

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación y rehabilitación de elementos estructurales deteriorados
“Vigas y Columnas” de hormigón armado de un edificio de 3 pisos en
Guayaquil.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Magister en Ingeniería Civil con Mención en Construcción Y Saneamiento

Presentado por:

BYRON PATRICIO BAQUE CAMPOZANO

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todas las personas que han sido un pilar fundamental en mi vida y que me han impulsado a alcanzar este objetivo. A mis padres, mi hija y mis hermanos por su amor incondicional, apoyo constante y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis amigos y compañeros, que siempre estuvieron a mi lado, brindándome su confianza y motivación para continuar cuando más lo necesitaba. A mis profesores, por su dedicación, enseñanzas y por creer en mi potencial, orientándome en cada paso de este proceso.

Y a una persona maravillosa que apareció en mi vida, cuyo apoyo y palabras de aliento me impulsaron a seguir mis sueños incluso en los momentos de duda y dificultades. Gracias por hacerme creer en mí mismo y por ser una fuente de inspiración constante.

A todos ustedes, les agradezco profundamente por su amor, apoyo y por estar presentes en este logro tan importante para mí. Sin ustedes, este objetivo no hubiera sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de este proceso y han contribuido de manera significativa en el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, agradezco al Dr. Eduardo Santos Baquerizo, mi tutor de tesis, por su valioso apoyo, orientación y constante motivación. Su experiencia y conocimientos fueron cruciales para el éxito de este proyecto, y su compromiso con mi formación profesional me inspiró a dar lo mejor de mí en cada etapa.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), y a todos los profesores de la maestría, por brindarme la oportunidad de formarme en una institución de prestigio, donde he adquirido conocimientos fundamentales para mi desarrollo académico y profesional. Agradezco profundamente a la institución por crear un entorno propicio para el aprendizaje y el crecimiento.

A todas aquellas personas que en el camino me extendieron su mano, me brindaron su apoyo y creyeron en mí. Su confianza y generosidad fueron clave para continuar cuando las dificultades se presentaban.

Agradezco también a mi familia y amigos cercanos por su apoyo incondicional y por siempre estar presentes, brindándome el aliento necesario para llegar hasta aquí.

Declaración Expresa

Yo Byron Patricio Baque Campozano, acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 07 de marzo del 2025

Ing. Byron Patricio Baque Campozano

EVALUADORES

Ing. Samantha T. Jimenez Oyola. Phd

PROFESORA DE LA MATERIA

Ing. Fernanda E. Mejía Peralta, M.Sc.

PROFESORA DE LA MATERIA

.....
Ing. Eduardo Alberto Santos Baquerizo PhD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La evaluación y rehabilitación de elementos estructurales deteriorados es un proceso esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de las construcciones. En este proyecto se realizó un diagnóstico estructural integral de un edificio de tres pisos ubicado en Guayaquil, enfocado en el análisis de dos columnas y una viga. El objetivo principal es identificar el grado de deterioro de estos elementos, especialmente debido a la carbonatación y la resistencia insuficiente del concreto. Partiendo de la evaluación inicial se plantea que los elementos más afectados presentan riesgos para la seguridad, lo que justifica la necesidad de intervenciones para preservar la estructura a largo plazo.

Para el desarrollo de este proyecto, se realizaron ensayos destructivos y no destructivos, como pachometría, esclerometría y extracción de núcleos, para evaluar la resistencia del concreto y la profundidad de la carbonatación. Además, se utilizó el modelado estructural en ETABS para simular la respuesta de la estructura ante diferentes cargas. Las normativas como la NCE15 y ACI 318 -19, fueron seguidas para asegurar la fiabilidad de los resultados.

Los resultados obtenidos indicaron que las columnas B3 y viga C1 PA presentaron relativa baja resistencia y carbonatación avanzada, mientras que las columnas B4 y C1 PA mostraron un buen estado estructural. Se recomendó realizar intervenciones como encamisado de concreto y tratamientos preventivos, junto con un plan de monitoreo periódico, a fin de que con la rehabilitación de los elementos estructurales deteriorados se garantizará la seguridad y prolongará la vida útil del edificio.

Palabras clave: rehabilitación estructural, carbonatación, ensayos destructivos, ensayos no destructivos, modelado estructural.

ABSTRACT

The evaluation and rehabilitation of deteriorated structural elements is an essential process to ensure the safety and durability of buildings. In this project, a comprehensive structural diagnosis of a three-story building located in Guayaquil was carried out, focusing on the analysis of two columns and a beam. The main objective is to identify the degree of deterioration of these elements, especially due to carbonation and insufficient concrete strength. Based on the initial assessment, it is proposed that the most affected elements present safety risks, which justifies the need for interventions to preserve the structure in the long term.

For the development of this project, destructive and non-destructive tests, such as pachometry, sclerometry and coring, were performed to evaluate the strength of the concrete and the depth of carbonation. In addition, structural modeling in ETABS was used to simulate the response of the structure to different loads. Standards such as NCE15 and ACI 318-19 were followed to ensure the reliability of the results.

The results obtained indicated that columns B3 and beam C1 PA showed relatively low resistance and advanced carbonation, while columns B4 and C1 PA showed a good structural condition. Interventions such as concrete jacketing and preventive treatments were recommended, together with a periodic monitoring plan, so that the rehabilitation of the deteriorated structural elements would guarantee safety and prolong the useful life of the building.

Key words: structural rehabilitation, carbonation, destructive testing, non-destructive testing, structural modeling.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE PLANOS	XVI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVII
CAPÍTULO 1	18
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Antecedentes.....	19
1.2 Localización	20
1.2.1 Ubicación del Proyecto	20
1.3 Estudios previos	21
1.4 Definición del problema	22
1.5 Justificación	23
1.6 Objetivos.....	25
1.6.1 Objetivo General	25
1.6.2 Objetivos Específicos.....	25
CAPÍTULO 2	26
2. DESARROLLO DEL PROYECTO	26
2.1 Marco conceptual	26
2.1.1 Hormigón Armado.....	26
2.1.2 Hormigón armado como material para elementos estructurales.....	27
2.1.3 Propiedades mecánicas del hormigón armado	28
2.1.4 Corrosión en Armaduras de Acero	29
2.1.4.1 Impacto de la Corrosión en las Estructuras.....	30
2.1.5 Evaluación del Estado Estructural	31
2.1.6 Rehabilitación de estructuras	33
2.1.7 Tipo de rehabilitación.....	34
2.1.8 Encamisado de hormigón armado.....	35
2.1.9 Fibra de carbono reforzado	36
2.1.10 Refuerzo con perfiles metálicos.....	37

2.1.11	Refuerzo a nivel de fisura y grietas	39
2.1.12	Apuntalamiento para rehabilitación de elementos estructurales vigas y columnas.	40
2.1.13	Tipos de patologías de fallas	40
2.1.13.1	Procesos constructivos	43
2.1.13.2	Mal proceso constructivo	43
2.1.13.3	Falla de suelo.....	44
2.1.13.4	Tipo de daños	45
2.1.13.5	Flexión.....	46
2.1.13.6	Torsión	47
2.1.13.7	Cortante	47
2.1.13.8	Asentamiento	48
2.1.14	Ensayos no destructivos.	48
2.1.14.1	Pachometría.....	49
2.1.14.2	Esclerometría.....	50
2.1.15	Ensayos Destructivos	51
2.1.15.1	Extracción de núcleos.....	52
2.1.15.2	Ensayos de Carbonatación en el Hormigón	53
2.1.16	Modelación Computacional ETABS.....	54
2.2	Marco metodológico	56
a.	Diagrama de Flujos del Proceso Metodológico	56
b.	Tipo y diseño de la investigación.....	57
2.2.1	Trabajo de campo	57
c.	Técnicas de recolección de datos y observación directa.....	58
d.	Inspección visual o fase de observación	60
2.2.2	Trabajo de laboratorio o gabinete.....	63
2.2.2.1	Ensayos no destructivos	63
2.2.2.2	Ensayos destructivos	65

2.2.3	Tabulación de datos.....	68
2.2.3.1	Ensayo de extracción de núcleos.....	68
2.2.3.2	Ensayos de esclerometría	69
2.2.3.3	Ensayos de carbonatación.	70
2.2.3.4	Ensayo de pachometria	73
2.2.3.5	Análisis de los daños detectados	75
2.2.3.6	Evaluación de la capacidad portante.....	75
2.2.3.7	Evaluación del estado actual estructural	75
2.2.3.8	Modelo matemático y configuración estructural	76
2.2.3.9	Modos de vibración.....	76
2.2.3.10	Análisis Espectral.....	79
2.2.3.11	Deformaciones Verticales.....	79
2.2.3.12	Comprobación de cortante basal estático y dinámico acorde a NEC-15.....	82
2.2.3.13	Resultados del análisis modal	83
2.2.3.14	Deformaciones y Desplazamientos	83
2.2.3.15	Comparación con el Límite Normativo	84
2.2.4	Solución a diseñar	84
2.2.4.1	Planteamiento de la solución estructural.....	84
2.2.4.2	Diseño estructural de la propuesta de rehabilitación	86
CAPÍTULO 3		87
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	87
3.1	Resultados.....	87
3.1.1	Ensayos destructivos	88
3.1.1.1	Extracción de núcleos.....	88
3.1.1.2	Carbonatación en el Hormigón	89
3.1.2	Ensayos no destructivos	89
3.1.2.1	Pachometría.....	89

3.1.2.2	Esclerometría.....	91
3.2	Análisis de Resultados	92
3.2.1	Ensayos destructivos	92
3.2.2	Extracción de Núcleos	92
3.2.2.1	Análisis de los resultados del ensayo de extracción de núcleos: ..	93
3.2.2.2	Conclusiones y Recomendaciones:	95
3.2.3	Carbonatación en el Hormigón	96
3.2.3.1	Columna B3 (Planta Baja)	97
3.2.3.2	Recomendación técnica para Columna B3:	97
3.2.4	Ensayos no destructivos	99
3.2.5	Ensayo de detección de armadura ensayo de pachometría.	99
3.2.6	Ensayo de Esclerometría.....	101
3.2.7	Especificaciones Técnicas.....	104
3.2.7.1	Presupuesto referencial.....	104
3.2.7.2	Especificaciones Técnicas.....	105
3.3	Diseño de la solución	111
3.3.1	Propuesta de rehabilitación	111
3.3.2	Memorias de cálculo	112
3.3.3	Planos y anexos.....	113
3.3.3.1	Detalles de reforzamiento estructural de dos columnas ejes B3 y B4 y viga PB.....	113
CAPÍTULO 4		116
3.4	Conclusiones Y Recomendaciones.....	116
3.4.1	Conclusiones.....	116
3.4.2	Recomendaciones	118
4.	BIBLIOGRAFIA	120

ABREVIATURAS

FRP: Polímero Reforzado con Fibra (Fiber Reinforced Polymer).

GFRP: Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (Glass Fiber Reinforced Polymer).

CFRP: Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (Carbon Fiber Reinforced Polymer).

MICP: Precipitación de Calcita Inducida por Microorganismos (Microbially Induced Calcite Precipitation).

NDT: Ensayos No Destructivos (Non-Destructive Testing).

END: Evaluación No Destructiva (Non-Destructive Evaluation).

ETABS: Software para Análisis y Diseño Estructural (Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems).

NEC: Norma Ecuatoriana de la Construcción (Ecuadorian Construction Standard).

ACI: Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute).

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: <i>Tipos de Rehabilitación y sus Aplicaciones</i>	34
Tabla 2-2: <i>Tipos de más comunes de patologías estructurales</i>	42
Tabla 2-3 Resultados de ensayos de compresión en núcleos de concreto.....	69
Tabla 2-4: <i>Resultados de ensayos de esclerometría</i>	70
Tabla 2-5 Resultado de ensayo de carbonatación	72
Tabla 2-6: <i>Resultados de ensayos de detección de varillas.</i>	74
Tabla 2-7: Deformaciones Verticales.....	82
Tabla 2-8: Cortante Basal Estático	82
Tabla 2-9: Cortante Dinámico Sismo X	82
Tabla 2-10: Cortante Dinámico Sismo Y	83
Tabla 2-11: Resultados del análisis modal.....	83
Tabla 2-12: Comparación de desplazamientos horizontales	84
Tabla 3-1: Ensayo de extracción de núcleos.....	93
Tabla 3-2: Resultados evaluación de carbonatación	97
Tabla 3-3: Ensayo de detección de armadura ensayo de pachometría.....	100
Tabla 3-4: Resultados ensayo esclerometria	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ubicación del Proyecto.....	20
Figura 1-2 Figura del edificio analizado.....	21
Figura 2-1: Estructura interna del hormigón armado.....	26
Figura 2-2 Tipos de fibras utilizadas en hormigón armado.. ..	27
Figura 2-3: Estructura interna del hormigón reforzado con fibras de acero.....	29
Figura 2-4: <i>Evaluación e impacto de la corrosión en estructuras..</i>	31
Figura 2-5. Corrosión en Armaduras de Hormigón.	32
Figura 2-6. <i>Métodos de inspección de concreto.</i>	32
Figura 2-7: Rehabilitación de estructura metálica en edificio de once plantas.. ..	33
Figura 2-8: Encamisado de columna de concreto armado.....	36
Figura 2-9 Aplicación de Refuerzo Estructural con Fibra de Carbono en Elementos de Hormigón.....	37
Figura 2-10 Refuerzo de pilares con perfiles de acero en una estructura histórica....	38
Figura 2-11: <i>Refuerzo de fisuras en concreto mediante adhesivo epóxico y anclaje mecánico</i>	39
Figura 2-12: Falla por flexión en una viga de concreto reforzado.....	41
Figura 2-13: Se interrumpe la continuidad de las cargas de la viga.	44
Figura 2-14: <i>Corrosión avanzada en armaduras de concreto reforzado..</i>	45
Figura 2-15: <i>Asentamientos diferenciales visibles en estructuras.</i>	46
Figura 2-16: Aplicación de ensayos no destructivos en una estructura de concreto..	49
Figura 2-17: Ensayo de esclerometría aplicado en una estructura de hormigón.	50
Figura 2-18: Ensayo de esclerometría aplicado en una estructura de hormigón.	51
Figura 2-19: <i>Ensayos destructivos perforaciones (muestras).</i>	52
Figura 2-20: Proceso de extracción de núcleos de hormigón.....	53
Figura 2-21: Ensayo de carbonatación del concreto.....	54
Figura 2-22. <i>Ejemplo de Modelación Computacional en ETABS</i>	55
Figura 2-23 <i>Diagrama de flujos del proceso metodológico.</i>	56
Figura 2-24: Ensayo de esclerometría aplicado en columna	64
Figura 2-25 <i>Ensayo de pachometria en una columna.</i>	65
Figura 2-26: Extracción de núcleos de hormigón en viga	66

Figura 2-27: La imagen muestra tres núcleos obtenidos de distintos puntos de la estructura.	67
Figura 2-27: La imagen muestra aplicación de fenolftaleína, un indicador de pH que permite identificar visualmente las áreas carbonatadas.	67
Figura 2-28: Modelo tridimensional en ETABS del edificio evaluado	76
Figura 2-29: Primer Modo de Vibración (T: 0.459 seg).	77
Figura 2-30: Segundo Modo de Vibración (T: 0.355 seg).	78
Figura 2-31: Tercer Modo de Vibración (T: 0.345 seg)	78
Figura 2-32: Espectro de Respuesta NEC-15	79
Figura 2-33: Deformaciones verticales en viga losa	80
Figura 2-34: Deformaciones Verticales en Viga Cubierta	81
Figura 2-35: Deformaciones Verticales Globales	81
Figura 3-1: Extracción de núcleos	88
Figura 3-2: Proceso de carbonatación en el hormigón	89
Figura 3-3: Aplicación del ensayo de pachometría.	90

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación y rehabilitación de estructuras de hormigón armado han adquirido una importancia creciente en la ingeniería civil, especialmente en entornos urbanos donde el envejecimiento de los edificios compromete su estabilidad estructural y funcionalidad. Este trabajo se centra en el análisis de un edificio de tres niveles ubicado en las calles Lorenzo de Garaicoa Manuel Galecio, en Guayaquil, cuya estructura presenta signos significativos de deterioro en vigas y columnas, elementos esenciales para garantizar la seguridad y durabilidad de las edificaciones.

