte de agentes agresivos. De forma coherente, la permeabilidad/porosidad condiciona el transporte de humedad e iones, y el espesor de recubrimiento define la longitud del camino que deben recorrer cloruros o CO_2 antes de alcanzar el acero. Finalmente, la presencia de fisuras y grietas puede generar rutas preferenciales que aceleran el ingreso de agentes agresivos y reducen la vida útil (Huang et al., 2024).

En segundo lugar, los factores dependientes del acero de refuerzo se relacionan con el estado superficial del metal y su susceptibilidad a iniciar corrosión. La condición superficial (presencia de óxidos, limpieza o recubrimientos) y las tensiones mecánicas pueden influir en el comportamiento electroquímico, especialmente cuando el medio se vuelve favorable por despasivación o por presencia de cloruros (ACI Comité, 2019).

En tercer lugar, los factores del medio de exposición gobiernan la “agresividad” del entorno. Los iones cloruro son críticos en zonas costeras por su capacidad de favorecer la ruptura local de la película pasiva, mientras que la carbonatación reduce la alcalinidad del hormigón y puede despasivar el acero. La humedad relativa y la temperatura controlan la disponibilidad de electrolito y la cinética de las reacciones, y el oxígeno participa como reactivo clave en las reacciones catódicas que sostienen la corrosión; por ello, variables microclimáticas (humedad/tiempo de humectación, ciclos húmedos–seco, lluvia y viento) explican diferencias de comportamiento incluso dentro de un mismo ambiente costero (International Organization for Standardization [ISO], 2012).

Esta tabla justifica el uso de resistividad como indicador indirecto de propiedades del hormigón asociadas al transporte iónico/humedad (columna 1) y de VPU como indicador de continuidad interna y posible presencia de discontinuidades/fisuración (columna 1), mientras que las variables ambientales (columna 3) explican por qué la cercanía a la costa puede modificar el riesgo de deterioro.

2.1.3 Ambiente costero y mecanismos de ingreso de agentes agresivos

Las estructuras ubicadas en zonas cercanas al perfil costero, están expuestas con mayor frecuencia a nieblas salinas, aerosoles marinos y ambientes de alta humedad, factores que incrementan la probabilidad de ingreso de cloruros y el mantenimiento de condiciones favorables para procesos electroquímicos en el acero. En este escenario, la durabilidad del concreto depende fuertemente de su calidad (relación agua/cemento, tipo de material cementante, curado), del recubrimiento, y de la presencia de fisuración. (Mehta & Monteiro, 2014).

Adicionalmente, en un escenario post-sismo, es posible que algunas estructuras presenten fisuras o microfisuración acumulada por solicitaciones pasadas. Conceptualmente, la fisuración puede aumentar la conectividad de la red de transporte y acelerar la penetración de agentes agresivos, por lo que la inspección visual y la identificación de rutas de ingreso (fisuras, juntas, zonas húmedas) se consideran parte esencial del diagnóstico de durabilidad. (ACI, 2007).

2.1.4 Corrosión del acero de refuerzo: pasivación, despasivación y factores que la controlan

En el hormigón armado, el acero de refuerzo se mantiene normalmente protegido por la alcalinidad de la matriz cementicia, que favorece la formación de una película pasiva. Sin embargo, esa condición puede perderse cuando el sistema se ve afectado por procesos que reducen dicha protección o que crean condiciones electroquímicas favorables a corrosión. Dos rutas conceptuales son especialmente relevantes:

1. Ingreso de cloruros, que puede romper localmente la pasividad; y
2. Cambios del medio (humedad, oxígeno disponible, conectividad de poros) que facilitan el transporte iónico y la reacción electroquímica.

En investigaciones sobre corrosión atmosférica en zonas costeras, se señala que la concentración de cloruros y los ciclos de humectación–secado tienen un rol central

en el origen y desarrollo de la corrosión, y que variables de “calidad del hormigón”, como indicadores relacionados con VPU, también aportan evidencia complementaria del comportamiento del material frente a la agresividad ambiental (Chico et al., 2017).

Desde el punto de vista de medición electroquímica, recomendaciones técnicas como RILEM TC 154-EMC consolidan el uso de técnicas electroquímicas en campo para discriminar entre zonas con comportamiento activo o pasivo del refuerzo, destacando la importancia de indicadores vinculados al estado electroquímico y a la facilidad de transporte iónico dentro del hormigón (Andrade et al., 2004).

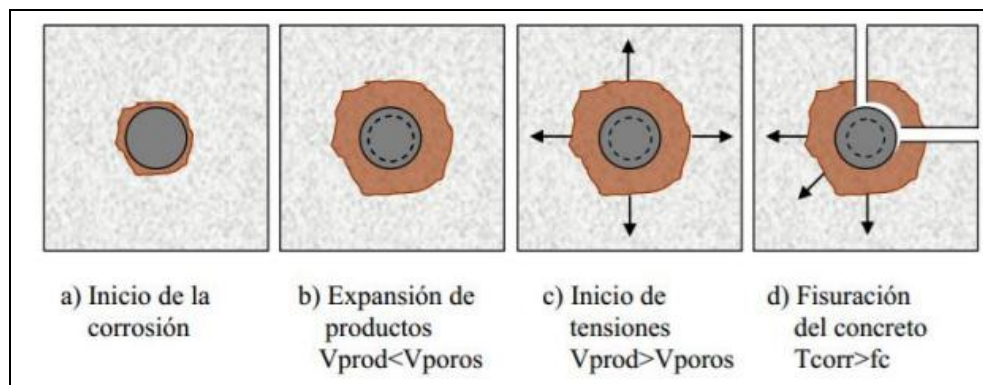


Ilustración 2. Deterioro del hormigón por corrosión del acero (Romo Martínez, 2020).

La ilustración 2, representa de forma esquemática, el proceso mediante el cual la corrosión del acero de refuerzo no solo implica pérdida de sección del metal, sino que se traduce en un deterioro progresivo e irreversible del concreto, cuya manifestación más visible es el agrietamiento y posterior desprendimiento (delaminación/spalling) del recubrimiento. El mecanismo central es la formación y acumulación de productos de corrosión alrededor de la barra: cuando estos productos ocupan un volumen mayor que el espacio disponible en los poros del concreto, comienzan a generar presiones internas que inducen tensiones de tracción radiales en el recubrimiento. A medida que estas tensiones aumentan y superan la resistencia a tracción del concreto, se inicia la fisuración; si el proceso continúa, el agrietamiento se amplifica hasta provocar desprendimientos del recubrimiento, acelerando aún más el acceso de humedad, oxígeno y cloruros al acero (Romo Martínez, 2020).

En particular, el esquema muestra cuatro fases: inicio de la corrosión en la superficie del acero; expansión inicial de productos de corrosión, aún acomodados parcialmente en la red porosa del concreto; incremento de tensiones internas conforme el volumen de productos de corrosión supera la capacidad de alojamiento del medio poroso, generando esfuerzos radiales; y fisuración del concreto cuando la tensión inducida por la corrosión supera la capacidad resistente del recubrimiento, etapa a partir de la cual se facilita el ingreso de agentes agresivos y se acelera el deterioro (Romo Martínez, 2020).

2.1.5 Alcalinidad del hormigón, pasividad del acero y ruptura de pasividad

2.1.5.1 Alcalinidad del hormigón y solución de poros

El hormigón endurecido contiene una solución en sus poros con carácter altamente alcalino, asociada a hidróxidos (principalmente NaOH, KOH y Ca(OH)₂). Esta condición se expresa en valores típicos de pH elevados, y constituye la base química de la protección inicial del acero embebido. Debido que, el hormigón presenta un medio alcalino (pH alto) que favorece la formación de una capa protectora sobre el acero (Romo Martínez, 2020).

2.1.5.2 Pasividad del acero en hormigón

En un medio alcalino, el acero de refuerzo desarrolla una película pasiva (capa delgada de óxidos/hidróxidos) que reduce drásticamente su velocidad de corrosión. Esta protección del acero, depende de esa película pasiva formada en el ambiente alcalino del hormigón. Esta condición es esencial: mientras se mantenga la pasividad, el acero puede permanecer estable por periodos prolongados aun en presencia de humedad (Romo Martínez, 2020).

2.1.5.3 Ruptura de pasividad (despasivación): carbonatación y cloruros

La ruptura de pasividad ocurre cuando el entorno junto al acero deja de ser suficientemente alcalino o cuando la película pasiva se altera químicamente. Dos mecanismos dominan este proceso en estructuras de hormigón armado:

Carbonatación: la entrada de CO_2 y su reacción con fases alcalinas reduce la alcalinidad, pudiendo llevar el pH de la zona de poros a niveles donde la película pasiva deja de ser estable. Estudios recientes sobre corrosión inducida por carbonatación enfatizan que el control de propiedades de transporte y el recubrimiento son críticos para prolongar la vida útil, especialmente en evaluación de estructuras existentes (Belgacem et al., 2020).

Ingreso de cloruros: los cloruros pueden desestabilizar localmente la película pasiva, favoreciendo iniciación de corrosión incluso si la alcalinidad general es alta, cuando se alcanza una condición crítica en la interfase acero–hormigón. Revisiones recientes en ambiente costero resaltan que la iniciación y propagación se ven moduladas por el microclima y el transporte en el hormigón (Ali et al., 2024).

En síntesis, la durabilidad del hormigón armado en el perfil costero, se interpreta como la capacidad del recubrimiento y del material de retardar la despasivación y limitar la cinética de corrosión mediante baja conectividad de poros, menor transporte iónico y control de humedad interna.

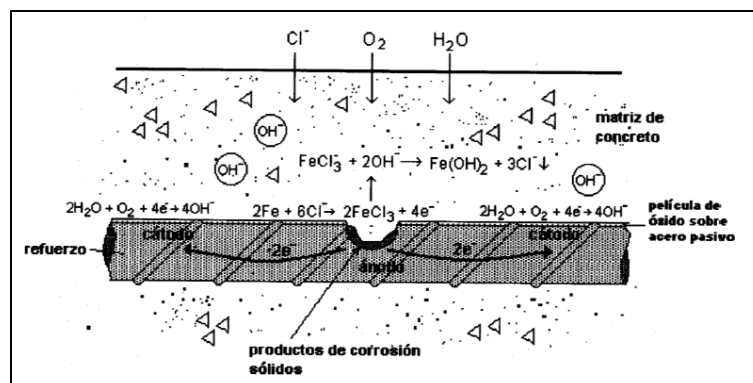


Ilustración 3. Mecanismo de corrosión por picaduras (pitting) inducida por cloruros en acero de refuerzo embebido en hormigón. (Rivera Vélez, 2024).

La ilustración 3, esquematiza la corrosión localizada por picaduras del acero de refuerzo cuando iones cloruro (Cl^-), junto con humedad (H_2O) y oxígeno (O_2), penetran a través del recubrimiento y alcanzan la interfaz acero–hormigón. En

condiciones normales, el acero permanece protegido por una película pasiva favorecida por la alta alcalinidad del concreto; sin embargo, la acumulación de cloruros puede romper localmente dicha película (despasivación), generando un punto anódico concentrado donde inicia la disolución del hierro y el crecimiento de la cavidad o picadura, mientras zonas cercanas actúan como cátodo donde ocurre la reducción de oxígeno y se forman iones hidroxilo (OH^-) (Tian et al., 2025).

El esquema también ilustra la formación de especies férricas (por ejemplo, Fe^{3+}) y la precipitación de hidróxidos/óxidos de hierro como productos sólidos de corrosión alrededor de la barra (p. ej., $\text{Fe}(\text{OH})_x$), lo cual se asocia a expansión, fisuración y deterioro progresivo del recubrimiento. Este carácter altamente localizado es crítico en durabilidad: la corrosión por picaduras puede provocar pérdidas severas de sección en puntos específicos aun cuando otras zonas del acero se mantengan aparentemente pasivas (Ali et al., 2024; Das et al., 2025).

2.1.6 Mecanismos de deterioro relevantes para el estudio

2.1.6.1 Ataque por cloruros en ambiente marino-costero

El mecanismo de cloruros se asocia al depósito y transporte de sales hacia el interior del hormigón, acumulándose con el tiempo. En ambientes costeros, la acción del viento, la salinidad del aerosol y los ciclos de humedad favorecen esta acumulación. Revisiones recientes describen la influencia del microclima (humedad, deposición salina y ciclos de secado) como un factor que explica por qué estructuras cercanas al mar pueden presentar mayores riesgos de corrosión (Ali et al., 2024).