El hormigón armado, uno de los materiales más utilizados en la construcción, está expuesto a múltiples factores que aceleran su deterioro. Entre estos destacan la acción de cargas dinámicas, la corrosión de las armaduras, los defectos en los materiales utilizados, fallas en el diseño y condiciones ambientales adversas, como la alta humedad y la presencia de cloruros en ambientes costeros (Jiménez et al., 2021). Estos factores, combinados con la ubicación del edificio en una zona de alta actividad sísmica, incrementan su vulnerabilidad y resaltan la necesidad de aplicar técnicas de evaluación y rehabilitación que permitan garantizar su funcionalidad y seguridad estructural.

El propósito de este proyecto es llevar a cabo una evaluación detallada del estado actual del edificio y proponer estrategias de rehabilitación técnica que restablezcan la capacidad portante de sus elementos estructurales. El uso de metodologías avanzadas de diagnóstico, como el modelado computacional mediante el software ETABS, y técnicas no destructivas, permitirá identificar el grado de afectación en las vigas y columnas del inmueble. Estas herramientas proporcionarán un diagnóstico preciso que sirva como base para diseñar e implementar soluciones adecuadas a las necesidades estructurales y normativas del edificio.

La investigación se justifica no solo por la importancia de preservar la seguridad pública, sino también por la necesidad de optimizar los recursos disponibles mediante intervenciones dirigidas y sostenibles. Además, este proyecto contribuye al desarrollo de metodologías replicables que pueden ser aplicadas en futuras rehabilitaciones de estructuras deterioradas en zonas costeras y sísmicas, ofreciendo una solución técnica a una problemática recurrente en contextos urbanos similares.

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas, la evaluación y rehabilitación de estructuras de hormigón armado ha ganado una gran relevancia debido al envejecimiento y deterioro de edificaciones existentes. El hormigón armado, uno de los materiales de construcción más utilizados, presenta un alto riesgo de degradación por múltiples factores como la acción de cargas, efectos ambientales, defectos constructivos y la calidad de los materiales empleados (Jiménez et al., 2021). Estas patologías comprometen la estabilidad, funcionalidad y durabilidad de las edificaciones, siendo fundamental desarrollar estrategias y metodologías para su diagnóstico y rehabilitación.

En este contexto, las vigas y columnas, como componentes críticos que garantizan la estabilidad estructural, son las más afectadas por el deterioro. Entre las causas más comunes se encuentra la corrosión de las armaduras debido a ambientes salinos, un fenómeno frecuente en ciudades costeras como Guayaquil. La penetración de cloruros en ambientes marinos acelera el proceso de oxidación del acero, reduciendo la capacidad portante del elemento estructural (Jiménez et al., 2021).

La evaluación del estado de estructuras deterioradas incluye técnicas destructivas y no destructivas como inspección visual, ultrasonido, esclerometría y análisis de corrosión de las armaduras. Estudios recientes también han integrado metodologías de modelado computacional para prever el comportamiento estructural bajo condiciones extremas (Ezeberry, 2011). Estas herramientas permiten identificar con precisión el grado de daño y seleccionar técnicas de rehabilitación adecuadas.

Dado que Guayaquil está ubicada en una zona de alta actividad sísmica, la evaluación de vulnerabilidad estructural resulta imperativa. La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) establece los parámetros para evaluar la capacidad sísmica de edificaciones existentes, asegurando su cumplimiento con los Estados Límite de Servicio y Seguridad (Viera et al., 2020). El análisis estático no lineal permite simular el desempeño de vigas y columnas sometidas a cargas extremas, identificando fallas críticas y posibles mecanismos de colapso.

La rehabilitación de vigas y columnas deterioradas se puede realizar mediante varias técnicas. La inyección de resinas epóxicas es común para sellar fisuras y mejorar la integridad estructural. El refuerzo con materiales compuestos, como láminas de polímeros reforzados con fibra de vidrio (FRP), ha demostrado ser efectivo para incrementar la capacidad resistente en flexión y cortante (Busnelli et al., 2017). Además,

el uso de morteros poliméricos especializados ayuda a restaurar el volumen y resistencia del hormigón deteriorado.

La integración de evaluaciones técnicas sofisticadas y metodologías innovadoras de rehabilitación resulta fundamental para prolongar la durabilidad de las estructuras de hormigón armado en entornos agresivos. En lo que respecta al edificio de tres niveles en Guayaquil, estas estrategias facilitarán la restauración de su funcionalidad y garantizarán el cumplimiento de las normativas locales actuales, asegurando su seguridad estructural.

1.2 Localización

1.2.1 Ubicación del Proyecto

El edificio que se estudiara para evaluar y rehabilitar tiene la siguiente ubicación:

Calles Lorenzo de Garaicoa y calle Manuel Galecio.

Edificio: Carlos Cañar Córdón

Parroquia: Tarqui.

Ciudad: Guayaquil

Provincia: Guayas

País: Ecuador

Coordenadas geográficas: 2°11'09"S 79°53'10"W

Coordenadas UTM:

NORTE: 9758350.5

ESTE: 623836.5

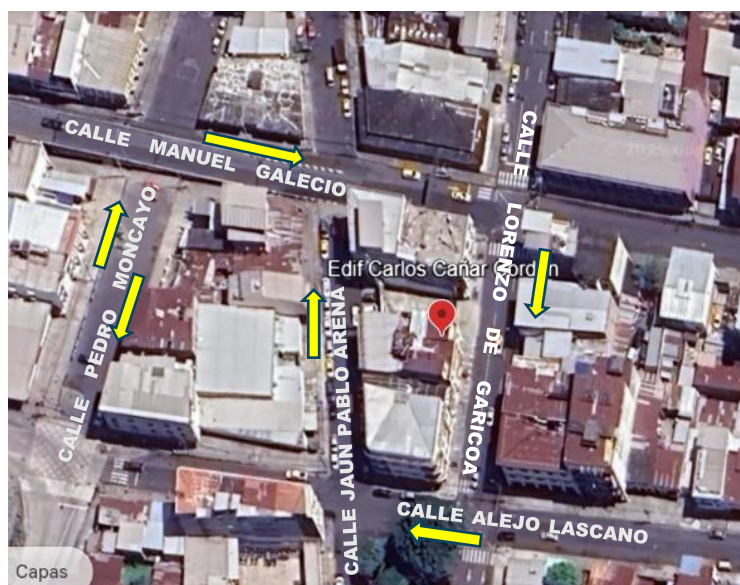


Figura 1-1 Ubicación del Proyecto.

Además, se presenta una vista frontal del edificio en estudio (figura 1-2), que permitirá una mejor comprensión de su estructura y características arquitectónicas para el análisis posterior en este estudio:



Figura 1-2 Figura del edificio analizado.

1.3 Estudios previos

El inmueble situado en las intersecciones de las calles Lorenzo de Garaicoa Manuel Galecio, en la ciudad de Guayaquil, ha sido objeto de inspecciones preliminares realizadas por técnicos del Municipio, a través de la Dirección de Gestión de Riesgo. Estas evaluaciones se efectuaron en dos ocasiones con el propósito de determinar las condiciones estructurales y el peligro que representa para la seguridad pública. Los hallazgos obtenidos son preocupantes, ya que se ha concluido que el edificio presenta graves deficiencias estructurales, lo cual lo hace inhabitable.

En ambos estudios, se constató que la edificación constituye una amenaza inmediata debido a los daños evidentes en su estructura. Se observaron asentamientos irregulares y hundimientos notables en las vigas y columnas de hormigón armado, lo que disminuye significativamente la capacidad de carga del edificio. Además, se identificaron fisura en la mampostería, que podrían estar asociadas a problemas en los cimientos, ya sea por la pérdida de estabilidad del terreno subyacente o por el avance de la corrosión en las armaduras de acero.

Cabe mencionar que la antigüedad del edificio supera los cuarenta años, factor que incrementa su vulnerabilidad frente al deterioro progresivo ocasionado por la fatiga de los materiales y las condiciones ambientales características de la zona costera. La

exposición constante a la humedad y la salinidad propias del clima de Guayaquil agrava la corrosión de las armaduras de acero, debilitando así los elementos estructurales. Sumado a ello, la ubicación del inmueble en una región sísmicamente activa incrementa aún más el riesgo, pues cualquier evento telúrico podría intensificar los daños existentes.

Los resultados de estas evaluaciones preliminares evidencian la urgente necesidad de llevar a cabo una intervención técnica para determinar con exactitud el grado de afectación y diseñar estrategias de rehabilitación acordes a las necesidades del edificio. Esta información será fundamental para el desarrollo de las fases subsiguientes del proyecto, orientadas a restablecer la estabilidad y funcionalidad estructural del inmueble.

1.4 Definición del problema

El envejecimiento y deterioro de las estructuras de hormigón armado es un fenómeno crítico que compromete la seguridad y estabilidad de edificaciones, especialmente en entornos donde factores ambientales y sísmicos exacerban el daño. El edificio de tres niveles ubicado en las calles Lorenzo de Garaicoa y calle Manuel Galecio en la ciudad de Guayaquil presenta evidencias significativas de fisuración, corrosión de las armaduras y pérdida de capacidad resistente en vigas y columnas, lo cual representa un riesgo estructural considerable. Las condiciones ambientales de la zona, caracterizadas por la presencia de humedad y cloruros provenientes del ambiente marino, aceleran el ataque de iones cloruro y la carbonatación del concreto, principales desencadenantes del deterioro en estructuras de hormigón armado (Breysse, 2010; Christodoulou, 2013; James et al., 2019).

Además, la ubicación del edificio en una región con alta actividad sísmica intensifica la vulnerabilidad estructural, ya que los daños acumulados en las vigas y columnas podrían agravarse ante un eventual sismo. Este riesgo, sumado al desgaste natural de los materiales y posibles defectos en la construcción original, compromete de manera progresiva la estabilidad global de la edificación, generando una amenaza directa para la seguridad de los ocupantes y el entorno inmediato (Naji et al., 2021; Shelke, 2024).

Las inspecciones preliminares realizadas han evidenciado deformaciones visibles, grietas longitudinales y transversales en las vigas, así como corrosión avanzada en las armaduras del acero. Estos signos sugieren un deterioro severo en los elementos estructurales clave, que afecta de manera directa su capacidad para soportar las cargas de diseño establecidas. Según Raut et al. (2021) la pérdida de adherencia entre el acero de refuerzo y el hormigón, producto de la corrosión, disminuye notablemente la

resistencia y durabilidad de la estructura, lo que agrava el riesgo de colapso en situaciones de carga extrema o actividad sísmica.

El problema central radica en la ausencia de una evaluación integral que permita determinar con precisión la magnitud y el alcance del daño en las vigas y columnas del edificio. Las técnicas tradicionales, aunque útiles, no son suficientes para identificar la totalidad de las afectaciones estructurales, lo que subraya la necesidad de realizar diagnósticos precisos mediante metodologías no destructivas, capaces de cuantificar el grado de deterioro sin generar daños adicionales en la estructura (Kumar et al., 2021; OjhaP et al., 2021).

El contexto geográfico y ambiental de Guayaquil, combinado con las condiciones de vulnerabilidad sísmica y los procesos de degradación propios del hormigón armado, plantea un escenario crítico que requiere atención urgente para evitar consecuencias mayores. La combinación de factores ambientales, la corrosión de los materiales y la actividad sísmica han llevado al edificio a un estado en el que su capacidad estructural y durabilidad se encuentran gravemente comprometidas.

1.5 Justificación

El deterioro progresivo de las estructuras de hormigón armado, particularmente en vigas y columnas, constituye una preocupación crítica dentro del ámbito de la ingeniería civil, especialmente cuando estas edificaciones se encuentran en entornos agresivos y zonas sísmicas activas. El edificio de tres niveles ubicado en calles Lorenzo de Garaicoa Manuel Galecio en la ciudad de Guayaquil es un claro ejemplo de esta problemática, al evidenciar signos visibles de fisuración, corrosión de armaduras y una notable pérdida de capacidad resistente en elementos estructurales. La exposición prolongada a ambientes salinos y húmedos, característicos de la región costera, ha acelerado el proceso de corrosión del acero de refuerzo debido al ataque de iones cloruro y la carbonatación (Ghobarah et al., 1996; Yin et al., 2023), afectando gravemente la integridad y vida útil de la edificación.

Adicionalmente, la actividad sísmica representa un factor de riesgo determinante en la zona. Guayaquil, al encontrarse en un área de alta vulnerabilidad sísmica, requiere la aplicación de normativas específicas, como la NEC-15, que establecen parámetros fundamentales para garantizar la resistencia de las estructuras ante eventos telúricos. La ausencia de mantenimiento adecuado y la combinación de múltiples factores, como

cargas excesivas y defectos constructivos, han intensificado el grado de deterioro del inmueble, comprometiendo la seguridad estructural y la estabilidad general del edificio.

Para enfrentar estos problemas Ferreira et al. (2020), resalta que resulta imperativa la realización de una evaluación integral de los elementos estructurales deteriorados mediante técnicas de diagnóstico no destructivas. Herramientas como el ultrasonido de pulso, el martillo de rebote y pruebas de corrosión son fundamentales para determinar con precisión el tipo, la magnitud y la extensión de los daños sin afectar adicionalmente la estructura. Estas metodologías permiten identificar las áreas críticas y planificar intervenciones adecuadas que aseguren la recuperación de la capacidad portante de las vigas y columnas.

En cuanto a las estrategias de rehabilitación Sucuoğlu et al. (2004), indica que el uso de polímeros reforzados con fibra de carbono (FRP) se destaca como una solución eficaz para reforzar elementos afectados por la corrosión y mejorar su resistencia. Este método no solo optimiza la intervención estructural, sino que también reduce los costos al evitar la remoción completa del concreto dañado. Por otro lado, los morteros de reparación estructural y los compuestos cementosos de endurecimiento por deformación (SHCC) permiten la recuperación localizada de áreas comprometidas, preservando la funcionalidad original del elemento dañado.

Además, Carvajal et al. (2012) menciona que el tratamiento de la corrosión mediante soluciones electroquímicas, como la protección catódica y el uso de ánodos galvánicos, ha demostrado ser efectivo para frenar el proceso corrosivo y prolongar la vida útil de las estructuras. Estas técnicas son aplicables en edificaciones expuestas a ambientes agresivos y resultan cruciales para garantizar la durabilidad en el tiempo.

Por tanto, el objetivo principal de este estudio es realizar un análisis exhaustivo del estado estructural del edificio, identificando las principales causas de deterioro y diseñando un plan de rehabilitación adaptado a sus condiciones particulares y a las normativas vigentes. La implementación de métodos de diagnóstico avanzados y técnicas de rehabilitación eficientes contribuirá a restaurar la capacidad resistente de los elementos estructurales afectados, garantizando la seguridad y funcionalidad de la edificación en el largo plazo.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

- ✓ Evaluar el estado actual de una viga y dos columnas de hormigón armado deterioradas de un edificio de tres pisos en Guayaquil proponiendo una metodología de rehabilitación adecuada mejorando su capacidad estructural, garantizando la seguridad estructural prolongando la vida útil de la edificación.

1.6.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar un diagnóstico integral del estado de una viga y dos columnas de hormigón armado del edificio, utilizando técnicas de inspección visual con especialistas y ensayos destructivos y no destructivos, identificando el tipo y niveles de daños.
- ✓ Evaluar la capacidad portante actual de una viga y dos columnas deterioradas mediante modelación estructural, considerando las condiciones de carga y los efectos de los deterioros observados, y compararla con las normativas técnicas locales e internacionales (NEC-15, ACI 562-19).
- ✓ Proponer una metodología de rehabilitación integral para una viga y dos columnas afectadas, planteando una adecuada propuesta técnica y de mantenimiento, realizando además un análisis de costo empleando materiales sostenibles.

CAPÍTULO 2

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Hormigón Armado

Según Gu et al. (2016), el hormigón armado es un material compuesto esencial en la ingeniería civil, formado por la combinación de hormigón y barras de acero de refuerzo. Esta combinación aprovecha las propiedades complementarias de ambos materiales: el hormigón es fuerte en compresión, pero débil en tensión, mientras que el acero es fuerte en tensión. Al integrar barras de acero dentro del hormigón, se mejora significativamente la capacidad del material para soportar cargas de tracción, lo que lo hace ideal para una variedad de aplicaciones estructurales, desde puentes hasta edificios.

Los principios básicos de funcionamiento del hormigón armado se centran en la interacción entre el hormigón y el acero. Bajo cargas, el hormigón y el acero trabajan juntos para resistir fuerzas de compresión y tensión, respectivamente. El acero de refuerzo se coloca estratégicamente en áreas donde se anticipan tensiones, como en la parte inferior de una viga sometida a flexión. Esta disposición permite que el hormigón armado soporte no solo cargas estáticas, sino también dinámicas, como las causadas por el viento o los terremotos (Pellegrino et al., 2011). La Figura 2.1 ilustra la estructura interna del hormigón armado, destacando cómo las barras de acero refuerzan el material.



Figura 2-1: Estructura interna del hormigón armado. Fuente: (Byond, 2013).

En la ingeniería civil, el hormigón armado es importante debido a su versatilidad y durabilidad. Es fundamental en la construcción de infraestructuras modernas, permitiendo la creación de estructuras que son no solo fuertes y duraderas, sino también eficientes en términos de costo. Además, con el avance de nuevas tecnologías y materiales, como los polímeros reforzados con fibra, se están desarrollando métodos innovadores para mejorar aún más las propiedades del hormigón armado, ampliando su aplicación en el fortalecimiento y rehabilitación de estructuras existentes (Monaldo et al., 2019).

2.1.2 Hormigón armado como material para elementos estructurales

De acuerdo con Coppola et al. (2022) el hormigón armado es un material estructural ampliamente utilizado en la construcción debido a su durabilidad, capacidad de carga y resistencia a factores ambientales. Una de las principales ventajas del hormigón armado es su durabilidad en ambientes agresivos. La incorporación de refuerzos resistentes a la corrosión, como fibras de acero o polímeros reforzados con fibra (FRP), mejora significativamente la resistencia del hormigón a la degradación ambiental, lo que prolonga la vida útil de las estructuras.

La Figura 2-2 ilustra diferentes tipos de fibras utilizadas en hormigón armado, incluyendo fibras de acero, sintéticas y naturales, que aportan propiedades específicas según su aplicación. Además, el uso de técnicas innovadoras como los inhibidores de corrosión y los agregados impermeabilizantes contribuye a la protección del hormigón armado, asegurando su sostenibilidad y rendimiento a largo plazo (Coppola et al., 2022).

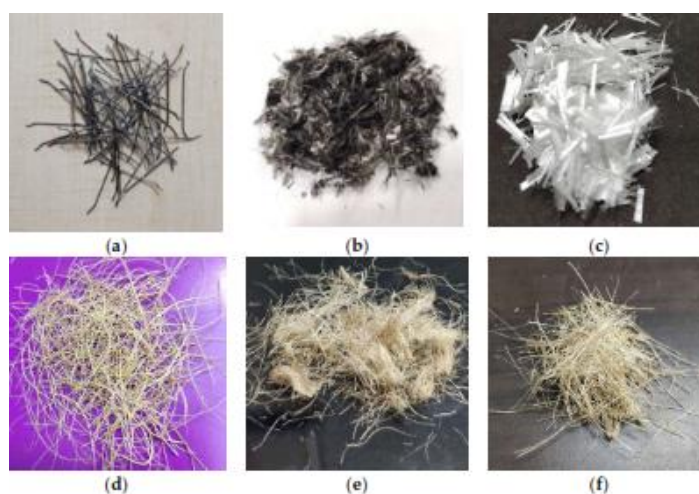


Figura 2-2 Tipos de fibras utilizadas en hormigón armado. Fuente: (More & Subramanian, 2022).

En términos de capacidad de carga, el hormigón armado ofrece una notable mejora en la resistencia mecánica. La adición de fibras, ya sean naturales o artificiales, incrementa la resistencia a la compresión y la ductilidad del hormigón, lo que permite soportar cargas más elevadas sin comprometer la integridad estructural. Por ejemplo, el uso de fibras de acero en el hormigón puede mejorar la capacidad de carga hasta en un 13.69% en comparación con el hormigón convencional (More & Subramanian, 2022).

Además, dentro de los elementos estructurales más importantes en la aplicación del hormigón armado, destacan las vigas y columnas, componentes esenciales en la estabilidad y capacidad de carga de una edificación. Las columnas son los elementos verticales encargados de soportar y transferir las cargas de la estructura hacia la cimentación, lo que las convierte en componentes críticos en el diseño estructural. Su refuerzo debe garantizar resistencia a esfuerzos axiales y laterales, especialmente en regiones de alta actividad sísmica (Al Nuaimi et al., 2020).

Por otro lado, las vigas tienen una función esencial en la transmisión de cargas entre los elementos horizontales y verticales, resistiendo principalmente esfuerzos de flexión y cortante. La combinación de un diseño adecuado de vigas y columnas con refuerzos optimizados mejora la distribución de cargas y minimiza deformaciones excesivas, asegurando una mayor vida útil de la estructura. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de hormigón de alta resistencia y refuerzos con fibras optimiza el desempeño estructural de estos elementos, proporcionando una solución eficaz para edificaciones expuestas a condiciones de carga elevadas y ambientes agresivos.

2.1.3 Propiedades mecánicas del hormigón armado

El hormigón armado es un material compuesto que combina las propiedades del hormigón y el acero para mejorar su rendimiento estructural. Una de las principales propiedades mecánicas del hormigón armado es su resistencia a la compresión. El hormigón, por sí solo, es un material que soporta bien los esfuerzos a la compresión, pero su resistencia puede mejorarse significativamente mediante la adición de fibras de acero. Estudios han demostrado que la incorporación de fibras de acero en el hormigón puede aumentar la resistencia a la compresión en un rango del 10% al 25% (Abbass et al., 2018; Song & Hwang, 2004).

Además, el uso de fibras recicladas de acero también ha mostrado ser efectivo en mejorar la resistencia a la compresión, lo que sugiere una alternativa sostenible para el

refuerzo del hormigón (Grzyski et al., 2019). En la Figura 2-3, se presenta una ilustración de la estructura interna del hormigón reforzado con fibras de acero, mostrando cómo estas fibras se distribuyen de manera homogénea dentro del material, mejorando sus propiedades mecánicas.

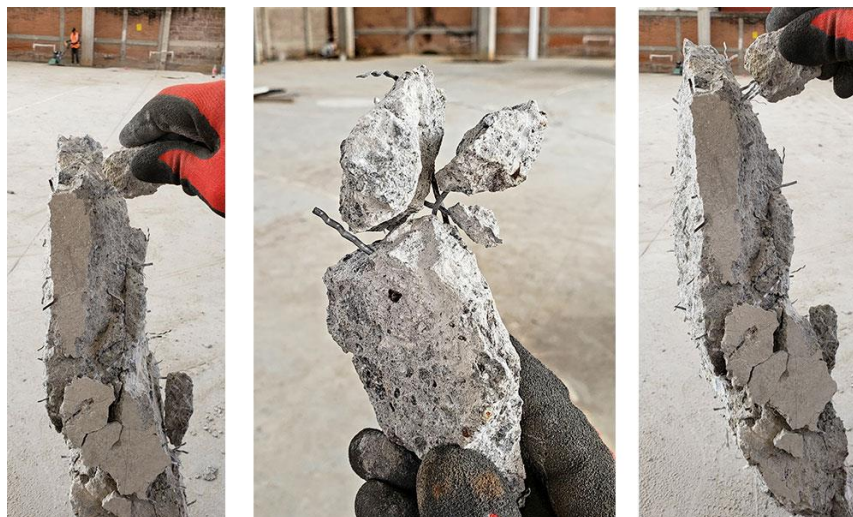


Figura 2-3: Estructura interna del hormigón reforzado con fibras de acero. Fuente: (PSI concreto, 2020).

Otra propiedad mecánica fundamental del hormigón armado es su resistencia a la tracción, que es inherentemente baja en el hormigón convencional. La adición de fibras de acero no solo mejora la resistencia a la tracción, sino que también aumenta la ductilidad del material, permitiendo que el hormigón armado soporte deformaciones significativas antes de fallar. Se ha observado que la resistencia a la tracción puede incrementarse entre un 31% y un 47% con la adición de fibras de acero (Abbass et al., 2018; Grzyski et al., 2019).

Este aumento en la resistencia a la tracción es esencial para prevenir la propagación de grietas y mejorar la durabilidad del material en aplicaciones estructurales. Finalmente, la resistencia a la flexión es otra propiedad mecánica importante del hormigón armado. La flexibilidad y la capacidad de soportar cargas de flexión se ven notablemente mejoradas con la inclusión de fibras de acero. Investigaciones han mostrado que la resistencia a la flexión puede aumentar hasta un 140% en comparación con el hormigón sin fibras (Song & Hwang, 2004).

2.1.4 Corrosión en Armaduras de Acero

Según Rodrigues et al. (2021) la corrosión del acero en estructuras de concreto reforzado es un fenómeno complejo que representa la principal causa de deterioro en estas construcciones. Los mecanismos de corrosión se inician generalmente por la

despasivación del acero, que puede ser inducida por la carbonatación del concreto o la penetración de cloruros. Estos procesos alteran la capa pasiva que protege al acero, permitiendo que el oxígeno y la humedad inicien la corrosión.

Además, Rodrigues et al. (2021) indica que, en ambientes marinos, la alta concentración de cloruros puede provocar corrosión localizada, como la corrosión por picaduras, que es particularmente dañina debido a su naturaleza concentrada y rápida. Además, la heterogeneidad inherente de las estructuras de concreto reforzado y las variaciones locales en la exposición ambiental contribuyen a la corrosión no uniforme, lo que complica aún más la evaluación y el monitoreo de la corrosión.

Durante la propagación de la corrosión, el acero pierde masa y ductilidad, reduciendo la capacidad estructural del concreto reforzado y aumentando el riesgo de fallas bajo cargas cíclicas. Métodos como el potencial de media celda y la tomografía de resistividad identifican áreas de alto riesgo, aunque enfrentan limitaciones en condiciones de campo. La investigación en modelos numéricos y técnicas no destructivas es clave para predecir la vida útil de estructuras y diseñar estrategias de mantenimiento y rehabilitación más efectivas (Apostolopoulos & Papadakis, 2008; Ouzaa & Oucif, 2019).

2.1.4.1 Impacto de la Corrosión en las Estructuras

La corrosión atmosférica afecta significativamente las propiedades dinámicas de las estructuras de acero, aumentando el período de vibración y reduciendo hasta un 60% las fuerzas de reacción en estructuras de alta corrosividad (clase C4). La corrosión por picaduras, común en ambientes marinos, es especialmente peligrosa por su capacidad de causar fallos catastróficos debido a la disolución localizada del metal. Este tipo de corrosión es difícil de modelar y predecir, dado su carácter complejo y la influencia de múltiples factores ambientales (Di Sarno et al., 2021).

En las estructuras de concreto reforzado, la corrosión del acero es la principal causa de deterioro, afectando la vida útil y la seguridad de las infraestructuras. La Figura 2-4 ilustra tres aspectos críticos relacionados con la corrosión: (a) el uso de la sonda Wenner para evaluar la resistividad del concreto, (b) barras de refuerzo sin signos visibles de corrosión y (c) barras corroídas con un evidente deterioro estructural. La penetración de cloruros y la carbonatación son mecanismos clave que inician la corrosión, y su propagación puede comprometer la capacidad de servicio de las estructuras (Wardach & Krentowski, 2023).

En áreas costeras, la corrosión inducida por cloruros es un factor crítico que afecta la durabilidad de las estructuras, y su evaluación es esencial para predecir la vida útil de las mismas. Además, el cambio climático puede alterar las condiciones ambientales que influyen en la corrosión, complicando aún más las predicciones sobre el crecimiento de la corrosión en estructuras de acero. Por lo tanto, es fundamental desarrollar modelos predictivos y métodos de monitoreo avanzados para mitigar los efectos de la corrosión y prolongar la vida útil de las estructuras (Rodrigues et al., 2021).



Figura 2-4: *Evaluación e impacto de la corrosión en estructuras. Fuente (Wardach & Krentowski, 2023).*

2.1.5 Evaluación del Estado Estructural

Según Tawil et al. (2024), la evaluación del estado estructural de infraestructuras, especialmente aquellas afectadas por la corrosión, es importante para garantizar su integridad y seguridad. Los métodos de diagnóstico no destructivo (NDT) han demostrado ser herramientas efectivas para este propósito, permitiendo la detección temprana de daños sin comprometer la estructura. Entre los métodos más utilizados se encuentran el ultrasonido, la esclerometría y la medición de corrosión. La Figura 2-5 ilustra un ejemplo de corrosión en armaduras de hormigón, destacando uno de los problemas más comunes en estructuras de concreto armado.

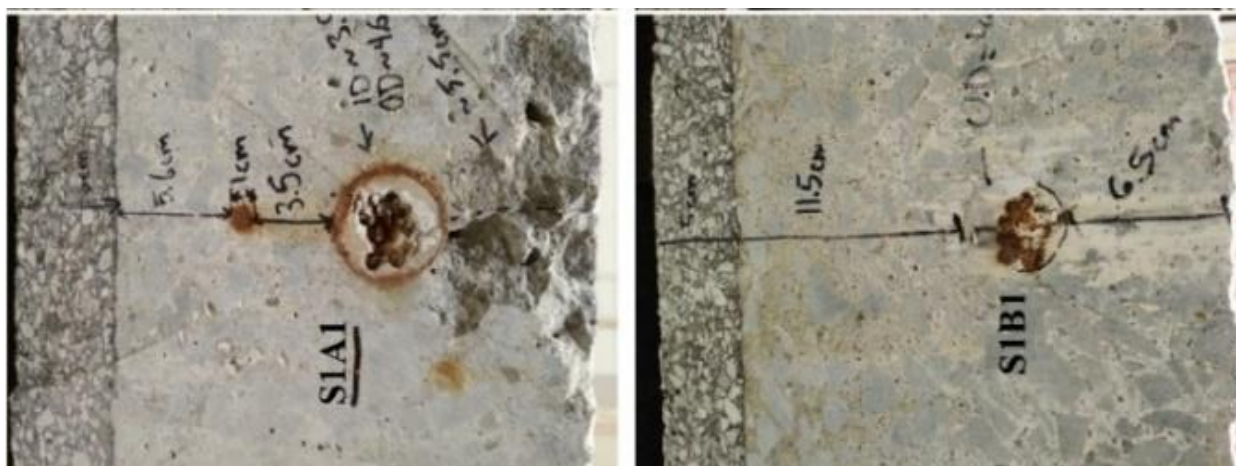


Figura 2-5. Corrosión en Armaduras de Hormigón. Fuente: (Tawil et al., 2024).

El ultrasonido, por ejemplo, es ampliamente utilizado para detectar la corrosión en estructuras metálicas y de concreto, gracias a su capacidad para medir el grosor y detectar defectos internos. Este método es particularmente útil en la evaluación de la corrosión en placas gruesas y estructuras, proporcionando datos precisos sobre la integridad estructural (Tawil et al., 2024).

La esclerometría, por otro lado, se utiliza para evaluar la dureza superficial del concreto, lo que puede indicar la presencia de daños o deterioro. Este método es complementario a otros NDT, como el ultrasonido, y se utiliza comúnmente en la inspección de puentes y otras infraestructuras de concreto. La Figura 2-6 ilustra la aplicación de estos métodos, incluyendo la esclerometría con martillo de rebote, el uso de dispositivos de ultrasonido y una máquina de perforación refrigerada con agua (Wardach & Krentowski, 2023).

La medición de la corrosión, especialmente en estructuras de concreto reforzado, es esencial para predecir la vida útil de la estructura y planificar el mantenimiento adecuado. Métodos como la emisión acústica han demostrado ser efectivos para detectar la corrosión en tiempo real, lo que permite una intervención temprana y reduce los costos de reparación (Oh et al., 2024).



Figura 2-6. Métodos de inspección de concreto. Fuente: (Wardach & Krentowski, 2023).

(a) Martillo de rebote para esclerometría; (b) Dispositivo de ultrasonido para pruebas no destructivas; (c) Máquina de perforación refrigerada con agua.