Ilustración 4. Manifestaciones típicas de corrosión inducida por cloruros en elemento de hormigón armado (ambiente marino–costero): manchas de óxido y deterioro del recubrimiento. (Magalhães, 2024).

La ilustración 4, muestra un elemento de hormigón armado (tipo viga/elemento de borde) con manchas de óxido y pérdida localizada de recubrimiento, evidenciando un proceso de deterioro compatible con corrosión del acero de refuerzo. En ambientes marino–costeros, la presencia de cloruros (aerosol marino, salpicadura o contacto indirecto con agua salina) favorece el ingreso de iones hacia el interior del recubrimiento. Cuando los cloruros alcanzan el acero y se supera un umbral crítico a nivel de la armadura, pueden desestabilizar la película pasiva, iniciando corrosión; los productos de corrosión generan expansión, lo que se asocia a fisuración, delaminación y eventual desprendimiento del recubrimiento, además de marcas superficiales de óxido como las observadas en la imagen (Magalhães, 2024).

2.1.6.2 Carbonatación y pérdida de alcalinidad

La carbonatación se vincula al transporte de CO_2 y a la reacción con productos del cemento, con impacto directo en la estabilidad de la película pasiva. En evaluaciones de vida útil, se ha propuesto controlar la permeabilidad/transportes como forma de limitar la progresión de este frente y reducir riesgo de corrosión (Belgacem et al., 2020).



Ilustración 5. Evidencia de corrosión del refuerzo asociada a carbonatación y pérdida de alcalinidad del hormigón (ejemplo fotográfico). Alario Catalá (2014).

La ilustración 5, muestra un elemento de hormigón con fisura longitudinal y desprendimiento del recubrimiento, dejando expuesta una barra de acero con productos de corrosión. Este patrón es consistente con el avance de procesos de deterioro donde el recubrimiento deja de actuar eficazmente como barrera y el acero pierde su condición de protección. En términos conceptuales, la carbonatación ocurre cuando el CO_2 atmosférico penetra por la red porosa del hormigón (en presencia de humedad), y reacciona con compuestos alcalinos de la pasta, reduciendo el pH de la solución de poros. Mientras el pH se mantiene alto (típicamente >12.5), el acero permanece pasivado por una película protectora; sin embargo, cuando el pH disminuye (aprox. por debajo de 9), se rompe la pasividad y pueden iniciarse procesos de corrosión, cuyos productos ocupan mayor volumen y favorecen la fisuración y el desprendimiento del recubrimiento (Ferrando & Payá, 2025).

2.1.6.3 Fisuras y rutas preferenciales de ingreso

Las fisuras representan rutas preferenciales para el ingreso de agentes agresivos y, por tanto, un condicionante directo de durabilidad. Esto es relevante en estructuras en servicio y más aún en condición post-evento sísmico, donde pueden existir fisuras residuales o microfisuración que no compromete necesariamente la estabilidad inmediata, pero sí el desempeño frente a ingreso de agentes. En investigación aplicada, el uso de ensayos no destructivos como

VPU se ha utilizado para caracterizar zonas fisuradas y cambios de módulo/rigidez asociados al daño (Hasan et al., 2022).



Ilustración 6. Fisuras y discontinuidades en elemento de hormigón armado como rutas preferenciales de ingreso de agentes agresivos. (Moreno, 2018).

En la ilustración 6, muestra un elemento de hormigón armado con fisuración visible y zonas de discontinuidad superficial (oquedades/poros abiertos y pérdida local de material), particularmente en el encuentro viga–columna. Este tipo de daño es relevante para la durabilidad porque las fisuras y defectos del recubrimiento reducen la capacidad “barrera” del concreto y pueden actuar como rutas preferenciales de ingreso de humedad, oxígeno y sales (especialmente cloruros en ambientes costeros). En términos prácticos, aun cuando una fisura no implique por sí sola una pérdida inmediata de capacidad estructural, sí puede aumentar la conectividad entre el ambiente externo y el interior del recubrimiento, facilitando el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo y acelerando procesos de deterioro asociados a la corrosión (Moreno, 2018).

2.1.7 Condición post-sismo 2016 y durabilidad en estructuras operativas

El antecedente del sismo del 16 de abril de 2016, se incorpora en esta tesis como contexto de exposición y continuidad operativa, sin pretender realizar un

rediseño sísmico ni una verificación exhaustiva de capacidad resistente. En términos de durabilidad, un evento sísmico puede dejar fisuras residuales y microdaño que, aun cuando no sean críticos estructuralmente, pueden incrementar la permeabilidad/transportabilidad efectiva del recubrimiento y facilitar el ingreso de humedad, oxígeno y especies iónicas hacia el refuerzo; en general, la presencia de fisuras acelera la migración de agentes agresivos y puede afectar la vida útil y la servicioabilidad del elemento (Huang et al., 2024). Bajo este enfoque, la condición “post-sismo” se interpreta como una variable cualitativa potencial que ayuda a explicar heterogeneidades del material y la existencia de rutas preferenciales de transporte (Huang et al., 2024).

Adicionalmente, el hecho de que las estructuras continúen en servicio implica considerar condiciones de servicio/operatividad, tales como presencia de humedad recurrente, mantenimiento localizado, reparaciones puntuales o exposición directa a lluvia/salpicadura. En el marco normativo, la durabilidad se vincula con requisitos de exposición orientados a reducir la permeabilidad del hormigón frente al ingreso de agua y químicos disueltos que generan problemas de desempeño a mediano y largo plazo (ACI Committee 318, 2019; Obla & Lobo, 2023). En este sentido, los ensayos no destructivos permiten discutir el estado del material sin recurrir a extracción masiva de muestras: la velocidad de pulso ultrasónico es útil para identificar variaciones de calidad y presencia de discontinuidades internas (grietas, vacíos) a partir de cambios en la velocidad de pulso (ASTM International, 2022), mientras que la resistividad eléctrica se emplea ampliamente como indicador no destructivo asociado al transporte iónico, fuertemente influido por la saturación y por condiciones relacionadas con el ingreso de cloruros y el riesgo de corrosión (Robles et al., 2022).

2.1.8 Ensayos no destructivos aplicados a durabilidad

2.1.8.1 Resistividad eléctrica del hormigón: fundamento e interpretación

La resistividad eléctrica superficial del hormigón, es un indicador asociado a la facilidad con la que circulan iones en la solución de poros y, por tanto, se relaciona con propiedades de transporte (penetrabilidad) y con la probabilidad de

que se sostengan corrientes de corrosión una vez iniciada la despasivación tal como se lo indica en la ilustración 7. La resistividad depende fuertemente de: grado de saturación, concentración iónica de la solución de poros, microestructura del material y temperatura al momento de medir, lo que obliga a controlar o registrar condiciones de medición para comparar puntos y estructuras (Obla & Lobo, 2021).

En términos normativos, la resistividad puede determinarse como:

- Resistividad volumétrica (bulk) en especímenes o testigos, donde el método busca dar una indicación rápida de la resistencia del hormigón a la penetración de fluidos y iones agresivos, bajo condiciones controladas de saturación/solución (ASTM International, 2019).
- Resistividad superficial, empleada ampliamente como indicación de la capacidad del hormigón para resistir penetración de cloruros (AASHTO, 2024).

Qué permite determinar en esta tesis (enfoque de durabilidad):

- Comparar, entre estructuras con distinta cercanía a costa, qué tan “favorable” es el material al transporte iónico (y por extensión, qué tan compatible es con un escenario de mayor o menor susceptibilidad a procesos corrosivos).
- Identificar zonas con posible mayor conectividad de poros, humedad retenida o heterogeneidad del recubrimiento (Obla & Lobo, 2021).

Limitaciones clave (que debes declarar):

- La resistividad no “mide corrosión” directamente; es un indicador indirecto que requiere interpretarse con contexto (humedad, exposición, fisuras, recubrimiento, salinidad).
- Comparaciones deben hacerse con condiciones de medición lo más consistentes posible (misma metodología, registro de humedad/temperatura y ubicación).



Ilustración 7. Resistividad eléctrica en elementos de hormigón armado.

2.1.8.2 Pulso ultrasónico (VPU): fundamento e interpretación

El pulso ultrasónico (VPU) consiste en medir la velocidad de propagación de ondas a través del hormigón (ilustración 8) . La norma ASTM indica que el método es aplicable para: evaluar uniformidad y calidad relativa, indicar presencia de vacíos o fisuras, evaluar efectividad de reparaciones y, en levantamientos de estructuras, estimar severidad de deterioro o agrietamiento (ASTM International, 2022).

Qué detecta y por qué es relevante para durabilidad:

- Discontinuidades internas (vacíos, microfisuras, zonas degradadas) que pueden estar asociadas a mayor permeabilidad o heterogeneidad del recubrimiento.
- Cambios espaciales de calidad relativa del material, útiles para comparar elementos o sectores dentro de una misma estructura (ASTM International, 2022).

En aplicaciones post-evento, se ha reportado el uso combinado de VPU con otras técnicas para evaluar zonas fisuradas y cambios de propiedades dinámicas (Hasan et al., 2022).

Limitaciones clave (declaración metodológica):

- VPU es sensible a humedad, temperatura, tipo de agregado y condición superficial; por ello se usa mejor como comparación relativa entre puntos medidos con procedimiento consistente.
- La interpretación cuantitativa (estimar resistencia) requiere calibración específica, por lo que en esta tesis se orienta a uniformidad daño discontinuidades, no a estimación directa de $f'c$.



Ilustración 8. Pulso ultrasónico (UPV) en elementos de hormigón armado.

2.1.9 Integración conceptual: lectura conjunta VPU–resistividad–condiciones de servicio

En esta tesis, la lógica conceptual integra dos “ventanas” complementarias del material:

- **Resistividad:** aproxima la facilidad de transporte iónico y el estado “electroquímicamente favorable” del hormigón para procesos corrosivos (cuando existan condiciones de despasivación), fuertemente modulada por humedad y microestructura (Obla & Lobo, 2021; ASTM International, 2019).
- **VPU:** aproxima la continuidad interna y calidad relativa, indicando posibles vacíos/fisuras o deterioro que, indirectamente, puede asociarse a mayor permeabilidad del recubrimiento (ASTM International, 2022).

La cercanía al perfil costero, actúa como variable ambiental que incrementa la probabilidad de exposición a cloruros y humedad; y la condición post-sismo 2016 se incorpora como antecedente que puede explicar presencia de fisuración residual o

heterogeneidades. Con ello, la discusión de resultados se enfoca en comparar estructuras y elementos en términos de: material más/menos favorable a transporte iónico (resistividad), mayor/menor continuidad interna (VPU) y coherencia con condiciones de servicio observables (fisuras, humedad, reparaciones), sin asumir daños específicos cuando no existan evidencias de campo.

Marco metodológico

2.1.10 Enfoque, tipo y diseño de investigación

En el marco teórico se estableció que, en zonas marino-costeras, la durabilidad del hormigón armado está fuertemente condicionada por el transporte iónico dentro del recubrimiento (relacionado con resistividad) y por la continuidad/heterogeneidad interna del material (analizable mediante pulso ultrasónico). En coherencia con el problema y objetivos, este capítulo define el procedimiento para evaluar durabilidad en tres estructuras de Manta, dentro del contexto post-sismo 16/04/2016, sin modelación sísmica, sino con ensayos no destructivos y criterios reconocidos en la literatura técnica aplicada en Manabí (Moreira & Guerra, 2024).

2.1.11 Enfoque, tipo y diseño de investigación

La investigación es aplicada, de campo, con enfoque cuantitativo y alcance descriptivo-comparativo, orientado a diagnosticar la condición de durabilidad del hormigón armado en tres estructuras ubicadas en Manta con diferente cercanía a la costa. El diseño es no experimental y transversal, dado que las mediciones se ejecutan en una campaña de evaluación in situ, sin manipular variables, y se comparan resultados según el gradiente de exposición costera (Guerrero et al., 2025).

Área de estudio, unidades de análisis y selección de casos

2.1.12 Área de estudio

El estudio se desarrolla en el cantón Manta (Manabí-Ecuador), cuyo entorno marino-costero favorece ambientes con humedad elevada y presencia de sales, factores asociados a procesos de deterioro y corrosión en estructuras de hormigón armado (Moreira & Guerra, 2024; Guerrero et al., 2025).

2.1.12.1 Unidades de análisis

Las unidades de análisis son:

- Estructuras (tres casos de estudio con distinta cercanía a la costa).
- Elementos estructurales: se priorizan columnas por representatividad y por precedentes metodológicos en estudios locales (Moreira & Guerra).

2.1.12.2 Selección de las tres estructuras (criterio práctico y pertinente)

Se seleccionan tres estructuras con el propósito de capturar un gradiente de exposición (cercana, intermedia y más alejada de la costa). Este criterio es consistente con trabajos desarrollados en Manabí donde se seleccionan estructuras a diferentes distancias desde la línea costera para analizar indicadores no destructivos vinculados a durabilidad y corrosión (Guerrero et al., 2025).

Nota de coherencia con tu alcance: aunque el contexto es post-terremoto 2016, el presente diagnóstico se centra en durabilidad del hormigón y riesgo indirecto de corrosión, no en capacidad sísmica.

2.1.12.3 Variables, indicadores y lógica de evaluación

La evaluación de durabilidad se estructura con dos indicadores no destructivos:

Resistividad eléctrica aparente (ρ): indicador del estado del medio poroso y facilidad de transporte iónico; se utiliza además para estimar una intensidad de corriente de corrosión como indicador indirecto de afectación corrosiva (Andrade et al., 2004).

Velocidad de pulso ultrasónico (VPU): indicador de homogeneidad y continuidad interna del hormigón; se usa para apoyar la interpretación de la “calidad” del material y su compatibilidad con un recubrimiento más o menos permeable/defectuoso (Guerrero et al., 2025).

Plan de puntos y estrategia de muestreo in situ

2.1.13 Selección del elemento representativo

Siguiendo el esquema aplicado en estudios de Manabí, en cada estructura se seleccionará una columna representativa para ejecutar las mediciones.

2.1.13.1 Número de lecturas por columna (criterio operativo)

Para cada columna se tomará un conjunto de lecturas distribuidas espacialmente (por caras y alturas), buscando:

- Capturar variabilidad del recubrimiento,
- Evitar puntos con interferencia directa del acero,
- Asegurar repetibilidad

Tabla 4. Plan de puntos (modelo para las 3 estructuras).

| Estructura | Elemento | Caras | Niveles/alturas | Nº lecturas resistividad | Nº trayectorias UPV | Observación |
|------------|----------|-------------|-----------------|--------------------------|---------------------|------------------------|
| E1 | Columna | 4 (N-S-E-O) | 3 alturas | 12-13 | 3-6 | Distribución homogénea |
| E2 | Columna | 4 (N-S-E-O) | 3 alturas | 12-13 | 3-6 | Igual criterio |
| E3 | Columna | 4 (N-S-E-O) | 2 alturas | 12-13 | 3-6 | Igual criterio |

2.1.14 Ensayo 1: Resistividad eléctrica aparente (ρ)

2.1.14.1 Fundamento

La resistividad eléctrica del hormigón es una medida indirecta relacionada con el movimiento de iones en su red porosa; en ambientes costeros, valores menores tienden a asociarse con condiciones que favorecen procesos corrosivos si existen agentes agresivos y humedad disponible. En estudios realizados en Manabí, la resistividad se utilizó como variable clave para caracterizar afectaciones por corrosión atmosférica y como base para estimar un indicador indirecto de corrosión (Guerrero et al., 2025).

2.1.14.2 Preparación del punto y control de interferencias

Previo a la medición:

- Se identifica la zona de la columna y se define la malla de puntos.
- Se recomienda localizar el refuerzo con pacómetro para reducir interferencias del acero en las lecturas (procedimiento reportado en aplicaciones de resistividad superficial en estructuras) (Moreira & Guerra, 2024).
- Se acondiciona el contacto eléctrico (por ejemplo, humectación de esponjas o del área de contacto cuando sea necesario) para mejorar estabilidad del registro (Moreira & Guerra, 2024).

2.1.14.3 Cálculo de resistividad (método de cuatro puntas)

En el método de cuatro puntas (arreglo tipo Wenner), el equipo determina la resistencia eléctrica R_e y se calcula la resistividad aparente mediante:

$$\rho = 2\pi\alpha R_e$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica aparente del hormigón ($\Omega\cdot\text{cm}$ o $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$, según conversión).

α = Separación entre electrodos (cm), asociada a la zona de influencia de la medición.

R_e = Resistencia eléctrica medida (Ω o $\text{k}\Omega$).

Esta formulación y su interpretación práctica para medición superficial se encuentran reportadas en estudios aplicados en estructuras costeras y se complementan con el uso de equipos comerciales basados en la técnica Wenner (Moreira & Guerra, 2024).

$$I_c = \frac{3 \times 10^4}{\rho}$$

Donde I_c se expresa en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y ρ debe estar en $\Omega\cdot\text{cm}$. Esta expresión se utiliza como estimador indirecto para análisis de corrosión y se integra a criterios de clasificación difundidos por el marco técnico asociado a RILEM en la evaluación del fenómeno corrosivo (Andrade et al., 2004).

El cálculo de los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), fue realizado a partir de los valores de Resistividad Eléctrica Aparente (en ρ - Ω/cm) obtenidos para cada columna y viga graficados también. Para esto, fue usado el criterio establecido por el Comité Técnico de RILEM (Andrade et al, 2004).

2.1.14.3.1 Equipo y método usado para R_s

Para la estimación de la Resistencia a la Compresión (R_c -MPa) en las columnas y vigas a partir de la Esclerometría; un Esclerómetro digital, marca Silver Schmidt PC tipo N de Suiza fue utilizado, la previa calibración (0,735) del equipo fue necesaria. Para eso, un yunque tarado de 16 kg fue empleado. Posteriormente, fue seleccionada una cuadrícula de área 100 cm^2 en las columnas y vigas, es decir, donde no hubo presencia de aceros de refuerzo, para el cual se utilizó un pacómetro.

2.1.14.3.2 Curva, criterio usado para convertir Rc

Para la obtención de los valores de Rc los cuales fueron graficados para cada columna y viga en las estructuras, fue necesario hacer uso del gráfico que correlaciona los valores de Esclerometría con la Rc (en MPa). El gráfico fue proporcionado por los fabricantes en el propio equipo como suele suceder. Las mediciones fueron realizadas, colocando el equipo de manera horizontal en las columnas y vigas. Por tanto, el ángulo de inclinación para la obtención de los valores de Rc en el gráfico fue de 00.

2.1.14.4 Clasificación del nivel de corrosión (tabla de interpretación)

Para interpretar I_c , se adoptan intervalos de clasificación usados en trabajos regionales y compatibles con criterios internacionales, asociando , pérdida de espesor equivalente y nivel de corrosión (Guerrero et al., 2025)

2.1.14.4.1 Configuración del VPU y distancia entre transductores:

Un equipo Marca MATEST- de fabricación italiana - MODELO: C369N. Rango de medición del tiempo de 0 a 3000 μ s, de precisión $\pm 0,1 \mu$ s con una selección de la amplitud del impulso ultrasónico ajustable desde 250 hasta 1000 V fue utilizado en las mediciones. Aquí también, fue necesario proceder con la calibración antes de la ejecución de las mediciones a partir de las barras de referencias de hormigón. En estas barras, el recorrido de la onda ultrasónica tiene un tiempo estándar al colocarle los transductores por el método directo. El ensayo consistió en medir el tiempo (en μ s convertido a s) fijado en la pantalla del equipo que tarda la onda ultrasónica (frecuencia 50 kHz) en recorrer la distancia fijada entre los transductores. Esta distancia varió en dependencia de las columnas y las vigas para cada construcción.

Tabla 5. Intervalos de clasificación de I_c (μ A/cm²) y nivel de corrosión.

| (I_c) (μ A/cm ²) | Pérdida espesor (mm/año) | Nivel de corrosión |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------|
| $\leq 0,1$ | $\leq 0,001$ | Insignificante |
| 0,1 – 0,5 | 0,001 – 0,005 | Bajo |
| 0,5 – 1,0 | 0,005 – 0,010 | Moderado |
| $> 1,0$ | $> 0,010$ | Elevado |

2.1.15 Ensayo 2: Pulso ultrasónico (UPV)

2.1.15.1 Fundamento

La velocidad de pulso ultrasónico (UPV) permite evaluar la continuidad del material: variaciones relevantes en velocidad pueden asociarse a heterogeneidad, presencia de microfisuras, vacíos o cambios de compactación. En los trabajos aplicados en Manabí se reconoce este ensayo como parte del conjunto de métodos no destructivos usados para diagnóstico en estructuras cercanas a la costa (Guerrero et al., 2025)

2.1.15.2 Cálculo de la velocidad ultrasónica

Para cada trayectoria definida, se registra la longitud (m) entre transductores y el tiempo de tránsito t (s), obteniendo:

$$V = \frac{L}{t}$$

Donde V es la velocidad de pulso (m/s o km/s). Se recomienda realizar lecturas repetidas por trayectoria y adoptar el promedio para reducir dispersión instrumental y de acoplamiento.

2.1.16 Procesamiento de datos e integración resistividad–UPV para concluir durabilidad

2.1.16.1 Estadística descriptiva por estructura

Para cada estructura se obtendrán:

- promedio, mediana y desviación estándar de p .
- promedio y dispersión de V (UPV).
- cálculo de I_c punto a punto y clasificación.

La comparación entre estructuras se hará considerando la cercanía a costa como criterio explicativo, coherente con la lógica usada por trabajos locales al seleccionar estructuras por distancia costera (Guerrero et al., 2025).

2.1.16.2 Regla de decisión para “condición de durabilidad”

La condición de durabilidad se establecerá integrando:

- Riesgo indirecto de corrosión: por rangos de I_c (Tabla 5).
- Calidad/continuidad del material: por UPU (variabilidad y magnitud relativa dentro de cada estructura).

Así, un elemento con I_c en rango moderado/elevado y VPU relativamente baja o muy dispersa será interpretado como condición menos favorable de durabilidad que otro con I_c bajo/insignificante y VPU más uniforme. Este enfoque respeta la lógica de emplear resistividad para inferir condición corrosiva y VPU como soporte de calidad del hormigón (Guerrero et al., 2025).

| Velocity Criteria for Concrete Quality Grading | | |
|--|--|--------------------------|
| Sr. No. | Average Value of Pulse Velocity by Cross Probing | Concrete Quality Grading |
| | km/s | |
| (i) For Concrete (\leq M25) | | |
| (a) | Below 3.5 | Doubtful [*] |
| (b) | 3.5 – 4.5 | Good |
| (c) | Above 4.5 | Excellent |
| (ii) For Concrete ($>$ M25) | | |
| (a) | Below 3.75 | Doubtful [*] |
| (b) | 3.75 – 4.50 | Good |
| (c) | Above 4.50 | Excellent |

Ilustración 9. Criterios de velocidad de pulso (VPU) para la clasificación de la calidad del hormigón. (Bureau of Indian Standards, 2019).

La ilustración 9, presenta un criterio de interpretación del ensayo de pulso ultrasónico (VPU), basado en la velocidad promedio medida a través del elemento. Para hormigones \leq M25, se considera calidad dudosa cuando la velocidad es $<$ 3.5 km/s, buena entre 3.5–4.5 km/s y excelente cuando es $>$ 4.5 km/s; mientras que para hormigones $>$ M25 los umbrales se ajustan a $<$ 3.75 km/s (dudosa), 3.75–4.50 km/s (buena) y $>$ 4.50 km/s (excelente) (BIS, 2019).

Metodología de trabajo de campo: inspección visual y ensayos no destructivos (E1–E3).

2.1.17 Inspección visual preliminar y selección de puntos de medición

Previo a la instrumentación, se realizó una inspección visual preliminar en cada una de las estructuras (E1, E2 y E3) con el objetivo de reconocer su configuración general,

condiciones de exposición y accesibilidad de elementos estructurales. Esta etapa permitió seleccionar elementos representativos para la toma de datos mediante ensayos no destructivos, priorizando vigas y columnas accesibles, así como superficies con condiciones adecuadas para el contacto de los equipos.

La evidencia fotográfica de esta actividad, junto con las vistas generales y la descripción de cada estructura, se presenta en el Anexo fotográfico 1.

2.1.17.1 Descripción de las estructuras y ensayos aplicado

Estructura E1

Durante la inspección visual previa no se identificaron daños estructurales severos que comprometan la estabilidad global del edificio; sin embargo, se observaron condiciones de exposición ambiental urbana, así como elementos constructivos y acabados que evidencian el paso del tiempo y la continua operación del inmueble, factores que pueden influir en el desempeño de durabilidad del hormigón (Guerrero et al., 2025).