La combinación de estos métodos no destructivos ofrece una evaluación más completa del estado estructural de las infraestructuras. Por ejemplo, la combinación de técnicas como el radar de penetración terrestre, la termografía infrarroja y el eco de impacto ha mostrado mejorar la detección de defectos como la delaminación y la corrosión en puentes de concreto. Esta integración de métodos permite una mejor planificación de estrategias de mantenimiento, asegurando la seguridad y prolongando la vida útil de las estructuras (Marić et al., 2019).

2.1.6 Rehabilitación de estructuras

La rehabilitación de estructuras se ha convertido en una necesidad urgente a nivel global debido a la obsolescencia generalizada de las construcciones y a los requisitos más exigentes de los códigos de construcción modernos, especialmente en áreas propensas a terremotos. En estos contextos, la actualización de las construcciones existentes se ha convertido en un objetivo primordial. Este proceso implica la aplicación de métodos avanzados para mejorar la resistencia y funcionalidad de las estructuras, asegurando que cumplan con los estándares actuales de seguridad y eficiencia (Aprile & Monti, 2022).



Figura 2-7: Rehabilitación de estructura metálica en edificio de once plantas. Fuente: (LCDV arquitectos, 2024).

Por otro lado, la rehabilitación en el contexto de la salud se define como un proceso multimodal, centrado en la persona y colaborativo, que incluye intervenciones dirigidas a mejorar la capacidad de una persona al abordar las estructuras corporales, funciones y actividades/participación, así como factores contextuales relacionados con el rendimiento. El objetivo es optimizar el funcionamiento de personas con condiciones de salud que experimentan discapacidad o que probablemente la experimenten. Esta definición, desarrollada para fines de investigación, busca estandarizar la descripción de las intervenciones de rehabilitación, mejorando así la investigación en este campo (Negrini et al., 2022).

2.1.7 Tipo de rehabilitación

Según Aprile y Monti (2022) la rehabilitación estructural es un campo que abarca diversas técnicas y enfoques para restaurar la funcionalidad y seguridad de estructuras dañadas o envejecidas. A continuación, en la tabla 1, se describen los tipos de rehabilitación estructural y sus aplicaciones comunes:

Tabla 2-1: *Tipos de Rehabilitación y sus Aplicaciones*

Tipo de Rehabilitación	Descripción
Rehabilitación de Edificios en Zonas Sísmicas	Según Aprile y Monti (2022), se orienta a reforzar las construcciones ubicadas en regiones propensas a terremotos. Su objetivo es actualizar las estructuras existentes para cumplir con los estándares modernos de construcción, mejorando su resistencia frente a movimientos sísmicos.
Integración Estructural	Terapia manual que actúa sobre las continuidades fasciales del cuerpo, aplicándose de manera local y global. Este método busca mejorar la movilidad y el bienestar físico y psicológico, especialmente tras lesiones o cirugías.
Rehabilitación de la Columna Vertebral y la Postura	Incluye ajustes quiroprácticos, ejercicios activos y educación ergonómica para reducir el estrés mecánico en los tejidos espinales. Este enfoque no solo resuelve síntomas, sino que busca mejorar la alineación corporal y prevenir cambios patológicos.

Rehabilitación Combinada para Recuperación Neuronal	Utilizada en pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares. Combina entrenamiento robótico y otras técnicas para fomentar la recuperación de redes neuronales saludables, promoviendo tanto la funcionalidad como la restauración de características estructurales en el cerebro.
Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Reforzado	Consiste en la restauración de estructuras de hormigón dañadas mediante análisis estructurales y el uso de modelos de elementos finitos. Este tipo de rehabilitación asegura la estabilidad y seguridad de las edificaciones, especialmente las afectadas por deterioro ambiental o sobrecargas.
Rehabilitación Funcional y Estructural en Esclerosis Múltiple	Centrada en ejercicios motores y cognitivos, esta rehabilitación busca mejorar la plasticidad cerebral. Además, emplea técnicas de neuroimagen avanzada para evaluar los cambios en la conectividad cerebral, contribuyendo a la funcionalidad y estabilidad estructural del cerebro en pacientes con esclerosis múltiple.

2.1.8 Encamisado de hormigón armado

Para Ghobarah y Said (2001) el encamisado en la rehabilitación estructural es una técnica utilizada para mejorar la capacidad de carga y la ductilidad de elementos estructurales como vigas y columnas. Esta técnica es especialmente relevante en estructuras de concreto reforzado que no cumplen con los códigos sísmicos actuales. El encamisado puede realizarse utilizando diferentes materiales, como polímeros reforzados con fibra (FRP) o acero corrugado.

Por ejemplo, el uso de láminas de FRP ha demostrado ser efectivo para aumentar la capacidad de corte de las uniones viga-columna, permitiendo que se forme una articulación plástica más dúctil en la viga. Asimismo, el encamisado con acero corrugado ha mostrado mejorar significativamente la resistencia al corte y la ductilidad de las conexiones, abordando la falta de refuerzo de corte y confinamiento en las estructuras existentes (Rahman & Hasibuan, 2024).



Figura 2-8: Encamisado de columna de concreto armado. Fuente: (Poceria Madrid, 2022).

En la práctica, el encamisado se utiliza para rehabilitar estructuras con normativas antiguas y mejorar su capacidad sísmica. Esta técnica incrementa la resistencia estructural, distribuye tensiones uniformemente y evita fallos prematuros. En columnas, el encamisado con concreto es común, ya que aumenta la capacidad de carga, integridad estructural y durabilidad. Es una solución eficaz para revitalizar infraestructuras deterioradas, garantizando su desempeño frente a eventos sísmicos y prolongando su vida útil, convirtiéndose en una técnica clave para la rehabilitación estructural (Rahman & Hasibuan, 2024).

2.1.9 Fibra de carbono reforzado

El uso de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) en la rehabilitación de estructuras de concreto se ha convertido en una solución eficaz para mejorar el rendimiento estructural y prolongar la vida útil de las construcciones. Los CFRP se utilizan principalmente para reforzar y reparar estructuras de concreto armado que presentan deficiencias debido al envejecimiento, corrosión del refuerzo de acero, defectos de diseño o construcción, y daños causados por eventos sísmicos (Gribniak et al., 2019).

Una de las principales ventajas de los CFRP es su alta resistencia a la tracción, que supera los 100 ksi, lo que permite su aplicación sin necesidad de demoler o cerrar puentes o edificios durante el proceso de fortalecimiento. Además, su resistencia a la

corrosión y baja densidad los hace una alternativa prometedora frente a otras fibras, como las de acero, que son propensas a la corrosión (Gribniak et al., 2019).



Figura 2-9 Aplicación de Refuerzo Estructural con Fibra de Carbono en Elementos de Hormigón. Fuente: (Ružić & Zahirović, 2022).

Otra ventaja significativa del uso de CFRP es su capacidad para mejorar la resistencia flexural y la ductilidad de las estructuras de concreto. Los CFRP pueden aplicarse en forma de láminas o tiras unidireccionales o bidireccionales, dependiendo de las necesidades específicas de refuerzo. Por ejemplo, se ha demostrado que un diseño bidireccional de CFRP puede distribuir de manera uniforme la tensión en los estribos, aumentando la eficiencia del refuerzo transversal (Ružić & Zahirović, 2022).

Además, el uso de CFRP en columnas de concreto puede proporcionar confinamiento externo, mejorando la capacidad de carga máxima y aumentando la deflexión en comparación con las columnas no rehabilitadas. En general, el uso de CFRP en la rehabilitación de estructuras de concreto no solo mejora la capacidad de carga y la durabilidad, sino que también contribuye a la sostenibilidad al reducir la necesidad de nuevos materiales y minimizar la producción de desechos (Ružić & Zahirović, 2022).

2.1.10 Refuerzo con perfiles metálicos

Según Pantoja et al. (2023) los refuerzos con perfiles metálicos, especialmente de acero inoxidable, son ampliamente utilizados en proyectos de rehabilitación de estructuras históricas debido a sus características únicas. Estos perfiles son ideales para aumentar la capacidad de carga estática y dinámica de las estructuras, como las de mampostería, que a menudo enfrentan cargas de corte en el plano y fuera del plano, especialmente durante eventos sísmicos.

Además, el uso de acero inoxidable es compatible con los materiales históricos, lo que permite intervenciones reversibles y minimiza el aumento de masa, preservando el aspecto original de la mampostería. En estructuras de madera históricas, los perfiles de acero inoxidable también son preferidos debido a su capacidad para abordar problemas de capacidad de carga y compatibilidad de materiales, cumpliendo con los requisitos de conservación de reversibilidad y no invasividad (Pantoja et al., 2023).

A continuación, se presenta la figura 2.10 que ilustra el uso de perfiles metálicos en la rehabilitación de una estructura:



Figura 2-10 Refuerzo de pilares con perfiles de acero en una estructura histórica. Fuente: (IFITEC, n.d.).

Como se observa en la figura anterior los perfiles metálicos son ideales para intervenciones que preserven la estructura original, como en edificios con paneles de concreto prefabricado, permitiendo rediseñar espacios sin comprometer estabilidad. En rehabilitaciones, las estructuras metálicas ofrecen versatilidad y adaptabilidad, cumpliendo con estándares actuales y garantizando calidad en las modificaciones. Estas propiedades los convierten en una solución valiosa para adaptaciones arquitectónicas que mantienen la integridad estructural, asegurando seguridad y funcionalidad en proyectos de rehabilitación de edificios existentes (Pantoja et al., 2023).

2.1.11 Refuerzo a nivel de fisura y grietas

Las técnicas de rehabilitación de fisuras y grietas en estructuras de concreto han evolucionado significativamente, incorporando métodos innovadores que mejoran la durabilidad y resistencia del material. Una de las técnicas más destacadas es el uso de microcápsulas auto-reparadoras que contienen agentes curativos. Estas microcápsulas, al ser incorporadas en el concreto, pueden activarse en presencia de fisuras, liberando un polímero epóxico que sella las grietas. Este método ha demostrado ser efectivo en diversos entornos, mejorando la impermeabilidad y la resistencia a la compresión del concreto, especialmente cuando se utiliza un contenido de microcápsulas del 4% y una pre-presión del 40% de f_{max} (Mao et al., 2023).

Además, la Figura 2.6 muestra un ejemplo práctico del refuerzo aplicado en el nivel de fisuras mediante materiales compuestos fijados con adhesivo epóxico, una técnica que proporciona mayor estabilidad a la estructura y previene el crecimiento de grietas. La técnica de precipitación de calcita inducida por microorganismos (MICP) ha ganado popularidad. Este método utiliza bacterias como *Bacillus subtilis* para precipitar calcita en las grietas, mejorando la resistencia y durabilidad del concreto. La encapsulación de estas bacterias en materiales como el polvo de piedra caliza ha mostrado aumentar la resistencia a la compresión y reparar fisuras de hasta 0.52 mm (Mao et al., 2023).



Figura 2-11: Refuerzo de fisuras en concreto mediante adhesivo epóxico y anclaje mecánico.

Fuente: (Busnelli et al., 2017).

Otra técnica innovadora es el uso de métodos electroquímicos para la rehabilitación de concreto. Estos métodos implican la deposición de materiales en la superficie del concreto mediante corrientes eléctricas, lo que ayuda a cerrar las grietas y mejorar la

impermeabilidad del material. La aplicación de corriente eléctrica también aumenta la pasividad del acero en el concreto, reduciendo la corrosión (Ryou & Otsuki, 2005).

Además, el uso de biocemento, que combina procesos microbianos con fibras de nano-carbono, ha demostrado ser altamente efectivo en la reparación de vigas de concreto, superando a métodos tradicionales como el mortero de cemento y el recubrimiento de resina epóxica. Estas técnicas no solo son efectivas en la reparación de fisuras, sino que también son sostenibles y reducen el impacto ambiental asociado con la producción de concreto nuevo (Vimalanathan, 2019).

2.1.12 Apuntalamiento para rehabilitación de elementos estructurales vigas y columnas.

El apuntalamiento es crucial en la rehabilitación de vigas y columnas de acero y concreto dañadas por corrosión o sismos. En plantas químicas, facilita la sustitución de elementos estructurales sin costosos desmantelamientos, siendo ideal en áreas congestionadas con acceso limitado. En columnas rehabilitadas con encamisado de concreto reforzado, el apuntalamiento temporal asegura la estabilidad estructural mientras se instalan refuerzos longitudinales y estribos, minimizando el tiempo de inactividad y garantizando la seguridad del proceso (El-Amoury & Ghobarah, 2002).

Las mejores prácticas en apuntalamiento incluyen métodos avanzados y materiales compuestos, como láminas de GFRP, que mejoran la resistencia al corte en uniones viga-columna, proporcionando soluciones más dúctiles. En edificios de varios pisos, es esencial calcular correctamente las cargas sobre sistemas de apuntalamiento y losas de soporte usando modelos de marco equivalente para garantizar una distribución precisa. Estas técnicas aseguran procesos de rehabilitación seguros, eficientes y económicos, optimizando el rendimiento estructural durante la construcción y reparación (Savery, 2005).

2.1.13 Tipos de patologías de fallas

De acuerdo con Feng et al. (2020) las patologías de fallas en estructuras se refieren a los modos en que estas pueden fallar debido a causas como errores humanos, deficiencias en el diseño o condiciones ambientales adversas. Estas fallas varían según el tipo de estructura y los materiales utilizados. Por ejemplo, en concreto reforzado, las fallas pueden clasificarse en modos dúctiles y no dúctiles, dependiendo de la cantidad de refuerzo transversal presente en las uniones viga-columna, influenciando significativamente el rendimiento sísmico.

Las principales clasificaciones incluyen fallas por flexión, cizallamiento, o una combinación de ambas, las cuales afectan la capacidad y ductilidad de columnas de concreto reforzado. Feng et al. (2020) mencionan que estas clasificaciones son esenciales para identificar y predecir modos de falla, fundamentales para planificar rehabilitaciones y mejorar diseños estructurales. Además, en estructuras con paneles de relleno, los modos de falla en el plano desempeñan un papel crítico en el rendimiento general de la estructura.

A continuación, se presentan la figura 2-12 que ilustran uno de los tipos de fallas mencionados:

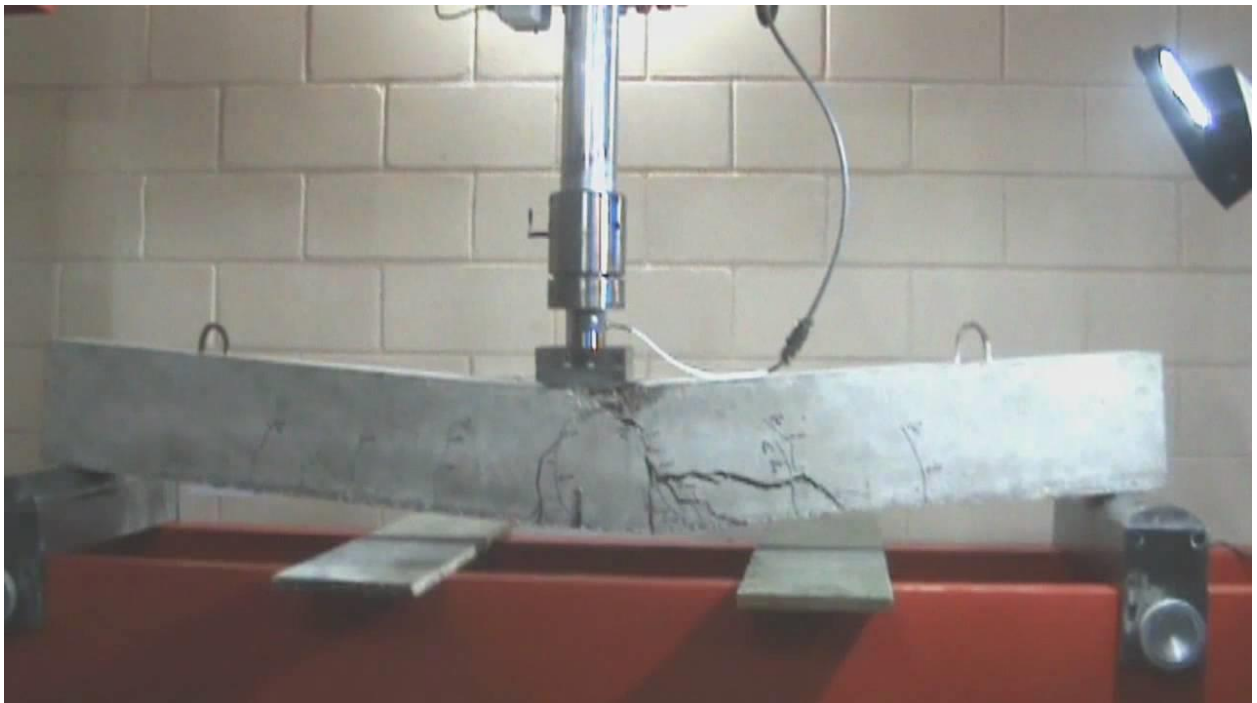


Figura 2-12: Falla por flexión en una viga de concreto reforzado. (Arteta, 2010).