En esta estructura se realizaron ensayos no destructivos de resistividad eléctrica del hormigón y velocidad de pulso ultrasónico (VPU), aplicados sobre elementos estructurales seleccionados, principalmente vigas y columnas accesibles. Estos ensayos permiten evaluar de manera indirecta la facilidad de transporte iónico en el hormigón y la calidad y continuidad interna del material, constituyendo una base técnica para el análisis del estado actual del hormigón armado y su comportamiento frente a procesos asociados a la durabilidad (Andrade et al., 2004; Guerrero et al., 2025). La evidencia fotográfica del procedimiento se presenta en los Anexos.

Estructura E2

Desde el punto de vista estructural, el edificio está conformado por un sistema de hormigón armado, compuesto por columnas, vigas y losas, con una planta baja parcialmente abierta sustentada por columnas, tipología común en edificaciones urbanas. Los cerramientos corresponden a elementos no estructurales, principalmente de mampostería.

Durante la inspección visual preliminar no se identificaron daños estructurales evidentes que comprometan la estabilidad global de la edificación. No obstante, se observan condiciones de exposición ambiental urbana, así como variaciones en los acabados y reparaciones localizadas, que podrían incidir en el comportamiento del hormigón en términos de durabilidad a lo largo del tiempo (Guerrero et al., 2025).

En esta estructura se ejecutaron ensayos no destructivos de resistividad eléctrica del hormigón y velocidad de pulso ultrasónico (VPU), aplicados sobre elementos estructurales seleccionados, principalmente columnas y vigas accesibles. Estos ensayos aportan información relevante para el diagnóstico del estado actual del hormigón armado y su desempeño frente a procesos asociados a la durabilidad (Andrade et al., 2004). La evidencia del trabajo de campo se incluye en los Anexos.

Estructura E3

Durante la inspección visual preliminar no se identificaron daños estructurales evidentes que comprometan la estabilidad global del edificio. Sin embargo, se reconocen condiciones de exposición ambiental urbana, así como variaciones en los acabados y signos asociados al envejecimiento natural de los materiales, aspectos que pueden influir en el comportamiento del hormigón en términos de durabilidad (Guerrero et al., 2025). La documentación fotográfica correspondiente se presenta en los Anexos.

2.1.17.2 *Ensayo de resistividad eléctrica del hormigón*

Estructura E1

Las mediciones de resistividad se realizaron utilizando un equipo portátil de cuatro electrodos, dispuesto directamente sobre la superficie del hormigón, conforme a los principios del método de Wenner. Este procedimiento permite estimar la resistividad eléctrica aparente del material a partir de la respuesta eléctrica obtenida entre los electrodos, reflejando las condiciones internas del hormigón en términos de porosidad, contenido de humedad y conectividad de los poros (Andrade et al., 2004).

Los valores obtenidos en los diferentes puntos de medición de la Estructura E1 se registraron para su posterior análisis, permitiendo establecer una caracterización

espacial del comportamiento eléctrico del hormigón en los elementos evaluados. Esta información constituye un insumo fundamental para la interpretación del estado de durabilidad del hormigón armado en la edificación (Guerrero et al., 2025).

Estructura E2

Las mediciones se realizaron sobre elementos estructurales accesibles, principalmente columnas y vigas, seleccionados de manera que representen condiciones típicas de la estructura. Previo a la toma de lecturas, se verificó el estado superficial del hormigón y se acondicionaron las zonas de contacto para asegurar una medición estable, evitando interferencias por polvo, recubrimientos sueltos o irregularidades superficiales.

El procedimiento se desarrolló mediante un equipo portátil de medición superficial, basado en el arreglo de cuatro electrodos (método de Wenner), apoyado directamente sobre la superficie del elemento. La lectura obtenida corresponde a una resistividad aparente influenciada por propiedades internas del hormigón como el contenido de humedad, la conectividad de poros y la compactación del material, factores que condicionan la movilidad de iones dentro de la matriz cementicia (Andrade et al., 2004).

Los valores registrados en los distintos puntos de medición de la Estructura E2 se sistematizaron para su análisis posterior, permitiendo establecer una caracterización comparativa del comportamiento del hormigón en la edificación (Guerrero et al., 2025).

Estructura E3

El procedimiento se desarrolló mediante un equipo portátil de medición superficial basado en un arreglo de cuatro electrodos (método de Wenner), colocado directamente sobre la superficie del elemento estructural. La resistividad obtenida corresponde a una medida aparente del material, influenciada por variables como el contenido de humedad, la conectividad de poros y el grado de compactación, las cuales controlan la movilidad de iones dentro del hormigón (Andrade et al., 2004).

Los valores registrados en los diferentes puntos evaluados de la Estructura E3 fueron sistematizados para su análisis posterior, permitiendo identificar la variabilidad espacial

del comportamiento del hormigón y apoyar el diagnóstico de su condición en términos de durabilidad (Guerrero et al., 2025).

2.1.17.3 *Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU)*

Estructura E1

Las mediciones se realizaron siguiendo el principio de transmisión directa o semidirecta, según las condiciones del elemento, registrándose el tiempo de tránsito del pulso a través del hormigón. A partir de este tiempo y de la distancia conocida entre transductores, se determinó la velocidad de propagación del pulso ultrasónico, parámetro sensible a la densidad, elasticidad y presencia de discontinuidades internas del material (ASTM C597).

Los valores obtenidos en los distintos puntos de la Estructura E1 fueron registrados para su posterior análisis e interpretación, permitiendo establecer una evaluación comparativa de la calidad del hormigón (ASTM C597).

Estructura E2

Las lecturas se realizaron bajo el principio de transmisión directa o semidirecta, dependiendo de la geometría del elemento, registrándose el tiempo de tránsito del pulso entre transductores. Con la distancia previamente establecida entre puntos de medición, se determinó la velocidad de propagación del pulso ultrasónico, parámetro sensible a la densidad del material y a la presencia de discontinuidades internas (ASTM C597).

Los datos obtenidos se organizaron para su posterior análisis, permitiendo caracterizar la variabilidad del hormigón en los elementos evaluados.

Estructura E3

Las mediciones se efectuaron sobre vigas y columnas accesibles, considerando puntos representativos del estado general del hormigón. Se utilizaron transductores ultrasónicos en contacto directo con la superficie del elemento, empleando un material de acoplamiento que facilite la transmisión del pulso y reduzca pérdidas de señal.

La metodología se desarrolló mediante configuraciones de medición directa o semidirecta. Se registró el tiempo de tránsito del pulso y, con la distancia conocida entre transductores, se calculó la velocidad de propagación del pulso ultrasónico, la cual está influenciada por la densidad, elasticidad y homogeneidad del hormigón (ASTM C597).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del estudio de diagnóstico aplicado a las estructuras evaluadas, considerando parámetros indirectos de calidad del hormigón (resistencia a la compresión estimada por esclerometría, velocidad de pulso ultrasónico) y parámetros electroquímicos indirectos asociados a la facilidad de transporte iónico y actividad corrosiva (resistividad eléctrica e intensidad de corriente de corrosión). La presentación se organiza por estructura y por tipo de elemento (vigas y columnas), manteniendo la trazabilidad de los datos mediante las figuras y tablas generadas durante el procesamiento.

Estructura E-3.

Los resultados de resistencia a la compresión estimada (R_c) evidencian un hormigón con desempeño global limitado desde el enfoque de durabilidad, considerando que se trata de una estimación indirecta mediante esclerometría (ilustración 10).

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) mostró valores inferiores a 3,3 km/s en los puntos evaluados, lo que, bajo los rangos de clasificación adoptados en el marco metodológico, corresponde a un hormigón de calidad moderada o regular; los valores más bajos se registraron en columnas (C1, C3 y C5). (ilustración 10).

En resistividad eléctrica (R_s), los valores fueron menores que 10 $k\Omega\cdot cm$, clasificándose como un comportamiento moderado según el criterio de interpretación empleado, lo que sugiere condiciones favorables para mayores intensidades de corrosión (ilustración 11).

En coherencia con lo anterior, la intensidad de corriente de corrosión (I_c) resultó mayor que 1 $\mu A/cm^2$ en vigas y columnas, indicando posibilidad de deterioro

intenso por corrosión atmosférica en el acero de refuerzo, con mayor severidad relativa en columnas (ilustración 11).

Los resultados estadísticos comparativos (Tabla 6.), muestran coeficientes de variación (CV) bajos para los parámetros medidos, lo que respalda la consistencia de las mediciones. Adicionalmente, el análisis de varianza y el ajuste de regresiones lineales múltiples (Tabla 7), permiten mantener organizados los resultados para la comparación posterior entre variables, usando I_c como variable dependiente y R_s -VPU como variables explicativas.

Tabla 6. Valores promedios (P), desviaciones estándar ($D.S$) y coeficiente de variación ($C.V$) para cada parámetro medido en los elementos estructurales. Análisis de varianza (F y p).

| $n=10$ | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|----------|------------|----------------|----------|----------|-----------------|
| <i>Elemento</i> | <i>Parámetro</i> | <i>P</i> | <i>D.S</i> | <i>C.V (%)</i> | <i>F</i> | <i>p</i> | <i>Dif. Sig</i> |
| C1 | <i>R_c</i> (MPa) | 20,068 | 1,38824 | 6,91769 | 0,08 | 0,92 | No |
| C3 | | 19,807 | 1,1786 | 5,9504 | | | |
| C5 | | 19,996 | 1,79379 | 8,97073 | | | |
| V2 | <i>R_c</i> (MPa) | 21,759 | 1,3064 | 6,00394 | 0,12 | 0,87 | No |
| V3 | | 21,611 | 0,86387 | 3,99738 | | | |
| V5 | | 21,832 | 0,69758 | 3,19522 | | | |
| C1 | <i>VPU</i> (km/s) | 2,161 | 0,17266 | 7,98962 | 397,78 | 0 | Si |
| C3 | | 0,761 | 0,103 | 13,53546 | | | |
| C5 | | 0,826 | 0,08168 | 9,88824 | | | |
| V2 | <i>VPU</i> (km/s) | 2,54 | 0,19212 | 7,56388 | 1,26 | 0,29 | No |
| V3 | | 2,489 | 0,20523 | 8,24565 | | | |
| V5 | | 2,648 | 0,27696 | 10,4592 | | | |
| C1 | | 7,33 | 0,23118 | 3,1539 | 359,44 | | |

| | | | | | | | |
|----|-----------------------------|---------|---------|---------|--------|------|----|
| C3 | R_s (kΩ/cm) | 4,6 | 0,26247 | 5,7058 | | 0 | Si |
| C5 | | 5,078 | 0,23465 | 4,62098 | | | |
| V2 | R_s (kΩ/cm) | 9,2 | 0,29814 | 3,24068 | 2,08 | 0,14 | No |
| V3 | | 9,044 | 0,32356 | 3,57766 | | | |
| V5 | | 8,911 | 0,32811 | 3,68205 | | | |
| C1 | I_c (μA/cm ²) | 4,09643 | 0,12885 | 3,14538 | 200,99 | 0 | Si |
| C3 | | 6,54155 | 0,38647 | 5,90789 | | | |
| C5 | | 5,91922 | 0,27396 | 4,62827 | | | |
| V2 | I_c (μA/cm ²) | 3,26399 | 0,10706 | 3,27992 | 2,09 | 0,14 | No |
| V3 | | 3,32091 | 0,11794 | 3,55141 | | | |
| V5 | | 3,37073 | 0,1241 | 3,68164 | | | |

Tabla 7. Regresiones lineales múltiples ajustadas para cada elemento estructural.

| Elemento | Regresión $n = 30$ | R^2 (%) | p |
|----------|-----------------------------------|--------------|--------|
| Columnas | $I_c = 11,32 - 1,13R_s - 0,49VPU$ | 99 | 0,0000 |
| Vigas | $I_c = 6,21 - 0,30R_s - 0,05VPU$ | 88 | 0,0000 |

ESTRUCTURA E-3.

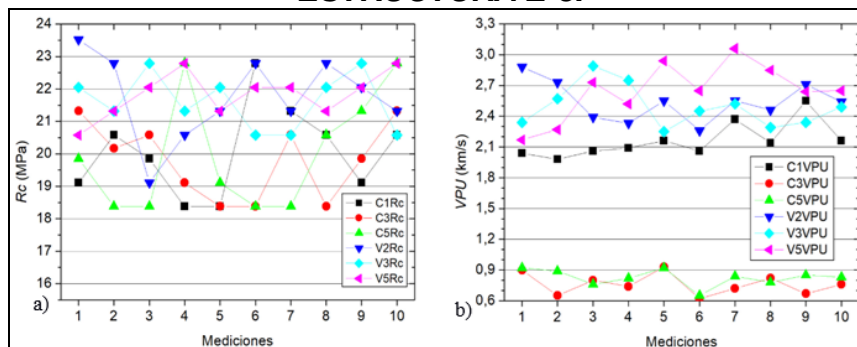


Ilustración 10. Comportamiento de la resistencia a la compresión (R_c) a), y la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) b).

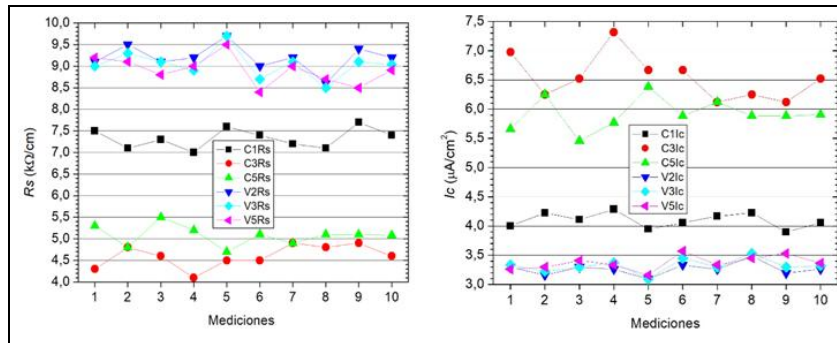


Ilustración 11. Comportamiento de la resistividad (Rs) a), y la intensidad de corriente de corrosión (Ic) b).

Estructura E-1 (Centro Manta).

Para esta estructura se generaron las figuras de comportamiento de R_c -VPU (ilustración 12.) y R_s - I_c (ilustración 13.), manteniendo el mismo esquema de procesamiento aplicado a la E-3.

En el texto de discusión original del procesamiento se indica que, aunque los valores de I_c se mantuvieron por encima de $1 \mu A/cm^2$, en este caso los valores más elevados se presentaron en vigas, a diferencia de lo observado en la estructura anterior.

Asimismo, se reporta que el análisis estadístico arrojó valores bajos de CV y ausencia de diferencias significativas entre parámetros en el diagnóstico, lo cual se interpreta como una condición de mayor homogeneidad del hormigón en la estructura.

De igual forma, el análisis multivariado identifica a R_s y VPU como variables influyentes sobre I_c cuando $p < 0,05$, resaltando que la disminución de R_s y VPU se asocia con mayor I_c .

ESTRUCTURA E-1. CENTRO MANTA

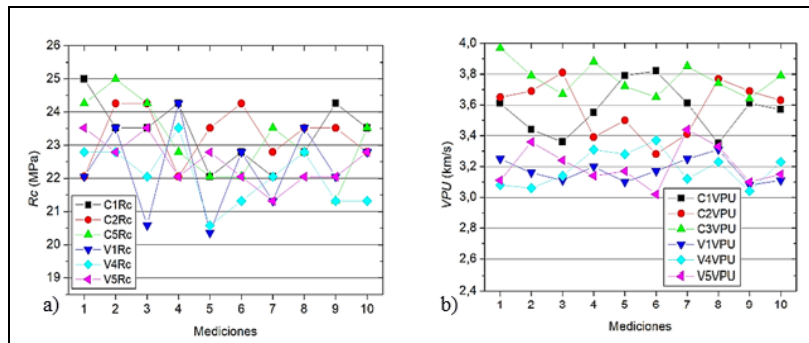


Ilustración 12. Comportamiento de la resistencia a la compresión (R_c) a), y la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) b).

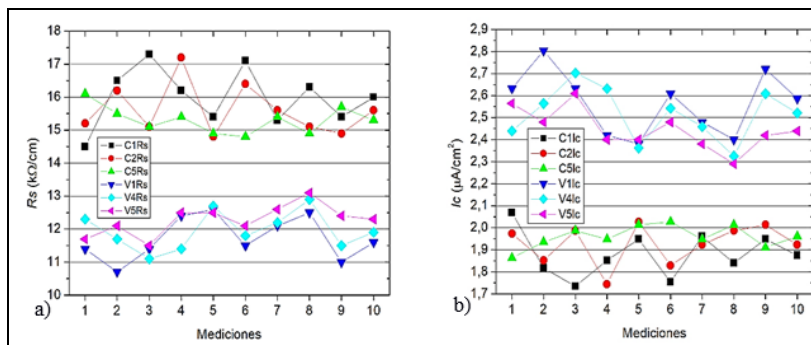


Ilustración 13. Comportamiento de la resistividad (R_s) a), y la intensidad de corriente de corrosión (I_c) b).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPARATIVO

Tabla 8. Valores promedios (P), desviaciones estándar ($D.S$) y coeficiente de variación ($C.V$) para cada parámetro medido en los elementos estructurales. Análisis de varianza (F y p).

| $n=10$ | | | | | | | |
|----------|----------------|--------|---------|-----------|------|------|----------|
| Elemento | Parámetro | P | $D.S$ | $C.V$ (%) | F | p | Dif. Sig |
| C1 | R_c (MPa) | 23,375 | 0,96801 | 4,14123 | 0,12 | 0,88 | No |
| C2 | | 23,302 | 0,85343 | 3,6625 | | | |
| C5 | | 23,155 | 1,16196 | 5,0182 | | | |
| V1 | R_c (MPa) | 22,324 | 1,2953 | 5,80228 | 0,48 | 0,61 | No |
| V4 | | 22,053 | 0,91671 | 4,15685 | | | |
| V5 | | 22,493 | 0,70985 | 3,15588 | | | |
| C1 | VPU (km/s) | 3,571 | 0,15829 | 4,43254 | 0,52 | 0,67 | No |
| C2 | | 3,582 | 0,177 | 4,94136 | | | |
| C5 | | 3,77 | 0,1075 | 2,85137 | | | |

| | | | | | | | |
|----|--------------------------|---------|---------|---------|------|-------|----|
| V1 | VPU (km/s) | 3,174 | 0,07706 | 2,42776 | 0,21 | 0,80 | No |
| V4 | | 3,186 | 0,11394 | 3,57626 | | | |
| V5 | | 3,206 | 0,13285 | 4,14377 | | | |
| C1 | Rs (kΩ/cm) | 16 | 0,86538 | 5,40865 | 2,38 | 0,11 | No |
| C2 | | 15,61 | 0,77093 | 4,93869 | | | |
| C5 | | 15,31 | 0,40401 | 2,63885 | | | |
| V1 | Rs (kΩ/cm) | 11,72 | 0,65115 | 5,55591 | 2,46 | 0,10 | No |
| V4 | | 11,95 | 0,57397 | 4,80312 | | | |
| V5 | | 12,28 | 0,45898 | 3,73766 | | | |
| C1 | Ic (μA/cm ²) | 1,87999 | 0,10261 | 5,45805 | 2,28 | 0,12 | No |
| C2 | | 1,92591 | 0,09155 | 4,75363 | | | |
| C5 | | 1,96072 | 0,05116 | 2,60929 | | | |
| V1 | Ic (μA/cm ²) | 2,56614 | 0,14216 | 5,53977 | 2,53 | 0,009 | No |
| V4 | | 2,51563 | 0,11969 | 4,75777 | | | |
| V5 | | 2,44609 | 0,092 | 3,76108 | | | |

Tabla 9. Análisis multivariado en los elementos estructurales.

| | | P. E | Rc (MPa) | Rs (kΩ/cm) | VPU (km/s) |
|----------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------|---------------|
| Columnas | Ic (μA/cm ²) | r | 0,029 | -0,99 | -0,40 |
| | | p (<0,05) | 0,9 | 0,0000 | 0,02 |
| | | P. E | Rc (MPa) | Rs (kΩ/cm) | VPU (km/s) |
| Vigas | | r | 0,15 | -0,99 | -0,50 |
| | | p (<0,05) | 0,40 | 0,0000 | 0,01 |

P.E: Parámetros estadísticos

Estructura E-2

La E-2 se caracteriza como una estructura con aproximadamente 15 años en explotación y a 1 km de la línea costera, y sus resultados se describen como similares a los de la estructura E-1 (Ilustración 14 y 15).

En la interpretación del procesamiento se señala el uso probable de un hormigón de mejor calidad respecto a la E-3, y se indica que las columnas serían los elementos más afectados (patrón similar al observado en E-3).

En el plano estadístico, se reporta que los valores promedios no mostraron diferencias significativas según F de Fisher y niveles de significación, lo cual respalda la hipótesis de mayor homogeneidad y durabilidad relativa del hormigón empleado en esta estructura; además, se mantienen CV bajos como en las estructuras anteriores.

Finalmente, las regresiones lineales múltiples reiteran como factores influyentes en I_c a la disminución de R_s y VPU.

ESTRUCTURA E-2.

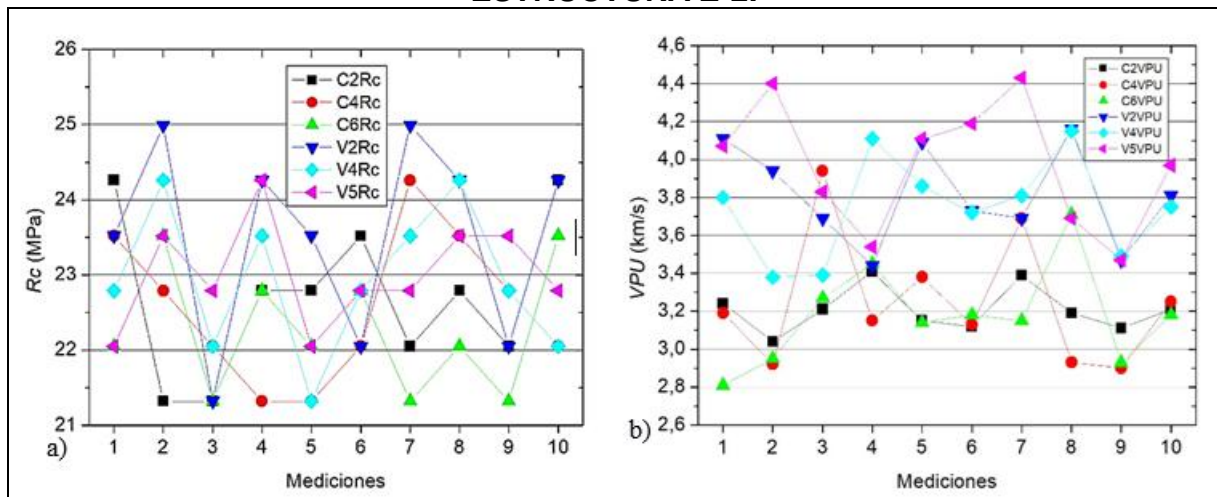


Ilustración 14. Comportamiento de la resistencia a la compresión (R_c) a), y la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) b).