Además, se presenta la tabla 2 que resume los tipos más comunes de patologías estructurales, sus características y posibles causas:

Tabla 2-2: *Tipos de más comunes de patologías estructurales*

Tipo de Patología	Características	Posibles Causas
Lesiones Físicas	Daños provocados por agentes físicos como agua, heladas, radiación solar, etc.	Exposición a condiciones climáticas adversas, falta de mantenimiento.
Lesiones Mecánicas	Daños estructurales como grietas, fisuras, deformaciones o desprendimientos.	Sobrecargas, asentamientos diferenciales, errores de construcción.
Lesiones Químicas	Deterioro debido a reacciones químicas, como corrosión en metales u oxidación.	Humedad, contaminación ambiental, uso de materiales inadecuados.
Corrosión en Metales	Deterioro de componentes metálicos por oxidación, debilitando su resistencia.	Exposición a ambientes húmedos, falta de protección adecuada.
Fatiga de Materiales	Aparición de fisuras debido a cargas cíclicas repetitivas, incluso inferiores a las cargas máximas de diseño.	Vibraciones, cargas dinámicas, defectos en el material.
Abrasión	Desgaste de superficies por fricción o acción de fluidos, resultando en pérdida de material.	Contacto constante entre superficies, flujo de partículas abrasivas.
Holguras en Uniones	Aflojamiento de conexiones que puede llevar a deformaciones y fallas estructurales.	Deficiencias en el diseño o ejecución de uniones, vibraciones.
Impactos y Sobrecargas	Deformaciones o daños causados por cargas imprevistas que exceden los límites de diseño.	Accidentes, errores operativos, eventos naturales extremos.

Estas patologías estructurales deben ser identificadas y atendidas oportunamente para garantizar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de las estructuras. La implementación de medidas preventivas, el uso de materiales adecuados y un

mantenimiento regular son esenciales para mitigar estos problemas y evitar fallas críticas (Feng et al., 2020).

2.1.13.1 *Procesos constructivos*

Los procesos constructivos de acuerdo con Feng et al. (2020) tienen un impacto significativo en el desempeño estructural de las edificaciones. Los errores humanos durante el diseño y la construcción son responsables de una proporción considerable de fallas estructurales, sobrecostos y retrasos. Un modelo de Análisis de Fiabilidad Humana (HRA) ha demostrado que los errores en la construcción son particularmente perjudiciales para la seguridad estructural y son más difíciles de detectar y corregir.

Las medidas de control de errores, como la verificación del diseño, pueden reducir significativamente la pérdida de seguridad estructural. Además, se ha observado que, en ciudades como Teherán, el uso de trabajadores no capacitados y la falta de muestreo adecuado son problemas comunes que afectan a todas las edificaciones investigadas, lo que resalta la importancia de la capacitación y el control de calidad en el proceso constructivo (Feng et al., 2020).

Asimismo, los errores comunes que generan fallas en las edificaciones incluyen fallos en el diseño y la ejecución. Un estudio en el Reino Unido reveló que el 58% de todas las fallas se deben a un diseño defectuoso, mientras que el 35% se atribuyen a una ejecución incorrecta. Estos errores pueden manifestarse en forma de colapsos estructurales o problemas funcionales, y son exacerbados por la falta de claridad en los planos y especificaciones, así como por la omisión de detalles críticos. La implementación de estrategias de control y la mejora de la educación profesional son esenciales para mitigar estos errores y mejorar la fiabilidad estructural (Surahyo, 2019).

2.1.13.2 *Mal proceso constructivo*

El uso de materiales de baja calidad y la falta de control durante la construcción comprometen la integridad estructural, reduciendo la resistencia y durabilidad de las estructuras. La omisión de normas de seguridad y revisiones de diseño también contribuye a fallas estructurales. Estudios revelan que reducir costos sacrificando componentes esenciales es una causa frecuente de colapsos, implicando riesgos de seguridad y pérdidas económicas significativas (Nneka & Ejiofor, 2024).

Las Prácticas defectuosas como el diseño deficiente de conexiones, alteraciones inadecuadas en el sitio y la interrupción de la continuidad estructural afectan directamente la estabilidad de las estructuras. Por ejemplo, en la Figura 2-14, se observa

un caso donde se interrumpe la continuidad de las cargas en una viga. Este error compromete la distribución de esfuerzos, debilitando el sistema estructural e incrementando el riesgo de fallas, especialmente bajo condiciones de carga dinámica o eventos sísmicos (Nneka & Ejiofor, 2024).



Figura 2-13: Se interrumpe la continuidad de las cargas de la viga. Fuente: (Civilgeeks, 2016).

2.1.13.3 *Falla de suelo*

Las fallas estructurales debido a problemas en el suelo según Toll et al. (2012) son un fenómeno común que puede tener graves consecuencias para la estabilidad de las edificaciones. Una de las causas principales de estas fallas es la variación en el nivel freático y el contenido de humedad del suelo, lo cual puede inducir asentamientos diferenciales que superan los umbrales que las estructuras pueden soportar. Estos asentamientos pueden ser causados por la consolidación del suelo al bajar el nivel freático, lo que provoca un movimiento descendente de la superficie del suelo.

En suelos más blandos y compresibles, estos asentamientos pueden ser significativos, llegando a causar daños importantes a las edificaciones. Además, los suelos expansivos, que se hinchan y contraen con los cambios de humedad, son una

causa común de daño a los cimientos, especialmente en climas con veranos secos e inviernos húmedos (Toll et al., 2012).

2.1.13.4 Tipo de daños

Según Toll et al. (2012) los daños en las estructuras pueden clasificarse en diversos tipos, cada uno con efectos significativos sobre su estabilidad estructural. Uno de los tipos más frecuentes es el daño causado por movimientos diferenciales del suelo. Este fenómeno puede originarse debido a cambios en el nivel freático y en la humedad del suelo, lo que lleva a asentamientos desiguales. Dichos asentamientos pueden superar los límites de tolerancia de las estructuras, generando fisuras, deformaciones y pérdida de capacidad estructural. En la Figura 2-15, se presenta un ejemplo de asentamientos diferenciales visibles en una estructura, donde las fisuras y el desplazamiento del concreto reflejan los daños ocasionados.



Figura 2-14: Corrosión avanzada en armaduras de concreto reforzado. Fuente: (Desarrollos ESC, 2023).

Otro daño recurrente es causado por la contracción y expansión de suelos arcillosos, influenciados por cambios estacionales en los niveles de humedad. Este fenómeno es especialmente dañino para los cimientos de edificios de poca altura, donde las variaciones volumétricas del suelo generan tensiones y deformaciones adicionales que pueden comprometer la integridad de las estructuras (Toll et al., 2012).

Además, la corrosión en elementos de concreto reforzado constituye una de las principales causas de deterioro estructural. Este tipo de daño reduce significativamente la capacidad de carga de elementos como columnas comprimidas excéntricamente,

haciéndolos más vulnerables a fallas. En la Figura 2-16, se observa un ejemplo de corrosión avanzada en las armaduras de concreto reforzado. La pérdida del recubrimiento y la exposición del acero corroído evidencian el nivel de deterioro que afecta directamente la estabilidad de los elementos estructurales.



Figura 2-15: Asentamientos diferenciales visibles en estructuras. Fuente: (Desarrollos ESC, 2023).

2.1.13.5 Flexión

La flexión en elementos estructurales ocurre cuando una fuerza externa provoca que estos se doblen o curven, afectando componentes como vigas que soportan fuerzas perpendiculares a su eje longitudinal. Este fenómeno puede originarse por cargas estáticas, como el peso de un edificio, o dinámicas, como el viento o terremotos. Según Meskhi et al. (2022), las tensiones de compresión y tracción generadas durante la flexión pueden causar deformaciones permanentes o incluso fallos estructurales si no se gestionan adecuadamente.

Las patologías asociadas a la flexión incluyen la fatiga del material, especialmente en estructuras con excentricidades geométricas que provocan desplazamientos fuera del plano y flexión local. Este fenómeno, conocido como flexión secundaria, aumenta las concentraciones de tensión y acelera el deterioro del material. Estas características resaltan la importancia de un diseño estructural que limite los efectos adversos de la flexión (Meskhi et al., 2022).

En elementos compuestos, como los de concreto reforzado con polímeros, la flexión puede ser optimizada mediante el uso de refuerzos combinados. Estos refuerzos mejoran tanto la capacidad de carga como la resistencia a la compresión, demostrando que un diseño adecuado no solo mitiga los efectos negativos de la flexión, sino que también prolonga la vida útil de las estructuras sometidas a cargas intensas (Meskhi et al., 2022).

2.1.13.6 Torsión

La torsión en estructuras se refiere a la deformación experimentada por elementos como vigas y columnas cuando están sometidos a momentos torsionales. Este fenómeno es particularmente crítico en las uniones viga-columna, donde la interacción entre fuerzas de corte y momentos torsionales genera un comportamiento complejo y potencialmente peligroso. Según Abdel-Latif et al. (2023), la configuración del refuerzo longitudinal y la rigidez de la viga son factores clave en la capacidad última y en la localización de las zonas de falla.

Las señales de falla por torsión incluyen la aparición de grietas torsionales, que tienden a ser más extensas en uniones interiores que en exteriores. Estas grietas indican un comportamiento frágil que puede comprometer la ductilidad necesaria para la integridad estructural. Este deterioro reduce la capacidad de las estructuras para absorber y disipar energía, afectando su desempeño general durante eventos críticos como terremotos (Abdel-Latif et al., 2023).

Adicionalmente, en las curvas de histéresis desplazamiento-torsión, la degradación de rigidez se manifiesta como un pinchamiento en el centro, reflejando una disminución de la capacidad de carga tras el pico máximo. Este comportamiento destaca la importancia de diseñar estructuras con refuerzos adecuados que garanticen la resistencia torsional y mitiguen el impacto de fuerzas extremas en las uniones críticas (Abdel-Latif et al., 2023).

2.1.13.7 Cortante

La cortante en estructuras se refiere a las fuerzas internas que actúan paralelamente a la sección transversal de un elemento estructural, como vigas o paredes, y que pueden causar deformaciones o fallos estructurales si no se gestionan adecuadamente. Estas fuerzas son especialmente críticas en situaciones de carga lateral, como terremotos o explosiones, donde pueden inducir desplazamientos significativos y daños en la estructura (Raikar et al., 2023).

Por otra parte, las paredes de cortante, por ejemplo, son elementos estructurales diseñados para resistir estas fuerzas, proporcionando rigidez y estabilidad a los edificios. En el contexto de eventos sísmicos, las paredes de cortante pueden reducir los desplazamientos laterales y, por ende, mitigar los daños estructurales (Raikar et al., 2023).

2.1.13.8 Asentamiento

El asentamiento en estructuras se refiere al desplazamiento vertical que ocurre debido a la compresión del suelo sobre el cual se construyen. Este fenómeno puede ser uniforme o diferencial, siendo este último el más problemático, ya que implica tasas desiguales de asentamiento en diferentes partes de la estructura. Según Hanna y Chen (2022), el asentamiento diferencial genera tensiones adicionales en elementos estructurales como vigas y columnas, aumentando el riesgo de distorsión o colapso en condiciones extremas.

El asentamiento diferencial puede originarse por variaciones en la carga aplicada, cambios en las condiciones del suelo o la presencia de diferentes tipos de suelo bajo la estructura. Estas diferencias generan tensiones que afectan la estabilidad estructural, especialmente en vigas y columnas. Estas tensiones pueden llevar a grietas y deformaciones permanentes, comprometiendo la seguridad y funcionalidad de la edificación (Hanna & Chen, 2022).

Además, en estructuras de acero, el asentamiento diferencial tiene un impacto significativo al alterar el patrón de carga, afectando la capacidad de carga última de la estructura y aumentando el riesgo de colapso. Como señala Chan & Lo (2020), el asentamiento diferencial intensifica los momentos de flexión y fuerzas axiales en elementos portantes, lo que incrementa las probabilidades de fallo estructural. Este fenómeno destaca la importancia de un diseño adecuado y estudios geotécnicos previos en proyectos de construcción.

2.1.14 Ensayos no destructivos.

Los ensayos no destructivos (END) en edificios son técnicas de diagnóstico que permiten evaluar la integridad y el estado de las estructuras sin causarles daño. Estas técnicas son particularmente útiles para identificar defectos no visibles en la superficie, estimar la profundidad de grietas y medir las dimensiones de elementos accesibles desde un solo lado. Según Hoła y Schabowicz (2010), los END permiten detectar daños internos

en estructuras, proporcionando una visión integral sin necesidad de interrumpir su funcionalidad.

A continuación, se presenta una imagen que ilustra la aplicación de ensayos no destructivos en una estructura de concreto:



Figura 2-16: Aplicación de ensayos no destructivos en una estructura de concreto.

Por otra parte, un enfoque común en los END es el uso de métodos acústicos, que han evolucionado significativamente en los últimos años. Estos métodos procesan señales acústicas mediante algoritmos avanzados para proporcionar información detallada sobre elementos estructurales. Además, los END se aplican para evaluar propiedades distintas a la resistencia, lo cual resulta esencial en estructuras de concreto reforzado, en la conservación de edificios históricos y en la evaluación estructural tras eventos sísmicos (Hoła & Schabowicz, 2010).

2.1.14.1 Pachometría

La pachometría es un ensayo no destructivo empleado en la evaluación de estructuras de hormigón armado para localizar y determinar la posición de las armaduras internas sin necesidad de dañar la estructura. Este método utiliza dispositivos electromagnéticos, conocidos como pachómetros, que detectan la presencia de elementos metálicos en el hormigón. La pachometría es especialmente útil para verificar la correcta colocación de las armaduras según el diseño estructural y para identificar posibles áreas de corrosión o defectos en las mismas. Además, permite estimar el

recubrimiento de hormigón sobre las armaduras, lo cual es fundamental para evaluar la durabilidad y seguridad de la estructura (Ruales, 2024).

Una de las ventajas de la pachometría es su capacidad para inspeccionar grandes áreas de manera rápida y eficiente, proporcionando información valiosa para el mantenimiento y rehabilitación de infraestructuras. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la precisión de los resultados puede verse afectada por factores como la presencia de elementos metálicos cercanos, la profundidad de las armaduras y las propiedades del hormigón. Por ello, es recomendable complementar la pachometría con otros ensayos no destructivos o destructivos para obtener una evaluación más completa de la estructura (Ruales, 2024).

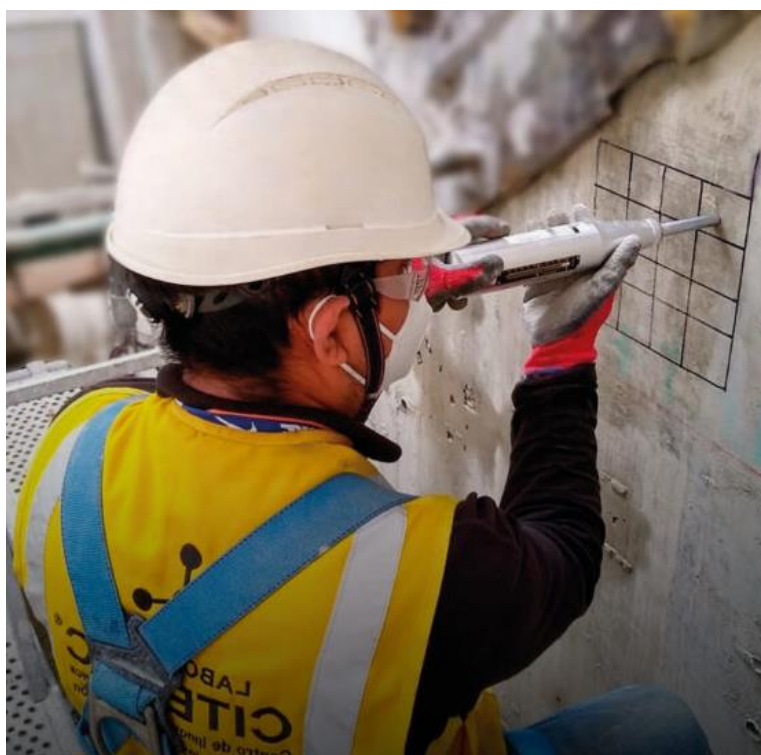


Figura 2-17: Ensayo de esclerometría aplicado en una estructura de hormigón. (Laboratorio-Citemac, 2023).

2.1.14.2 Esclerometría

La esclerometría, por otro lado, es un ensayo no destructivo que se utiliza para estimar la resistencia a compresión del hormigón in situ. Este método emplea un dispositivo llamado esclerómetro o martillo de rebote, que aplica un impacto controlado sobre la superficie del hormigón y mide el rebote resultante. El valor de rebote obtenido se correlaciona con la dureza superficial del hormigón, lo que permite inferir su resistencia a compresión. La esclerometría es ampliamente utilizada debido a su

simplicidad, rapidez y bajo costo, siendo una herramienta valiosa para evaluaciones preliminares de la calidad del hormigón en estructuras existentes (Ruales, 2024).

Es importante señalar que la esclerometría proporciona una estimación indirecta de la resistencia del hormigón y que los resultados pueden verse influenciados por factores como la rugosidad de la superficie, la humedad, la edad del hormigón y la presencia de agregados. Por lo tanto, se recomienda interpretar los resultados con cautela y, en caso necesario, complementarlos con otros ensayos, como la extracción de testigos o ensayos ultrasónicos, para obtener una evaluación más precisa de las propiedades mecánicas del hormigón (Ruales, 2024).



Figura 2-18: Ensayo de esclerometría aplicado en una estructura de hormigón. Fuente: (NEODEX-Concrete, n.d.).

2.1.15 Ensayos Destructivos

Los ensayos destructivos en edificios son pruebas que implican la extracción o modificación de partes de la estructura para evaluar su resistencia y condición. Estos ensayos son ampliamente reconocidos como los más confiables para determinar la capacidad estructural de los materiales, proporcionando resultados directos y precisos. Según Wardach y Krentowski (2023), los ensayos destructivos permiten obtener información crítica sobre la resistencia de los materiales, aunque su aplicación puede ser compleja y costosa. La Figura 2-7 ilustra el proceso de ejecución de estos ensayos, incluyendo perforaciones y extracción de muestras.

Por otro lado, debido a su complejidad y costos asociados, los ensayos destructivos requieren autorizaciones y reparaciones posteriores, lo que limita su aplicación. Por esta

razón, es común complementar sus resultados con métodos no destructivos que, aunque menos precisos, ofrecen una alternativa menos invasiva. Esta combinación de técnicas permite un enfoque más equilibrado y eficiente para evaluar el estado estructural de edificios sin comprometer su funcionalidad (Wardach & Krentowski, 2023).



Figura 2-19: Ensayos destructivos perforaciones (muestras). Fuente: (Wardach & Krentowski, 2023).

2.1.15.1 Extracción de núcleos

La extracción de núcleos es una técnica ampliamente utilizada en la evaluación de estructuras de hormigón, permitiendo obtener muestras cilíndricas directamente de elementos estructurales para analizar sus propiedades mecánicas y durabilidad. Este método es esencial para determinar la resistencia a la compresión in situ, evaluar la uniformidad del hormigón y detectar posibles defectos internos. Además, facilita la identificación de procesos de degradación, como la carbonatación o la penetración de cloruros, que pueden comprometer la integridad estructural. Aunque la extracción de núcleos implica una intervención destructiva, los beneficios en términos de información obtenida superan las desventajas, siempre y cuando se realice de manera controlada y se repare adecuadamente la zona afectada (Wardach & Krentowski, 2023).



Figura 2-20: Proceso de extracción de núcleos de hormigón. Fuente: (Onesvie RD, n.d.).

Posteriormente a la extracción de núcleos, las muestras obtenidas deben ser preparadas y analizadas bajo estrictos estándares técnicos, como las normas ASTM C42 o ISO 1920-7, para garantizar la fiabilidad de los resultados. Estos ensayos permiten evaluar parámetros como la resistencia a la compresión, densidad, y porosidad del material, proporcionando información detallada sobre el estado del hormigón en la estructura. Además, los núcleos extraídos pueden ser sometidos a pruebas químicas para determinar la profundidad de carbonatación y la presencia de cloruros, factores críticos en la evaluación de la durabilidad y la vida útil de la estructura. La correcta interpretación de estos resultados es fundamental para planificar intervenciones de rehabilitación estructural y garantizar la seguridad y funcionalidad de las edificaciones (Hoła & Schabowicz, 2010).

2.1.15.2 *Ensayos de Carbonatación en el Hormigón*

La carbonatación es un proceso químico en el que el dióxido de carbono (CO_2) del ambiente penetra en el hormigón y reacciona con el hidróxido de calcio presente, formando carbonato de calcio. Este fenómeno reduce la alcalinidad del hormigón, lo que puede comprometer la protección de las armaduras de acero frente a la corrosión. Para evaluar el grado de carbonatación, se emplean ensayos específicos que permiten determinar la profundidad de penetración del CO_2 en la estructura (Construneic, 2024).



Figura 2-21: Ensayo de carbonatación del concreto. Fuente: (Construneic, 2024).

El método más común para evaluar la carbonatación es el ensayo de la fenolftaleína. Este procedimiento consiste en aplicar una solución de fenolftaleína al 1% en una superficie de hormigón recién fracturada. La fenolftaleína actúa como un indicador de pH, virando a color rosa en medios alcalinos ($\text{pH} > 9$) y permaneciendo incolora en medios neutros o ácidos. De este modo, las zonas no coloreadas indican áreas donde la alcalinidad ha disminuido debido a la carbonatación. Este ensayo es sencillo y proporciona información visual inmediata sobre la profundidad de carbonatación en el hormigón (Construneic, 2024).

Además del ensayo de la fenolftaleína, existen métodos más avanzados para evaluar la carbonatación en el hormigón. Las pruebas de carbonatación acelerada, por ejemplo, implican exponer muestras de hormigón a ambientes controlados con concentraciones elevadas de CO_2 , humedad y temperatura específicas. Este enfoque permite simular y acelerar el proceso de carbonatación, proporcionando datos valiosos en un período de tiempo más corto. Estas pruebas son útiles para investigar la durabilidad del hormigón y la eficacia de diferentes mezclas o tratamientos en su resistencia a la carbonatación (Construneic, 2024).

2.1.16 Modelación Computacional ETABS

La modelación computacional en ingeniería estructural ha avanzado significativamente gracias a herramientas como ETABS, destacada por su capacidad para analizar y diseñar diversas estructuras, desde edificios pequeños hasta rascacielos.

Este software permite a los ingenieros representar y estudiar estructuras en detalle, como se muestra en la Figura 2-23, que ilustra ejemplos de modelos 2D y 3D, así como el diseño de muros de corte. Según Akshay (2024), ETABS es una herramienta clave para evaluar el comportamiento estructural bajo diferentes escenarios.

Además, ETABS es especialmente valioso en regiones propensas a terremotos, ya que facilita análisis sísmicos detallados. Este software calcula parámetros cruciales, como desplazamientos y fuerzas sobre la cimentación, asegurando la resistencia de las estructuras frente a tensiones generadas por sismos y vientos. Estas capacidades hacen de ETABS una herramienta indispensable para garantizar la integridad y seguridad estructural en proyectos de ingeniería moderna (Akshay, 2024).

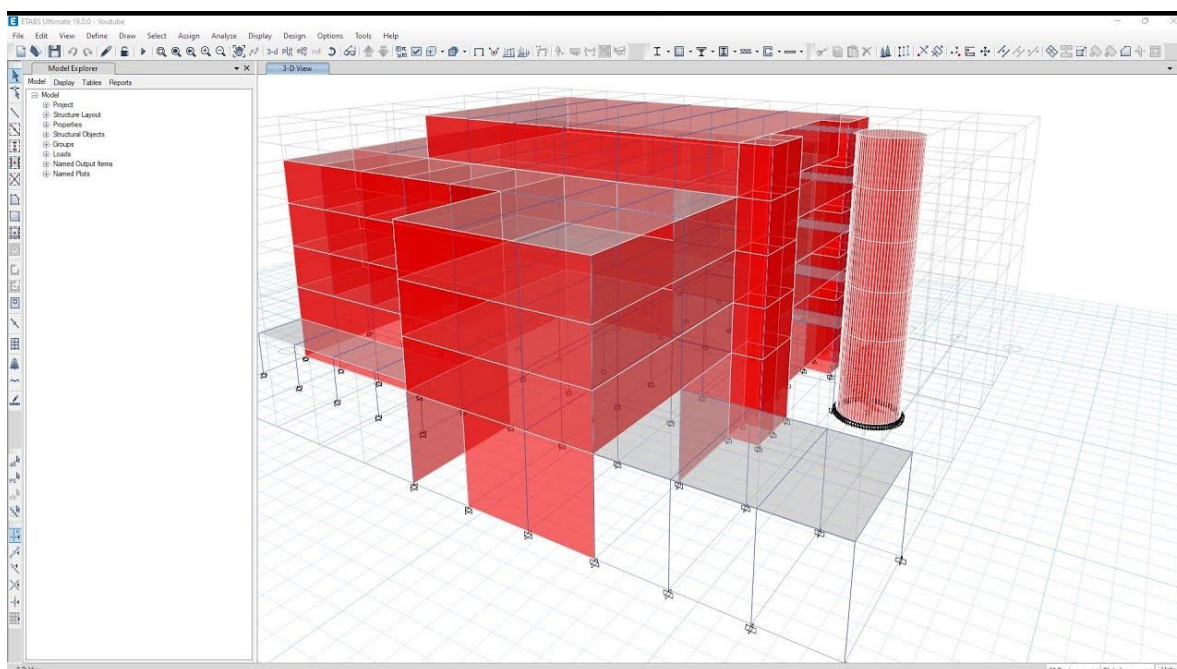


Figura 2-22. Ejemplo de Modelación Computacional en ETABS. Fuente: (Khadake, 2024)

Además, ETABS es una herramienta esencial en proyectos de ingeniería civil a gran escala, mejorando la eficiencia del proyecto y la integridad estructural. Su integración con otros programas como AutoCAD y SAP2000 permite optimizar los procesos de diseño y análisis estructural, garantizando el cumplimiento de los estándares de seguridad. Esta sinergia no solo mejora los tiempos de proyecto y la eficiencia de costos, sino que también promueve el desarrollo de infraestructuras sostenibles al minimizar el desperdicio de materiales y optimizar la asignación de recursos (Santos et al., 2024).

2.2 Marco metodológico

El presente estudio se llevó a cabo mediante una metodología estructurada llamada de cascada que consiste en secuencia lógica de procesos uno detrás del otro que integró enfoques descriptivos, aplicados y experimentales, orientados a diagnosticar y proponer estrategias de rehabilitación para el edificio ubicado en las calles Lorenzo de Garaicoa Manuel Galecio, en Guayaquil. Esta metodología combinó herramientas teóricas y prácticas para abordar de manera precisa el problema estructural, considerando tanto los aspectos técnicos como los contextuales que afectan el deterioro de las vigas y columnas de hormigón armado.

La investigación inició con una revisión documental que permitió establecer un marco teórico basado en normativas, estudios previos y técnicas aplicadas en contextos similares. Este análisis profundizó en las causas del deterioro, incluyendo la corrosión de armaduras, la fisuración del hormigón y los efectos de la actividad sísmica y las condiciones ambientales adversas. A partir de esta base conceptual, se diseñaron actividades de campo y gabinete que proporcionaron información empírica para complementar y validar los hallazgos teóricos.

a. Diagrama de Flujos del Proceso Metodológico

El siguiente diagrama metodológico sintetiza de manera clara y estructurada las etapas principales del proyecto, desde la planificación inicial hasta la presentación de conclusiones.



Figura 2-23 Diagrama de flujos del proceso metodológico.

b. Tipo y diseño de la investigación

Este proyecto se clasifica como una investigación aplicada, enfocada en el análisis técnico y práctico del deterioro estructural del edificio en estudio, complementada con aspectos de investigación descriptiva y experimental. El propósito principal fue desarrollar un diagnóstico confiable que sirva como base para las futuras intervenciones de rehabilitación, considerando tanto las condiciones actuales de los elementos estructurales como las soluciones más adecuadas desde un punto de vista técnico.

La investigación descriptiva permitió detallar el estado actual de los elementos críticos del edificio, como vigas y columnas, documentando las características visibles del deterioro, las fisuras, la corrosión de las armaduras y otros signos relevantes de daño estructural.

También incorporó el análisis de normativas aplicables, como las directrices sísmicas de la NEC-15, para garantizar que las soluciones planteadas cumplan con los estándares técnicos y de seguridad vigentes.

La investigación experimental involucró la recopilación de datos empíricos mediante la aplicación de ensayos no destructivos y destructivos, como ultrasonidos y esclerometría, así como pruebas destructivas para evaluar la capacidad estructural residual de los elementos afectados. Estas técnicas permiten obtener información detallada sobre el grado y la extensión del deterioro.

2.2.1 Trabajo de campo

El trabajo de campo desempeña un papel fundamental en este proyecto, ya que los datos de campo se obtienen a través de ensayos no destructivos y análisis teóricos basados en normativas. No obstante, se realizaron visitas específicas al sitio del edificio ubicado en las calles Lorenzo de Garaicoa Manuel Galecio para inspeccionar directamente las condiciones estructurales de las dos columnas y viga motivo de la investigación de este trabajo de titulación.

El trabajo de campo permitió integrar información empírica en el análisis general del proyecto, corroborando las hipótesis iniciales y fortaleciendo las conclusiones sobre el estado del edificio. Estas visitas, realizadas bajo criterios de rigurosidad técnica, no solo respaldaron los resultados obtenidos mediante pruebas de laboratorio y simulaciones, sino que también proporcionaron datos esenciales para ajustar y priorizar las estrategias de rehabilitación propuestas.

c. Técnicas de recolección de datos y observación directa

Las técnicas de recolección de datos son fundamentales para establecer una base confiable en cualquier investigación estructural. En este proyecto, se integraron métodos como la observación directa, ensayos no destructivos, ensayos destructivos y análisis documental para recopilar información precisa sobre el estado actual de las vigas y columnas del edificio en estudio. Estas herramientas permitieron identificar patrones de deterioro, clasificar tipos de daños y evaluar su magnitud sin comprometer la integridad de los elementos estructurales

Observación Directa

Durante la inspección inicial del edificio, se observó un notable deterioro en la fachada, particularmente en las columnas de la planta baja, las cuales soportan gran parte del peso estructural. Estas presentaban evidentes fisuras longitudinales y desprendimientos de concreto que dejaban expuestas las armaduras de acero. Las armaduras mostraban signos avanzados de oxidación, lo que indicaba una prolongada exposición a condiciones ambientales adversas, especialmente la humedad característica del entorno. Además, en amplias zonas, el recubrimiento superficial del concreto había desaparecido, aumentando la susceptibilidad de los elementos a agentes externos.

Se detectaron daños adicionales en las vigas de soporte, las cuales presentaban fisuras inclinadas, probablemente vinculadas a esfuerzos de corte. La superficie del hormigón en diversas zonas exhibía un deterioro considerable, con una apariencia porosa, lo cual facilitaba la posible infiltración de cloruros y agua, lo que aceleraba el deterioro de las armaduras de refuerzo. Estos componentes estructurales exhibían una pérdida significativa de capacidad, lo cual suscita inquietud en cuanto a su funcionalidad y seguridad.