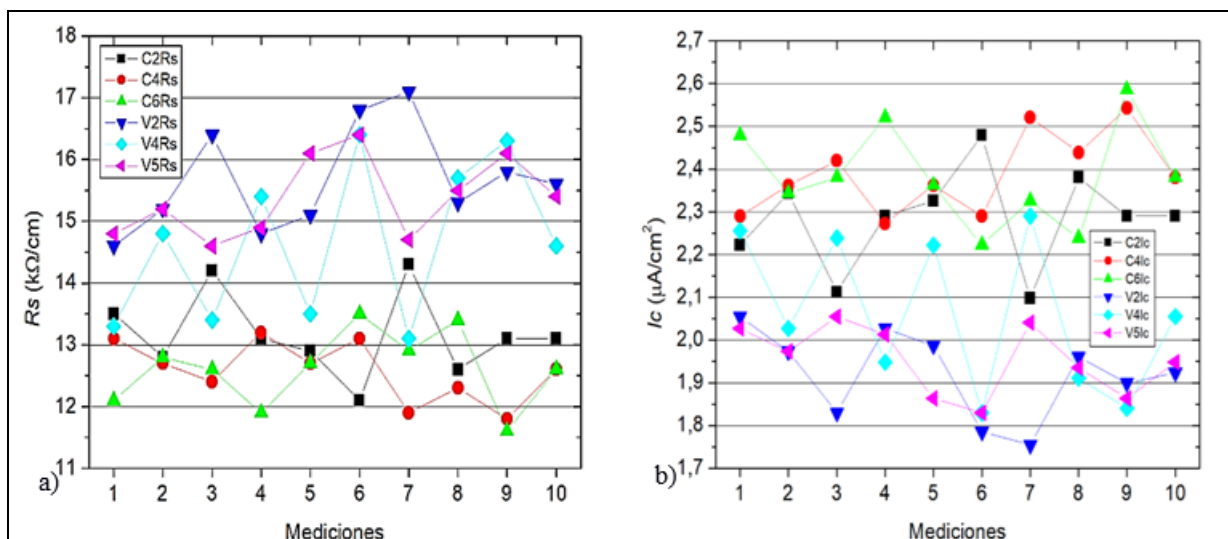


Ilustración 15. Comportamiento de la resistividad (R_s) a), y la intensidad de corriente de corrosión (I_c) b).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPARATIVO

Tabla 10. Valores promedios (*P*), desviaciones estándar (*D.S*) y coeficiente de variación (*C.V*) para cada parámetro medido en los elementos estructurales. Análisis de varianza (*F* y *p*).

| <i>n=10</i> | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|----------|------------|----------------|----------|----------|-----------------|
| <i>Elemento</i> | <i>Parámetro</i> | <i>P</i> | <i>D.S</i> | <i>C.V (%)</i> | <i>F</i> | <i>p</i> | <i>Dif. Sig</i> |
| C1 | <i>Rc</i> (MPa) | 22,715 | 1,06539 | 4,69024 | 0,53 | 0,59 | No |
| C2 | | 22,567 | 0,98285 | 4,35527 | | | |
| C5 | | 22,273 | 0,85104 | 3,82095 | | | |
| V1 | <i>Rc</i> (MPa) | 23,522 | 1,29642 | 5,51152 | 0,98 | 0,38 | No |
| V4 | | 22,935 | 0,96801 | 4,22068 | | | |
| V5 | | 23,008 | 0,69758 | 3,0319 | | | |
| C1 | <i>VPU</i> (km/s) | 3,207 | 0,11748 | 3,66318 | 0,19 | 0,82 | No |
| C2 | | 3,248 | 0,3413 | 10,50795 | | | |
| C5 | | 3,177 | 0,26175 | 8,23885 | | | |
| V1 | <i>VPU</i> (km/s) | 3,813 | 0,25721 | 6,74559 | 1,58 | 0,22 | No |
| V4 | | 3,746 | 0,26722 | 7,13337 | | | |
| V5 | | 3,97 | 0,33456 | 8,42731 | | | |
| C1 | <i>Rs</i> (kΩ/cm) | 13,17 | 0,67831 | 5,15045 | 3,10 | 0,06 | No |
| C2 | | 12,58 | 0,48717 | 3,87257 | | | |
| C5 | | 12,61 | 0,60818 | 4,82304 | | | |
| V1 | <i>Rs</i> (kΩ/cm) | 15,67 | 0,84728 | 5,40704 | 2,99 | 0,06 | No |
| V4 | | 14,65 | 1,27301 | 8,68949 | | | |
| V5 | | 15,37 | 0,64644 | 4,20588 | | | |
| C1 | <i>Ic</i> (μA/cm ²) | 2,28327 | 0,11584 | 5,07327 | 2,96 | 0,06 | No |
| C2 | | 2,388 | 0,09366 | 3,92224 | | | |
| C5 | | 2,3841 | 0,1162 | 4,87407 | | | |
| V1 | <i>Ic</i> (μA/cm ²) | 1,91942 | 0,10153 | 5,28967 | 3,37 | 0,04 | No |
| V4 | | 2,06172 | 0,17851 | 8,65824 | | | |
| V5 | | 1,95493 | 0,08118 | 4,1525 | | | |

Tabla 11. Regresiones lineales múltiples ajustadas para cada elemento estructural.

| <i>Elemento</i> | <i>Regresión</i> <i>n = 30</i> | <i>R²</i> (%) | <i>p</i> |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------|
| Columnas | $Ic = 14,69 - 0,08Rc - 0,18Rs$ | 99 | 0,0000 |
| Vigas | $Ic = 4,21 - 0,30Rs - 0,05VPU$ | 88 | 0,0000 |

3.2 Análisis de resultados

El conjunto de resultados permite comparar el comportamiento de las estructuras desde una lógica de indicadores complementarios: parámetros indirectos de calidad/continuidad del hormigón (R_c y VPU) y parámetros asociados al transporte iónico y actividad corrosiva (R_s e I_c). En la E-3, el patrón combinado de VPU baja, R_s menor a $10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ e I_c mayor a $1 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sugiere un escenario menos favorable para la durabilidad del hormigón y un riesgo potencial elevado de actividad corrosiva, con mayor afectación en columnas.

Esta convergencia es relevante porque evita interpretar un parámetro de forma aislada: cuando R_s disminuye (mayor facilidad de conducción iónica) y VPU disminuye (posibles discontinuidades/heterogeneidad), el comportamiento de I_c tiende a incrementarse, lo cual es coherente con el ajuste multivariado reportado en tu procesamiento.

En contraste, para la E-1 el procesamiento señala un comportamiento estadístico más homogéneo (CV bajos y ausencia de diferencias significativas), interpretado como indicio de un hormigón más uniforme.

Sin embargo, aun con esa mayor homogeneidad, se reporta que I_c supera $1 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y que, en este caso, las vigas muestran los valores más elevados, invirtiendo el patrón observado en E-3.

Esto es útil para discusión: la “homogeneidad” no implica ausencia de corrosión, sino que el deterioro puede estar distribuido de manera más uniforme o condicionado por variables locales (recubrimiento, exposición, humedad retenida, reparaciones puntuales, etc.), aspectos que pueden conectarse con tu inspección visual y el contexto post-2016.

La E-2 replica el comportamiento general de E-1, con una lectura de “mejor calidad” relativa respecto a E-3 y con mayor afectación de columnas, lo que refuerza la idea de

que el tipo de elemento puede condicionar la respuesta a la exposición ambiental (mayor permanencia de humedad, microfisuras, y condiciones de servicio).

Además, el hecho de que en E-1 y E-2 los promedios no muestren diferencias significativas y se mantengan CV bajos sugiere consistencia interna del material evaluado, lo cual fortalece la confiabilidad del diagnóstico comparativo entre estructuras.

Finalmente, un punto transversal del procesamiento es que el modelo multivariado identifica como variables influyentes sobre I_c a R_s y VPU, con niveles de significación reportados $p < 0,05$ y relación asociada a la disminución de ambos parámetros.

Esta relación se puede usar como “hallazgo integrador”: más allá de reportar valores puntuales, el análisis muestra coherencia entre indicadores físicos (VPU), electroquímicos (R_s) y el estimador de actividad corrosiva (I_c), lo cual sustenta el enfoque metodológico de evaluación de condición del hormigón armado mediante ensayos complementarios.

3.2.1 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

ESTRUCTURA E-3.

De acuerdo con el comportamiento de la resistencia a la compresión (R_c -MPa, ilustración. 10 a), los valores indican la existencia de un hormigón armado no muy durable, a pesar de obtenerse de manera indirecta por el ensayo de la esclerometría. Lo mismo ocurre con el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU- km/s). Es de notar como todos los valores resultaron menores que 3,3 km/s , lo cual es indicativo de un hormigón de calidad moderada o regular (ilustración 10. b). Llama la atención, como los valores menores fueron determinados en las columnas (C1, C3 Y C5).

Con relación a la resistividad (R_s - $k\Omega/cm$, ilustración. 11 a), todos los valores obtenidos fueron menores que 10 $k\Omega/cm$, por lo que este parámetro es clasificado como moderado según los rangos de clasificación. De esta forma, es de esperar valores

elevados de intensidad de corriente de corrosión. Aquí también, los valores menores fueron determinados en las tres columnas. Es evidente entonces el comportamiento de la intensidad de corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$, ilustración. 11 b), donde los valores más elevados fueron obtenidos en los mismos elementos estructurales. No obstante, todos los valores, es decir incluyendo los de las vigas, resultaron mayores que $1 \mu A/cm^2$ lo cual indica la posibilidad de un deterioro intenso producto de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en los elementos estructurales analizados. Más en las columnas.

De manera general, todo parece indicar que, a pesar de que el comportamiento de todos los parámetros determinados en el estudio de diagnóstico realizado a la estructura, indicaron un deterioro quizás anticipado en el tiempo producto a la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, los elementos estructurales más afectados fueron las columnas.

Con relación al análisis estadístico comparativo, es de notar como los valores del coeficiente de variación (CV-%) resultaron muy bajos en los cuatro parámetros determinados en las vigas y las columnas, es decir, con una variación muy baja. Por tanto, los valores de las mediciones pueden considerarse precisos. Se trata de un factor muy fundamental a la hora de analizar e interpretar los resultados. Por otra parte, el análisis de varianza permite demostrar, como la mayoría de los parámetros no mostraron diferencias significativas a partir de sus valores promedios (P) (Tabla. 6.). De esta forma se demuestra, que el deterioro por corrosión atmosférica es homogéneo en toda la estructura. Cabe la posibilidad del uso de un hormigón de calidad moderada que no garantiza plazos elevados de vida útil de proyecto a la propia estructura.

Diferencias significativas entre los parámetros VPU, R_s , I_c en las vigas y columnas debido a valores muy elevados de la F de Fisher y cero en cuanto al nivel de significación (p) confirma el uso de un hormigón de calidad moderada y quizás mala, indicativo de una calidad inadecuada (Tabla. 6.).

El ajuste de las regresiones lineales múltiples permitió confirmar, como una disminución de la resistividad y la velocidad de pulso ultrasónico, resultaron los factores más influyentes en la intensidad de corriente de corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado para ambos elementos estructurales (Tabla. 7.). Los 30 valores de I_c 10 para cada elemento estructural fueron tomados como la variable dependiente y las independientes los 30 de R_s y VPU .

ESTRUCTURA E-1.

Esta estructura con 40 años en explotación, se encuentra emplazada a una distancia desde la línea costera o zona mayor del rompiente de las olas de 0,5 km. Distancia muy inferior en comparación con la estructura anterior la cual estuvo emplazada a una distancia de 4 km de la línea costera y con un menor tiempo de explotación (25 años).

Por tanto, un deterioro mayor producto a la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en los elementos estructurales analizados es esperado.

Sin embargo, los valores de R_c resultaron mayores al igual que los de VPU (ilustración 12 a y b). Es de notar, como los valores de este último parámetro en las columnas C1, C2 y C3 estuvieron entre 3,5-4,5 km/s, siendo indicativo de un hormigón de buena calidad. La calidad del hormigón en las vigas V1, V4 y V5 resultó moderada. Lo mismo resultó con los valores de R_s (ilustración 12 a). Por tanto, valores menores de I_c - $\mu A/cm^2$ fueron obtenidos a pesar de que la estructura esté emplazada a una distancia menor de la línea costera (ilustración. 12 b). No obstante, todos los valores fueron mayores que $1 \mu A/cm^2$, siendo los más elevados en las vigas, contrario a lo sucedido en la estructura anterior, siendo los elementos estructurales más afectados por la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

Aquí, el análisis estadístico demostró valores muy bajos del C.V, donde no hubo diferencias significativas entre los cuatro parámetros medidos en el estudio de diagnóstico en la estructura según los valores de la F de Fischer de conjunto con los

valores de los niveles de significación que ninguno resultó igual a cero (Tabla. 8). La no existencia de diferencias significativas es un indicador del uso de un hormigón más homogéneo y más durable en la construcción de la estructura.

A pesar de que la estructura está emplazada a una distancia mucho menor de la línea costera, la misma presentó síntomas de un deterioro menor por corrosión atmosférica, en comparación con la estructura analizada anteriormente. Se confirma entonces que, cuando se emplea en la construcción de las estructuras, un hormigón con cualidades durables, plazos más elevados de vida útil de proyecto a las estructuras son garantizados principalmente en zonas costeras de elevado potencial constructivo. Las estructuras mantienen en el tiempo su estética, funcionalidad y sobre todo seguridad, sin costos esperados en trabajos de mantenimientos y de reparación. Principalmente estos últimos.

Por otra parte, el análisis estadístico a partir de un análisis multivariado, permitió demostrar los factores más influyentes en la I_c como un indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en los elementos estructurales estudiados (Tabla. 9.). Debido a que los valores del nivel de significación (p) resultaron menores que 0,05, los factores más influyentes resultaron también la R_s y la VPU . Más bien una disminución de la R_s y la VPU según el signo mostrado por el valor del parámetro estadístico (P. E) coeficiente de regresión (r).

ESTRUCTURA E-2.