Además, se identificó también que el entorno ambiental y urbano del edificio fue un factor también contribuyó al deterioro observado. La edificación se encuentra situada en un área de elevada actividad, donde las condiciones de humedad y la presencia de cables eléctricos en las proximidades imponen esfuerzos adicionales sobre las columnas y vigas. Además, se observó que las regiones más susceptibles a estas condiciones eran las que mostraban mayores indicios de desgaste y deformación.

Otro aspecto relevante identificado durante la visita fue la falta de un mantenimiento periódico adecuado. En algunos elementos estructurales se habían realizado reparaciones superficiales con parches de concreto, pero estas intervenciones no se

realizaron con los materiales ni las técnicas apropiadas, lo que, en lugar de mitigar el deterioro, lo agravó. Este hecho pone en evidencia la importancia de aplicar estrategias de rehabilitación técnica y sistemática, basadas en un diagnóstico integral.

La evaluación preliminar permitió determinar que las condiciones actuales de las vigas y columnas no garantizan una estabilidad estructural suficiente para resistir esfuerzos adicionales, como eventos sísmicos o sobrecargas. Este diagnóstico inicial sirve como base para establecer prioridades de intervención y diseñar un plan de rehabilitación que restablezca la funcionalidad y seguridad del edificio, cumpliendo con las normativas técnicas correspondientes.

d. Inspección visual o fase de observación

INSTITUCIÓN: Evaluación y rehabilitación de elementos estructurales deteriorados “Vigas y Columnas” de hormigón armado de un edificio de 3 pisos en Guayaquil.

OBRA: Proyecto de titulación

LEVANTO: Byron Baque Campozano

CIUDAD: Guayaquil

FECHA: 19-dic-24

UBICACIÓN: Edificio Carlos Cañar Cordón, calles Lorenzo de Garaicoa y calle Manuel Galecio

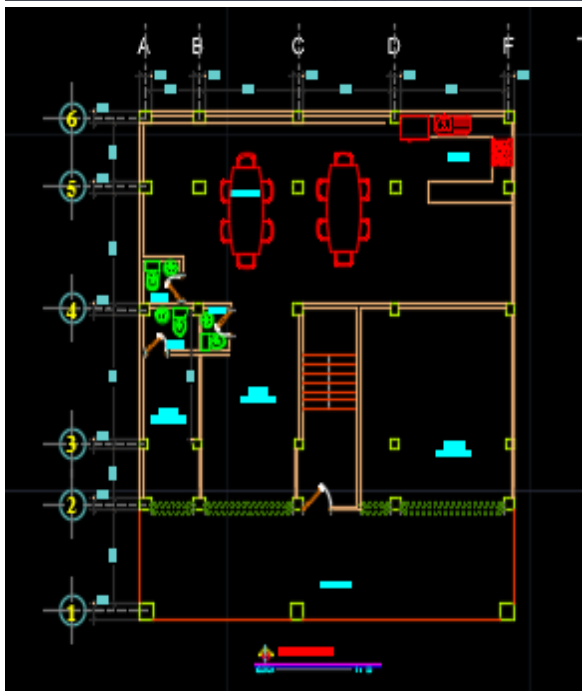
NIVEL	AMBIENTE	ELEMENTO		DIMENSIONES (m)			TIPO DE FALLA	TIPO DE DAÑO			DESCRIPCION DE LOS DAÑOS	DETALLES Y GRAFICO
		ESTRUCTURAL	NO ESTRUCTURAL	ANCHO	LARGO	ALTURA		GRIETA	FISURA	OTROS		
Planta baja	comedor	Columna C2		0,25	0,25	2,40	Desprendimiento de enlucido		Si	Acero de refuerzo oxidado en area de dependimiento de hormigon	La columna presenta desprendimiento de enlucido en en gran parte se observaron fisuras tipcas de corte	
Planta baja	comedor	Columna C3		0,25	0,25	2,40	Desprendimiento de enlucido		Si	Acero de refuerzo oxidado en area de dependimiento de hormigon	La columna presenta desprendimiento de enlucido en en gran parte se observaron fisuras tipcas de corte, se evidencia posible efecto de carbonatación del hormigón	
Planta baja	comedor	VIGA C2 C3		0,25	0,4	2,40	Desprendimiento de enlucido		Si	Acero de refuerzo oxidado en area de dependimiento de hormigon	La viga presenta desprendimiento de enlucido en en gran parte se observaron fisuras transversales típicas de daño por flexión	
Planta baja	Local comercial	Columna C4		0,35	0,35	2,40	Desprendimiento de enlucido		Si	Se evidencia presencia de humedad que estarían provocando que el acero de refuerzo presente oxidacion en area de dependimiento de hormigón	La columna presenta desprendimiento de enlucido en en gran parte se observaron fisuras tipcas de corte	

EVALUACIÓN VISUAL RÁPIDA DE VULNERABILIDAD SISMICA PARA EDIFICACIONES DENTRO DE UN REGIMEN TRANSITORIO Y ESPECIAL PARA EL RECONOCIMIENTO DE EDIFICACIONES EXISTENTES - EDIFICIO CARLOS CAÑAR CORDON - COMO LO ESTABLECE EL NEC-15 - FORMATO FEMA (BUILDING SEISMIC SAFETY COUNCIL) DE LOS ESTADOS UNIDOS.

Código: ECC - 001 / BPBC

ANEXO N°1

100 ESQUEMA ESTRUCTURAL: PLANTA Y ELEVACIÓN DE LA EDIFICACIÓN A EVALUARSE



200	TIPOLOGIA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL		
201	Madera	W1	
202	Mampostería sin refuerzo	URM	
203	Mampostería reforzada	RM	
204	Mixta acero-hormigón o mixta madera-hormig	MX	
205	Pórtico Hormigón Armado	C1	
206	Pórtico H. Armado con muros estructurales	C2	

DATOS EDIFICACIÓN

###	Nombre de la Edificación:	CARLOS CAÑAR CORDON
###	Dirección:	GUAYAQUIL
###	Sitio de referencia:	CALLES LORENZO DE GARAICOA MANUEL GALECIO
###	Tipo de uso:	PRIVADO
###	Número de pisos:	TRES

DATOS CONSTRUCCIÓN

###	Área construida:	527,96 M ²
###	Año de construcción:	1985
###	Año de remodelación:	2025

DATOS DEL PROFESIONAL - MAESTRANTE

###	Nombre del evaluador	BYRON BAQUE CAMPOZANO
###	Cédula del evaluador	1309346953
###	Registro SENESCYT	1016-05-579505

FOTOGRAFÍAS



###	Pórtico H. Armado con mampostería confinada sin refuerzo	C3
###	H. Armado prefabricado	PC
###	Pórtico Acero Laminado	S1
###	Pórtico Acero Laminado con diagonales	S2
###	Pórtico Acero Doblado en frío	S3
###	Pórtico Acero Laminado con muros estructurales hormigón	S4
###	Pórtico Acero con paredes de mampostería de bloque	S5

300	PUNTAJES BÁSICOS, MODIFICADORES Y PUNTAJE FINALES														
301	PARÁMETROS CALIFICATIVOS DE LA ESTRUCTURA	TIPOLOGÍA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL													
		W1	URM	RM	MX	C1	C2	C3	PC	S1	S2	S3	S4	S5	
302	puntaje básico (Rango maximo)	4,4	2	3	1,8	3	3	2	2	3	3	2	3	2	
303	ALTURA														
303A	baja altura (menor a 4 pisos)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
303B	mediana altura (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
303C	gran altura (mayor a 7 pisos)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
304	IRREGULARIDAD														
304A	Irregularidad vertical	N/A	-1	N/A	N/A	-1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
304B	Irregularidad en planta	N/A	-1	N/A	N/A	-1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
305	CODIGO DE LA CONSTRUCCIÓN														
305A	Pre-código moderno (construido antes de 1977) o auto construcción	N/A	N/A	N/A	N/A	-1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
305B	Construido en etapa de transición (desde 1977 pero antes de 2001)	N/A	0	N/A	N/A	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
305C	Post código moderno (construido a partir de 2001)	N/A	1	N/A	N/A	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
306	SUELO														
306A	Tipo de suelo C	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
306B	Tipo de suelo D	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
306C	Tipo de suelo E	N/A	-1	N/A	N/A	-1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
307	PUNTAJE FINAL														
400	GRADO DE VULNERABILIDAD														
401	S menor a 2,0	Alta vulnerabilidad, requiere evaluación especial													
402	S entre 2,0 y 2,5	Media vulnerabilidad													
403	S mayor a 2,5	Baja vulnerabilidad													
404	OBSERVACIONES:														
														FIRMA RESPONSABLE EVALUACIÓN	

Referencia del formulario: FEMA154 (2002). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards – A Handbook. 2nd edition. FEMA

TIPOLOGIA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL	OM ENCLARURR	RANGOS
Madera	W1	0 - 4,4
Mampostería sin refuerzo	URM	0 - 1,8
Mampostería reforzada	RM	0 - 2,8
Mixta acero-hormigón o mixta madera-hormig	MX	0 - 1,8
Pórtico Hormigón Armado	C1	0 - 2,5
Pórtico H. Armado con muros estructurales	C2	0 - 2,8

NOTA:	Valor alto significa bajo riesgo y valor bajo significa que es más vulnerable
-------	---

CONCLUSIÓN

El edificio está construido con hormigón armado y mampostería sin refuerzo, por lo tanto se evalúa en esas tipologías de construcción.

El puntaje de C1 es -0.4, esto indica que el edificio de hormigón armado tiene alta vulnerabilidad sísmica. Esto sugiere que el edificio podría tener características estructurales que lo hacen más susceptible a daños en caso de un sismo, y debería ser objeto de una evaluación más detallada, refuerzos estructurales y medidas de mitigación.

La mampostería sin refuerzo (URM) es una de las tipologías estructurales más vulnerables en caso de un sismo, y el puntaje final de -2.1 confirma que el edificio tiene alta vulnerabilidad sísmica. Esto se debe a factores como:

La irregularidad (tanto vertical como en planta), que aumenta el riesgo de que el edificio se comporte de manera impredecible durante un terremoto.

El hecho de que la construcción es anterior a 1977 y probablemente no cumpla con los estándares modernos de diseño sismorresistente.

La presencia de suelo tipo E, que es más susceptible a movimientos sísmicos, lo que agrava la situación.

RECOMENDACIÓN

Es necesario realizar una evaluación más detallada y considerar refuerzos estructurales urgentes. Este tipo de edificio suele requerir intervenciones significativas para reducir el riesgo de colapso

2.2.2 Trabajo de laboratorio o gabinete

El trabajo de laboratorio incluyó el análisis detallado del modelo estructural mediante el uso del software ETABS, herramienta seleccionada para evaluar las condiciones actuales de las vigas y columnas del edificio ubicado en las calles Lorenzo de Garaicoa y Manuel Galecio. Este proceso permitió representar con precisión la estructura del inmueble, considerando las propiedades mecánicas de los materiales y las cargas a las que está sometida, con el objetivo de identificar zonas de deterioro y determinar la capacidad resistente de los elementos estructurales.

El modelado estructural en ETABS facilitó la simulación del comportamiento del edificio bajo diversas condiciones de carga, incluyendo acciones gravitacionales y sísmicas, conforme a los requisitos de la NEC-15. A través de estas simulaciones se obtuvo información detallada sobre la distribución de esfuerzos, deformaciones y posibles concentraciones de tensiones en vigas y columnas afectadas. Estos datos resultaron fundamentales para evaluar el grado de afectación estructural y definir las estrategias de intervención más adecuadas. Durante esta etapa, se analizaron diferentes escenarios de rehabilitación, considerando la implementación de encamisado de hormigón armado tanto en las vigas como en las columnas con pérdida de capacidad estructural. Los resultados obtenidos a partir del software permitieron evaluar la eficacia de esta técnica, brindando un sustento técnico para su aplicación en la recuperación de la estabilidad del edificio.

2.2.2.1 Ensayos no destructivos

El análisis de las condiciones estructurales de una edificación requiere el uso de técnicas avanzadas que permitan evaluar la calidad y el estado de los materiales sin comprometer su integridad. En este sentido, los ensayos no destructivos (END) juegan un papel clave al proporcionar información detallada sobre la composición, resistencia y posibles defectos del concreto y sus refuerzos sin necesidad de realizar intervenciones invasivas. En el presente estudio, se realizaron diversas pruebas con el propósito de evaluar el estado estructural del edificio y diagnosticar posibles fallas o deficiencias en los elementos constructivos. Entre los métodos aplicados se encuentran:

- **Esclerometría**

La resistencia superficial del concreto fue evaluada mediante un esclerómetro de rebote, un instrumento que permite medir la dureza del material de forma rápida y precisa. Este ensayo resultó clave para identificar variaciones en la calidad del

concreto, lo que podría sugerir problemas en la dosificación de la mezcla o en su proceso de curado.

- El procedimiento consistió en aplicar una serie de impactos controlados sobre la superficie del concreto con el esclerómetro, registrando los valores obtenidos y comparándolos con estándares establecidos para determinar la resistencia del material. Esta técnica es ampliamente utilizada en la evaluación estructural debido a su carácter no destructivo, permitiendo analizar la calidad del concreto sin causar daños en la estructura.



Figura 2-24: Ensayo de esclerometría aplicado en columna

En la imagen se puede observar la ejecución del ensayo de esclerometría sobre una columna. Se aplicó el esclerómetro de rebote sobre la superficie del concreto para medir su resistencia. Además, se observan áreas donde el recubrimiento ha sido retirado, lo que muestra cómo se realizó la inspección de la estructura.

Este ensayo nos permitió obtener información fundamental sobre la uniformidad del concreto y detectar posibles zonas con baja resistencia, lo que contribuyó a la toma de decisiones en el mantenimiento y reforzamiento de la edificación.

- **Pachometria**

Para localizar armaduras de acero dentro de las columnas, vigas y loza, identificar tuberías embebidas y analizar la homogeneidad del material, se empleó un **detector de estructuras**. Este equipo permitió verificar la distribución de los refuerzos estructurales y detectar posibles vacíos o discontinuidades dentro de los elementos de concreto.

En la siguiente imagen se puede observar el proceso de inspección realizado con un detector de estructuras (pachometro):



Figura 2-25 *Ensayo de pachometria en una columna.*

2.2.2.2 Ensayos destructivos

- **Ensayo de extracción de núcleo**

La extracción de núcleos es una técnica empleada en la evaluación de estructuras de hormigón armado para determinar la resistencia a la compresión del concreto in situ. Este método implica la obtención de muestras cilíndricas directamente de los elementos estructurales, las cuales son posteriormente sometidas a ensayos de laboratorio para analizar sus propiedades mecánicas. Aunque la extracción de núcleos implica la remoción de una porción del material, cuando se realiza de manera controlada y siguiendo las normativas establecidas, como la ASTM C42/C42M-20, no compromete la integridad del elemento evaluado (ASTM C42/C42M-20, 2020).

Para la correcta aplicación de esta técnica, es fundamental seleccionar cuidadosamente las ubicaciones de extracción, evitando zonas con alta concentración de esfuerzos o áreas donde la interferencia con las armaduras pueda afectar los resultados del análisis. Una vez obtenidas, las muestras deben ser preparadas adecuadamente, asegurando que las superficies sean planas y paralelas, y que la relación entre la longitud y el diámetro del núcleo esté dentro de los rangos especificados por la normativa. Posteriormente, los núcleos son sometidos a ensayos de compresión en laboratorio, siguiendo los lineamientos de la ASTM C39/C39M, para determinar la resistencia real del material (ASTM C42/C42M-20, 2020).