Esta estructura con 15 años en explotación, emplazada a una distancia de 1 km de la línea costera, los resultados obtenidos en cuanto a los ensayos realizados en el estudio de diagnóstico son similares en comparación con la estructura anterior (ilustraciones. 14 a) y b), ilustraciones. 15 a) y b). Todo parece indicar que también se usó durante su construcción un hormigón de mejor calidad, en comparación con la primera estructura.

En este caso las columnas fueron los elementos estructurales más afectados como sucedió en la primera estructura.

De forma general, estos tipos de estudios de diagnóstico que permiten identificar la patología de las estructuras para después proceder con las labores de reparación y mantenimiento, los resultados permiten identificar qué elementos estructurales fueron los que resultaron más afectados producto del fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

Al igual que en la estructura anterior, los valores promedios (P) tampoco mostraron diferencias significativas según los valores de la F de Fischer y de los niveles de significación (p). Por tanto, es casi seguro la presencia de un hormigón más homogéneo y más durable empleado en la construcción de la estructura. Valores del C.V resultaron también muy bajos como mismo sucedió en las otras dos estructuras (Tabla. 10.).

El ajuste de las regresiones lineales múltiples demostró que los factores influyentes en la I_c fueron también la disminución de la R_s y la VPU (Tabla. 11.).

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- ❖ La obtención de valores representativos mediante mediciones repetidas y su tratamiento estadístico (promedios, dispersión, comparación entre elementos y modelos multivariantes) permitió construir un diagnóstico consistente y comparable de la condición del hormigón armado, reduciendo la dependencia de lecturas aisladas y fortaleciendo la confiabilidad del análisis.
- ❖ La estructura E-3 presenta el comportamiento menos favorable desde el enfoque de condición del material y riesgo asociado a corrosión, al evidenciar simultáneamente indicadores compatibles con menor continuidad/calidad del hormigón (VPU) y un medio con mayor facilidad de transporte iónico (baja resistividad), junto con valores de I_c compatibles con actividad corrosiva relevante. En términos comparativos, la severidad relativa tiende a concentrarse en columnas, lo que sugiere mayor vulnerabilidad de estos elementos frente a condiciones de exposición y servicio.
- ❖ Las estructuras E-1 y E-2 muestran, en general, un comportamiento más homogéneo del material (baja variabilidad estadística), pero mantienen valores de I_c compatibles con actividad corrosiva relevante. El patrón de mayor afectación depende del tipo de elemento: en E-1 predomina en vigas, mientras que en E-2 se aproxima al comportamiento observado en E-3, con mayor severidad relativa en columnas.
- ❖ El análisis multivariable confirma coherencia entre indicadores, evidenciando que la disminución de R_s y VPU tiende a asociarse con incrementos de I_c . Este hallazgo respalda el enfoque metodológico del estudio, al demostrar que la interpretación del riesgo no se basa en un único ensayo, sino en la respuesta integrada de parámetros físicos (VPU y R_c estimada) y electroquímicos (R_s e I_c).
- ❖ En el contexto post-terremoto 16/04/2016, los resultados constituyen un diagnóstico actualizado del estado del material en estructuras que han

continuado en operación. Sin asumir daños sísmicos específicos, el estudio aporta evidencia técnica para priorizar acciones de inspección y mantenimiento orientadas a durabilidad, especialmente en estructuras con indicadores combinados menos favorables.

Recomendaciones

- ❖ Monitoreo periódico focalizado: Implementar un seguimiento semestral o anual (según accesibilidad y criticidad) repitiendo al menos resistividad (R_s) y I_c en puntos representativos, complementados con VPU en los sectores de mayor severidad. Priorizar: columnas en E-3 y E-1; vigas en E-1.
- ❖ Inspección detallada en zonas críticas: En puntos con mayores valores de I_c y menor R_s , realizar inspección visual sistemática de fisuración, desprendimientos, humedad retenida y evidencias de corrosión, para vincular la lectura indirecta con manifestaciones de deterioro y mejorar la toma de decisiones.
- ❖ Estandarización del protocolo para comparabilidad: Mantener el mismo procedimiento de medición (preparación de superficie, ubicación de puntos, número de lecturas, condiciones de ensayo y registro) para que futuras campañas sean comparables. Documentar en anexos croquis, fotos por punto y bitácora de campo.
- ❖ Gestión preventiva de durabilidad en ambiente costero: Aplicar medidas preventivas orientadas a reducir ingreso/retención de humedad y agentes agresivos (manejo de drenajes, control de filtraciones, protección superficial compatible en zonas expuestas), priorizando los elementos identificados con mayor severidad relativa. Estas acciones deben enfocarse en prolongar la vida útil del recubrimiento y disminuir condiciones favorables para corrosión.
- ❖ Uso práctico de resultados para decisión: Emplear la jerarquización obtenida (por estructura y por elemento) como base para un plan simple de mantenimiento preventivo y priorización de inspecciones, manteniendo el alcance en condición del material y sin plantear rediseños o refuerzos estructurales.

BIBLIOGRAFÍA

American Concrete Institute. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary. American Concrete Institute.

Castañeda-Valdés, A., Corvo, F., Marrero-Águila, R., Fernández-Domínguez, A., & Del Angel-Meraz, E. (2023). The service life of reinforced concrete structures in an extremely aggressive coastal city. Influence in concrete quality. *Materials and Structures*, 56, 12.

Delgado Anchundia, J. M., & Zambrano Moreira, M. D. (2017). Estudio de deposición de iones cloruros para conocer el comportamiento de la velocidad de corrosión entre Bahía de Caráquez y San Vicente. Manabí–Ecuador. Fase I .Tesis grado. Universidad Técnica de Manabí.

Domínguez, J. A., Castro, D. M., & Matos, R. H. (1987). Introducción a la corrosión y protección de metales. Facultad de Procesos Químicos y Alimentarios.

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Formato de Proyecto de graduación. Documento institucional (Word). (Archivo del proyecto)

Guerra, J. C., Castañeda, A., & Howland, J. J. (2016). Estudio preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el puente de los Caras, Manabí, Ecuador. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 47, 17–30.

Guerra Mera, J. C. . (2023). ESTUDIO DEL DESEMPEÑO POR DURABILIDAD DEL HORMIGÓN EN UNA ZONA DEL PERFIL COSTERO DE MANABÍ, ECUADOR. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 54(1), 238-241. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4092>

Guerra Mera, J. C., Castañeda Valdés, A., Pin Mera, M. G., Pin Palma, M. M., & Pisco Suarez, J. L. (2023). Corrosividad de la atmósfera sobre el acero al carbono en una zona costera del cantón Manta en Manabí, Ecuador. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 54(1), 166-182. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4071>

Guerrero Zambrano, J. N., Mendoza Loor, E. A. ., & Guerra Mera, J. C. (2025). EVALUACIÓN DEL DETERIORO POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN UNA ZONA COSTERA DE PEDERNALES, MANABÍ ECUADOR. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 56(1), 081-099. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4227>

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (1976). Guía popular de construcción sismorresistente (INEN 009). INEN.

Helene, P., & Pazini Figueiredo, E. (2003). Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón (P. Helene & F. Pereira, Eds.). CYTED.

Martínez, G. (2020). ¿Sabes diferenciar entre fisuras o grietas? Aprende a diferenciarlas, tratarlas y prevenirlas.

Moreira Basurto, F. E. ., & Guerra Mera , J. C. . (2024). ANÁLISIS DE AFECTACIONES POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN UNA ZONA COSTERA DE MANTA, MANABÍ ECUADOR. Revista CENIC Ciencias Químicas, 55(1), 078-086. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.cu/index.php/RevQuim/article/view/4146>

Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). (2015). NEC-SE-CG: Cargas no sísmicas.

Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). (2015). NEC-SE-DS: Peligro sísmico – Diseño sismo resistente.

Pérez Véliz, J. A., & Guerra Mera, J. C. (2024). EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO EN ESTRUCTURAS EMPLAZADAS EN MANTA MANABÍ, ECUADOR. Revista CENIC Ciencias Químicas, 55(1), 179-195. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4173>

Rincón Zambrano, D. A. . ., Guerra Mera , J. C. ., & Castañeda Valdés , A. . (2025). ANÁLISIS DE AFECTACIONES POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN CRUCITA, PORTOVIEJO, MANABÍ ECUADOR. Revista CENIC Ciencias Químicas, 56(1), 001-023. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4191>

Schweitzer, P. A. (2010). Fundamentals of corrosion: Mechanisms, causes and preventative methods. Taylor & Francis Group.

Sotomayor C., C. (2020). Entendiendo a las fisuras y grietas en las estructuras de concreto. Consultcreto.

Trocónis, O. R., Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., & Díaz, I. (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado (2.^a ed.). CYTED.

Viña Rodríguez, J., Castañeda Valdés, A., & Valdés Clemente, C. (2021). Corrosión atmosférica: Conceptos básicos y experiencias obtenidas en el clima tropical costero de Cuba. CENIC. Ciencias Químicas, 52, 121–138.

PLANOS Y ANEXOS

**ANEXO A. DESCRIPCION DE ESTRUCTURA E1, E2 Y E3. ENSAYOS NO
DESTRUCTIVOS (RESISTIVIDAD, PULSO ULTRASONICO)**

Anexo fotográfico 1

ESTRUCTURA E-1



DESCRIPCIÓN: La Estructura E1 corresponde a un edificio de tres pisos de uso mixto, que integra locales comerciales en planta baja, oficinas en niveles intermedios y un departamento en el nivel superior. La edificación se ubica en un sector urbano con actividad comercial, formando parte de un entorno consolidado y de circulación vehicular y peatonal frecuente.

Desde el punto de vista estructural, el edificio presenta una tipología típica de edificaciones de mediana altura construidas en hormigón armado, compuesto principalmente por columnas, vigas y losas, con cerramientos no estructurales. En la planta baja se aprecia una configuración funcional asociada a la actividad comercial, con espacios abiertos y accesos directos desde la vía pública.

En términos generales, la edificación se encuentra en operación y conserva su configuración geométrica global sin alteraciones apreciables. Se observan acabados y elementos constructivos propios del uso continuo del inmueble, así como variaciones en los recubrimientos y la apariencia superficial asociadas al

envejecimiento natural de los materiales y a la exposición ambiental urbana, sin que ello implique la identificación de daños estructurales visibles en esta etapa descriptiva.

ESTRUCTURA E-2



DESCRIPCIÓN: La Estructura E2 corresponde a un edificio de tres pisos de uso exclusivamente residencial, destinado a departamentos, ubicado en un entorno urbano consolidado. La edificación forma parte del tejido habitacional del sector y se encuentra actualmente en uso continuo.

Desde el punto de vista estructural, el edificio está conformado por un sistema de hormigón armado, compuesto principalmente por columnas, vigas y losas, con cerramientos de mampostería. La configuración estructural responde a una tipología común de edificaciones residenciales de mediana altura, con distribución vertical de cargas a través de los elementos portantes.

Durante la inspección visual preliminar no se identificaron daños estructurales evidentes que comprometan la estabilidad global del edificio. Sin embargo, se reconocen condiciones de exposición ambiental urbana, así como variaciones en los acabados y signos asociados al envejecimiento natural de los materiales, aspectos que pueden influir en el comportamiento del hormigón en términos de durabilidad.

ESTRUCTURA E-3



DESCRIPCIÓN: La Estructura E3 corresponde a un edificio de tres pisos, ubicado en un entorno urbano consolidado, caracterizado por edificaciones de uso mixto y tránsito vehicular moderado. La edificación presenta uso comercial en la planta baja, mientras que los niveles superiores están destinados a oficinas y/o unidades residenciales, manteniéndose actualmente en funcionamiento.

Desde el punto de vista estructural, el edificio está conformado por un sistema de hormigón armado, compuesto por columnas, vigas y losas, con una planta baja parcialmente abierta, sustentada por columnas, lo cual es típico en edificaciones destinadas a actividades comerciales. Los cerramientos corresponden a elementos no estructurales, principalmente de mampostería.

Durante la inspección visual preliminar no se identificaron daños estructurales evidentes que comprometan la estabilidad global de la edificación. No obstante, se observan condiciones de exposición ambiental urbana, así como variaciones en los acabados y reparaciones localizadas, que podrían incidir en el comportamiento del hormigón en términos de durabilidad a lo largo del tiempo.

Anexo fotográfico 2

ENSAYOS DE RESISTIVIDAD E1



DESCRIPCIÓN: En la Estructura E1 se realizó el ensayo no destructivo de resistividad eléctrica del hormigón con el objetivo de evaluar indirectamente la capacidad del material para restringir el transporte iónico, parámetro estrechamente relacionado con la durabilidad del hormigón armado y el potencial riesgo de corrosión del acero de refuerzo.

El ensayo se ejecutó sobre elementos estructurales seleccionados, principalmente columnas y vigas accesibles, considerando superficies representativas del estado general del hormigón. Previamente a la medición, las superficies fueron acondicionadas para asegurar un adecuado contacto entre el equipo de medición y el hormigón, evitando interferencias asociadas a recubrimientos superficiales sueltos o contaminantes.

ENSAYOS DE RESISTIVIDAD E2



DESCRIPCIÓN:

En la Estructura E2 se ejecutó el ensayo no destructivo de resistividad eléctrica del hormigón con el propósito de caracterizar el comportamiento del material frente al transporte iónico, como indicador indirecto asociado a la durabilidad del hormigón armado y al potencial riesgo de procesos de degradación vinculados al ambiente de exposición.

Las mediciones se realizaron sobre elementos estructurales accesibles, principalmente columnas y vigas, seleccionados de manera que representen condiciones típicas de la estructura. Previo a la toma de lecturas, se verificó el estado superficial del hormigón y se acondicionaron las zonas de contacto para asegurar una medición estable, evitando interferencias por polvo, recubrimientos sueltos o irregularidades superficiales.

ENSAYOS DE RESISTIVIDAD E3



DESCRIPCIÓN: En la Estructura E3 se realizó el ensayo no destructivo de resistividad eléctrica del hormigón con el objetivo de caracterizar el comportamiento del material frente al transporte iónico, como indicador indirecto asociado a la durabilidad del hormigón armado y a la susceptibilidad del sistema a procesos de deterioro en el tiempo.

Las mediciones se efectuaron sobre elementos estructurales seleccionados y accesibles, principalmente vigas y columnas, procurando abarcar puntos representativos del estado general del hormigón en la edificación. Antes de la lectura, se verificaron las condiciones de la superficie y se acondicionó el área de contacto cuando fue necesario, a fin de asegurar una adecuada interacción entre el equipo y el hormigón y reducir variaciones atribuibles a irregularidades superficiales.

Anexo fotográfico 3

ENSAYO DE VELOCIDAD PULSO ULTRASONICO VPU E1



DESCRIPCIÓN: En la Estructura E1 se realizó el ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) con el objetivo de evaluar la calidad y continuidad interna del hormigón, así como identificar posibles heterogeneidades, discontinuidades internas o zonas con variaciones en la compacidad del material.

El ensayo se ejecutó sobre elementos estructurales seleccionados, principalmente vigas y columnas, considerando configuraciones de medición compatibles con la geometría y accesibilidad de los elementos evaluados. Para la transmisión del pulso ultrasónico se emplearon transductores emisor y receptor, colocados en contacto directo con la superficie del hormigón, utilizando un medio de acoplamiento adecuado para garantizar la correcta propagación de la señal.

ENSAYO DE VELOCIDAD PULSO ULTRASONICO VPU E2



DESCRIPCIÓN: En la Estructura E2 se aplicó el ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) con el propósito de evaluar la calidad y continuidad interna del hormigón en elementos estructurales representativos. Este ensayo permite identificar variaciones de compacidad y posibles discontinuidades internas asociadas a cambios en la homogeneidad del material.

El procedimiento se ejecutó sobre vigas y columnas accesibles, seleccionadas en función de su representatividad y condiciones de acceso. Para la medición se utilizaron transductores emisor y receptor, colocados en contacto con el hormigón mediante un medio de acoplamiento, con el fin de asegurar una transmisión adecuada de la señal ultrasónica.

ENSAYO DE VELOCIDAD PULSO ULTRASONICO VPU E3

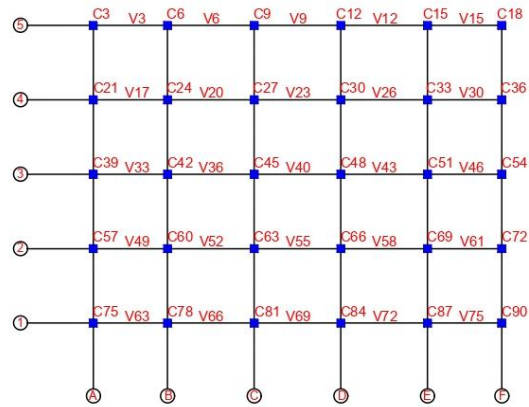
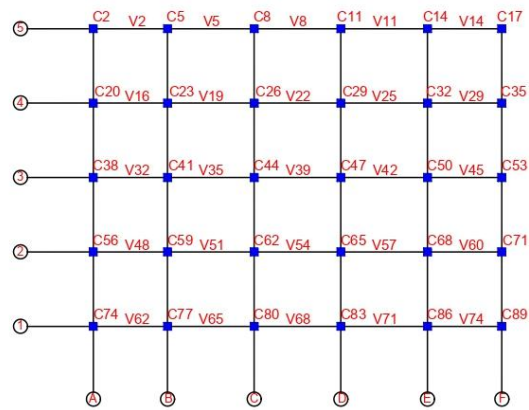
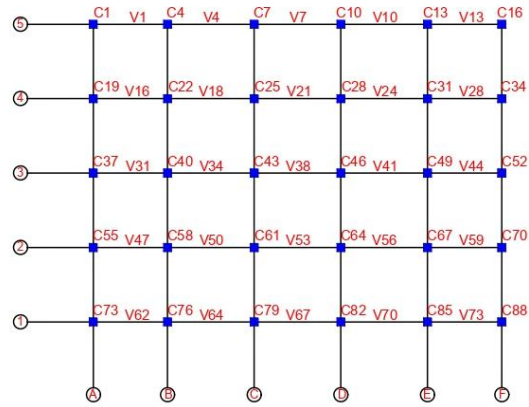


DESCRIPCIÓN: En la Estructura E3 se realizó el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) como técnica no destructiva orientada a evaluar la continuidad interna y calidad del hormigón en elementos estructurales seleccionados. El ensayo se empleó para identificar posibles variaciones internas del material que puedan asociarse a heterogeneidad o cambios de compacidad.

Las mediciones se efectuaron sobre vigas y columnas accesibles, considerando puntos representativos del estado general del hormigón. Se utilizaron transductores ultrasónicos (emisor y receptor) en contacto directo con la superficie del elemento, empleando un material de acoplamiento que facilite la transmisión del pulso y reduzca pérdidas de señal.

**ANEXO B. ESQUEMA Y DISTRIBUCIÓN DE COLUMNAS Y VIGAS DE
ESTRUCTURA 1 (E1), ESTRUCTURA 2 (E2), ESTRUCTURA 3 (E3)**

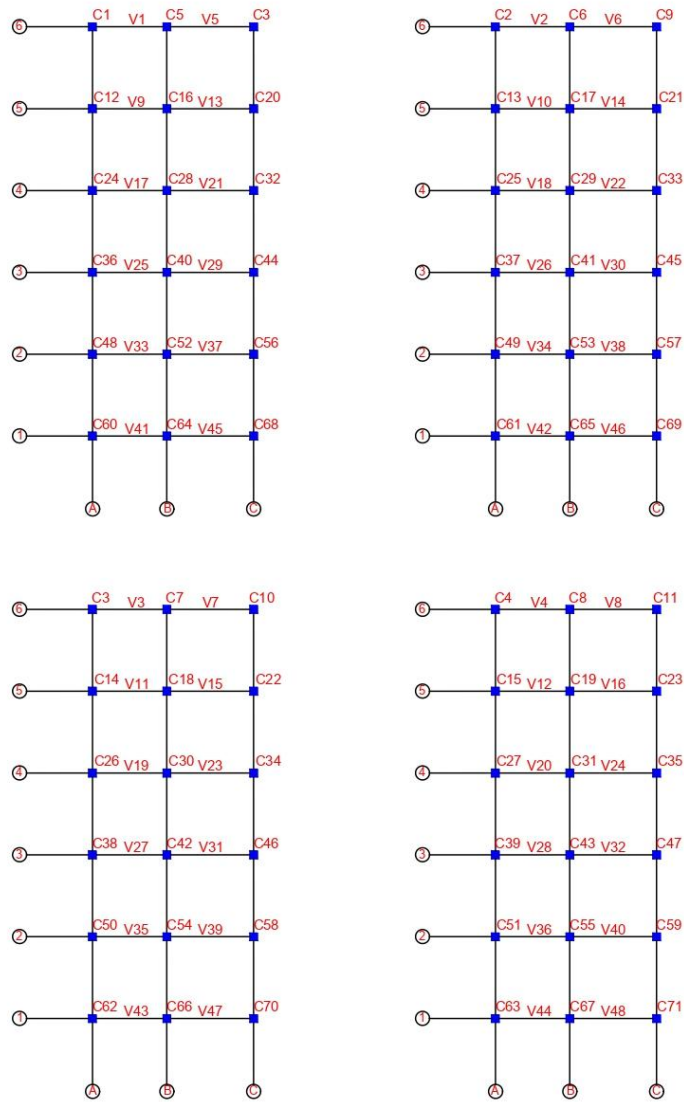
ESTRUCTURA 1 - E1



PROYECTO:
EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN
ARMADO EN TRES ESTRUCTURAS EN MANTA POSTERIOR
AL SISMO DEL 2016 CON ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

CONTENIDO: ESQUEMA Y
DISTRIBUCIÓN DE VIGAS Y COLUMNAS
INSPECCIÓN: ING. MIGUEL ÁNGEL
BALCÁZAR BALCÁZAR

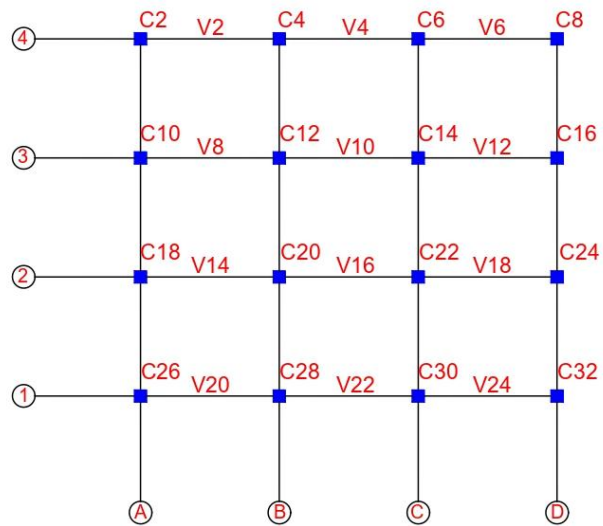
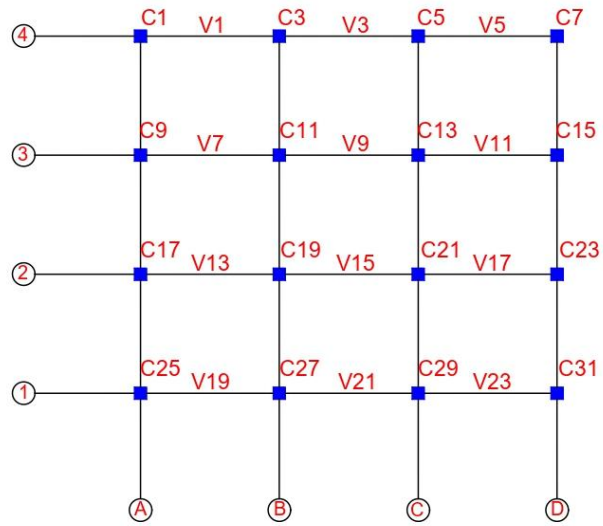
ESTRUCTURA 2 - E2



PROYECTO:
EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN
ARMADO EN TRES ESTRUCTURAS EN MANTA POSTERIOR
AL SISMO DEL 2016 CON ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

CONTENIDO: ESQUEMA Y
DISTRIBUCIÓN DE VIGAS Y COLUMNAS
INSPECCIÓN: ING. MIGUEL ÁNGEL
BALCÁZAR BALCÁZAR

ESTRUCTURA 3 - E3



PROYECTO:
EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN
ARMADO EN TRES ESTRUCTURAS EN MANTA POSTERIOR
AL SISMO DEL 2016 CON ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

CONTENIDO: ESQUEMA Y
DISTRIBUCIÓN DE VIGAS Y COLUMNAS
INSPECCIÓN: ING. MIGUEL ÁNGEL
BALCÁZAR BALCÁZAR