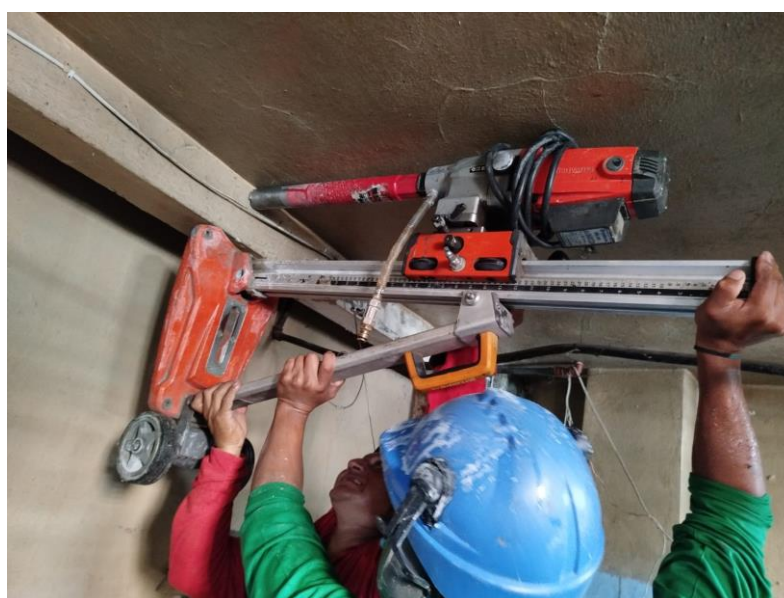


Figura 2-26: Extracción de núcleos de hormigón en viga

- **Ensayo de carbonatación del hormigón**

El proceso de evaluación de la carbonatación del hormigón comienza con la extracción de muestras cilíndricas de concreto, conocidas como núcleos, extraídas de elementos estructurales del edificio, como columnas y vigas. En la figura 2-27 se pueden observar tres núcleos obtenidos de distintos puntos de la estructura, identificados con inscripciones que indican su ubicación de origen. Estas muestras permiten evaluar la profundidad de carbonatación del concreto, un fenómeno que se produce cuando el dióxido de carbono (CO_2) del ambiente reacciona con el hidróxido de calcio presente en la matriz del cemento, reduciendo su pH y comprometiendo la protección de las armaduras de refuerzo.



Figura 2-27: La imagen muestra tres núcleos obtenidos de las dos columnas y viga en estudio.

El siguiente paso en la prueba de carbonatación consiste en la aplicación de fenolftaleína, un indicador de pH que permite identificar visualmente las áreas carbonatadas. En la segunda imagen se observa a un técnico realizando la preparación del reactivo y aplicándolo sobre la superficie de la muestra. La fenolftaleína cambia de color a rosa cuando el pH es superior a 9, lo que indica que el hormigón no ha sido afectado por la carbonatación. Sin embargo, las zonas carbonatadas permanecen incoloras, evidenciando una reducción en la alcalinidad y, por ende, una menor protección del refuerzo metálico contra la corrosión. Este análisis permite determinar la profundidad del daño y establecer medidas correctivas para evitar el deterioro progresivo de la estructura.



Figura 2-28: La imagen muestra aplicación de fenolftaleína, un indicador de pH que permite identificar visualmente las áreas carbonatadas.

2.2.3 Tabulación de datos

El análisis de resultados se enfocó en evaluar el estado estructural del edificio mediante la aplicación de ensayos de esclerometría, con el propósito de determinar la resistencia superficial del concreto y su impacto en la capacidad portante de los elementos estructurales. Esta evaluación resulta crucial para la identificación de zonas debilitadas o afectadas por procesos de degradación, considerando que el inmueble se encuentra en una zona sísmica activa, lo que incrementa la necesidad de un análisis detallado de su comportamiento ante cargas dinámicas.

Para la ejecución de los ensayos, se seleccionaron estratégicamente dos columnas y una viga de hormigón armado, en las cuales se realizaron inspecciones visuales previas para identificar posibles fisuras, desprendimientos o patologías del concreto. Posteriormente, se aplicó el martillo de rebote tipo Schmidt, registrando múltiples lecturas en cada elemento estructural con el fin de obtener una lectura promedio representativa de la resistencia superficial del material.

Los resultados obtenidos a partir de estas mediciones permiten una interpretación técnica de la calidad del concreto, proporcionando información valiosa para el diseño de estrategias de rehabilitación y refuerzo estructural. A continuación, se presenta la tabulación de los datos obtenidos en los ensayos de esclerometría, donde se detallan las lecturas individuales, el cálculo del promedio y la resistencia estimada de cada uno de los elementos evaluados.

2.2.3.1 Ensayo de extracción de núcleos

La Tabla 2.3 presenta los resultados de los ensayos de extracción de núcleos realizados en núcleos extraídos de elementos estructurales del edificio, proporcionando información sobre la resistencia a compresión del concreto en columnas y vigas evaluadas. Estos resultados muestran diferencias significativas entre los distintos elementos. En las columnas B3, las mediciones mostraron valores de resistencia de 166,14 kg/cm² y 169,04 kg/cm², equivalentes al 79.11% y 80.49% de la resistencia nominal de 210 kg/cm², lo que evidencia que este elemento no alcanza los niveles esperados para garantizar su desempeño estructural óptimo. Por el contrario, la columna B4 y la viga C1 (planta alta) superaron el 100% de la resistencia nominal en todas las mediciones, alcanzando valores de 218,45 kg/cm², 218,80 kg/cm², 221,45 kg/cm² y 222,01 kg/cm², lo que indica una mayor capacidad de carga en comparación con el diseño original.

Estos resultados permiten identificar las zonas que requieren intervención para asegurar la estabilidad estructural del edificio. La columna B3 necesita ser reforzada para garantizar que cumpla con las disposiciones de la NEC-15, mientras que los valores superiores obtenidos en la columna B4 y la viga C1 PA confirman que estos elementos están en buen estado estructural y pueden considerarse seguros en su condición actual.

Tabla 2-3 Resultados de ensayos de compresión en núcleos de concreto

	TOMA DE DATOS EXTRACCION NUCLEO Y ENSAYO A COMPRESION				VERSION N 001		CODIGO E- CCC - A001
					FECHA:	17/1/2025	
					RESPONSABLE: Ing. Byron Baque C.		
PROYECTO:	Evaluación y rehabilitación de elementos estructurales deteriorados “Vigas y Columnas” de hormigón armado de un edificio de 3 pisos en Guayaquil.						
LOCALIZACION:	Edificio Carlos Cañar Cordon Calles Lorenzo de Garaicoa y calle Manuel Galecio						
FECHA:	17 Enero 2025						
Element	Fec. Extraccion	Edad de rotura	Carga kn	Factor Conv	Área del cilindro	Fc=kg/cm2	% de resistencia
Columna B3	17/1/2025	> 28 días	127,962	101.97	78.54	166,14	79.11%
Columna B4	17/1/2025	> 28 días	168,250	101.97	78.54	218,45	104.02%
Viga C1 PA	17/1/2025	> 28 días	170,566	101.97	78.54	221,45	105.45%
Columna B3	17/1/2025	> 28 días	130,198	101.97	78.54	169,04	80.49%
Columna B4	17/1/2025	> 28 días	168,520	101.97	78.54	218,80	105.45%
Viga C1 PA	10/1/2025	> 28 días	170,990	101.97	78.54	222,01	105.45%

Nota: La tabla presenta los resultados de los ensayos de compresión en núcleos de concreto extraídos de vigas y columnas del edificio en estudio.

2.2.3.2 Ensayos de esclerometría

La Tabla 2.4 presenta los resultados de los ensayos de esclerometría realizados en dos columnas y una viga del edificio, con el propósito de evaluar la resistencia superficial del concreto y su relación con la capacidad portante de los elementos estructurales. Dado que el inmueble se encuentra en una zona sísmica activa, este tipo de evaluación resulta indispensable para identificar posibles zonas debilitadas o afectadas por procesos de degradación, y tomar decisiones informadas sobre estrategias de rehabilitación.

El ensayo se realizó utilizando el martillo de rebote tipo Schmidt, registrando múltiples lecturas en cada elemento estructural para obtener un valor promedio representativo de

la resistencia superficial del concreto. En las columnas B3 y B4, así como en la viga C1 PA, las lecturas oscilaron entre 31 y 42 unidades de rebote, lo que permitió calcular la resistencia superficial promedio de cada elemento.

Los resultados muestran diferencias significativas entre los elementos evaluados. La columna B3 presentó una resistencia promedio de 194,11 kg/cm², lo que indica una resistencia moderada que podría estar relacionada con cierta pérdida de calidad del concreto superficial. Por su parte, la columna B4 alcanzó una resistencia de 236,76 kg/cm², evidenciando una mejor condición estructural en comparación con la columna B3. Finalmente, la viga C1 PA mostró una resistencia superficial de 233,82 kg/cm², confirmando que su estado es consistente con los resultados obtenidos en la columna B4, lo que sugiere una mejor conservación del material en estos elementos.

Tabla 2-4: Resultados de ensayos de esclerometría

	TOMA DE DATOS ENSAYOS DE ESCLEROMETRIA							VERSION N 001		CODIGO E- CCC - A002	
								FECHA:	17-ene-25		
								RESPONSABLE: Ing. Byron Baque C.			
PROYECTO:	Evaluación y rehabilitación de elementos estructurales deteriorados “Vigas y Columnas” de hormigón armado de un edificio de 3 pisos en Guayaquil.										
LOCALIZACION:	Edificio Carlos Cañar Cordon Calles Lorenzo de Garaicoa y calle Manuel Galecio										
FECHA:	17 Enero 2025										
ELEMENTO	POSICION				LECTURAS				LECTURA PROMEDIO	RESISTENCIA Kg/Cm2	
	VER	HOR	INC+	INC-	L1	L2	L3	L4			
COLUMNA B3		90			36	33	32		31	33	194,11
COLUMNA B4		90			40	42	41		38	40,25	236,76
VIGA C 1PA		90			42	41	40		36	39,75	233,82

Nota: Los valores de resistencia superficial presentados en la Tabla corresponden a mediciones realizadas mediante el ensayo de esclerometría con el martillo de rebote tipo Schmidt.

2.2.3.3 Ensayos de carbonatación.

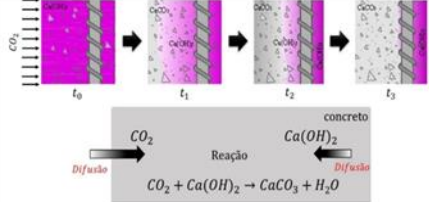
El análisis de los resultados obtenidos a partir del ensayo de carbonatación en las muestras recolectadas muestra variaciones significativas en la profundidad del área carbonatada, lo que proporciona una visión detallada del estado actual del concreto en términos de degradación química. Estos resultados permiten identificar las zonas más

vulnerables y determinar el nivel de intervención necesario para garantizar la seguridad estructural del edificio. La Tabla 2-5 presenta los resultados obtenidos en tres elementos estructurales (dos columnas y una viga), junto con sus respectivas observaciones.

Análisis por Elemento:

- Columna B3 (Muestra N1): Se registró una profundidad de carbonatación de 10 mm, lo que representa el 10% de la longitud total del espécimen. Aunque la penetración no es excesiva, se recomienda intervención, dado que esta profundidad podría estar comprometiendo la protección pasiva del acero de refuerzo. Es fundamental evaluar si la armadura está afectada para aplicar las medidas correctivas necesarias.
- Columna B4 (Muestra N2): La profundidad de carbonatación fue de 5 mm, equivalente al 5% de la longitud del espécimen. Aunque este resultado es menos preocupante que el de la columna B3, sigue siendo importante considerar una intervención preventiva para evitar el avance del proceso de carbonatación, especialmente en condiciones de alta humedad y exposición continua al CO₂.
- Viga B3-B4 (Muestra N3): Este elemento presentó el nivel más alto de carbonatación, alcanzando 40 mm de profundidad, lo que equivale al 40% del espécimen. Este nivel elevado es indicativo de un deterioro significativo del concreto, con alta probabilidad de que las armaduras estén expuestas. La intervención en este caso debe ser inmediata, implementando refuerzos estructurales y tratamientos para detener el proceso de degradación y proteger el acero de refuerzo.

Tabla 2-5 Resultado de ensayo de carbonatación

		Evaluación y Rehabilitación de Elementos Estructurales Deteriorados "Vigas y Columnas" de Hormigón Armado de un Edificio de 3 Pisos en Guayaquil.		VERSION N 002	CODIGO E- CCC - A001			
				FECHA:	17-ene-25			
ENSAYO DE CARBONATACION DEL CONCRETO								
DATOS EDIFICACIÓN				IMÁGENES				
Nombre de la		Carlos Cañar Córdón						
Dirección:		Calles Lorenzo de Garaicoa y calle Manuel Galecio						
Sitio de referencia:		Canton Guayaquil Parroquia Tarqui						
Tipo de uso:		Vivienda Unifamiliar						
Número de pisos:		3 Niveles						
Área construida:		527,96 M2						
Año de construcción:		527,96 M2						
DATOS DEL PROFESIONAL								
Nombre del evaluador		Ing. Byron Baque Campozano						
Cédula del evaluador		1309346953						
Registro SENESCYT		1016-05-579505						
DATOS DEL ENSAYO								
Indicador		Disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%						
Elemento estructural	ensayo in situ	columna C2	columna C3	viga				
		Planta Baja	Planta Baja	Planta Baja				
CODIFICACIÓN		C2	C3	C2 - C3				
F'c del hormigon	166,14 Kg/Cm2	Temperatura y Humedad relativa	24 C	Exposicion a lluvia	No			
		Evaluación y Rehabilitación de Elementos Estructurales Deteriorados "Vigas y Columnas" de Hormigón Armado de un Edificio de 3 Pisos en Guayaquil.		VERSION N 002	CODIGO E- CCC - A001			
				FECHA:	17-ene-25			
El ph es la escala con que se mide la alcalinidad o acidez de las sustancias.   Al bajar el ph del concreto, el acero de refuerzo queda desprotegido (ya que pierde su estado de pasivación) y comienza el proceso de oxidación de la varilla. Legenda: ■ Zona não carbonatada ■ Zona parcialmente carbonatada ■ Zona carbonatada								
"Las áreas carbonatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor a 9 tomarán un color rosado"								
NIVEL	ELEMENTO	UBICACIÓN EJE	Longitud del especimen (mm)		Longitud de profundidad del área carbonatada (mm)		% de Carbonatación	Observacion
Planta baja	Columna	C2	Muestra N1	100	Muestra N1	10	10,0%	Se requiere intervencion
Planta baja	Columna	C3	Muestra N2	100	Muestra N2	5	5,0%	Se requiere intervencion
Planta baja	Viga	C2 - C3	Muestra N3	100	Muestra N3	40	40,0%	Se requiere intervencion
RESULTADOS								
De acuerdo a lo requerido en las normas NEC-15, la carbonatación es una preocupación seria, especialmente en la viga C2 - C3, que muestra una penetración muy profunda (40 mm). Las columnas C2 y C3, aunque muestran un nivel menor de carbonatación, también deben ser monitoreadas y posiblemente intervenidas, dependiendo de su ubicación y exposición.								
Nota: El concreto con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo contra la corrosión. Cuando la carbonatación empieza a experimentar la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9), es posible que empiece la corrosión, dando como resultado un agrietamiento y fisuramiento del concreto.								

El concreto tiene una alcalinidad natural alta (pH 12-13), lo que protege las armaduras de acero contra la corrosión. Sin embargo, cuando el proceso de carbonatación reduce el pH a valores inferiores a 9, la protección se pierde, permitiendo

la corrosión del acero. Esta condición genera fisuras y deterioro progresivo del concreto si no se toman medidas preventivas. Es imprescindible monitorear regularmente estos elementos y planificar intervenciones de rehabilitación estructural, siguiendo las recomendaciones de la NEC-15, para garantizar la seguridad y durabilidad del edificio.

2.2.3.4 Ensayo de pachometría

El ensayo de detección de varillas se realizó con el objetivo de identificar la ubicación, el diámetro y el recubrimiento de las barras de refuerzo en las columnas y vigas evaluadas. Este procedimiento es esencial para verificar la conformidad del refuerzo estructural con el diseño original y detectar posibles deficiencias que puedan afectar la seguridad de la estructura. La Tabla 2-6 presenta los resultados obtenidos, detallando las dimensiones y características de las armaduras detectadas en las columnas B3 y B4, así como en la viga ubicada entre estos elementos.

Resultados del Ensayo:

- Columna B3 y B4: Se detectaron armaduras consistentes con 4 barras de 12 mm de diámetro, acompañadas de estribos de 8 mm cada 20 cm. Esta disposición es coherente con el diseño estructural estándar para columnas de hormigón armado en edificios de varios niveles. El recubrimiento de concreto y las dimensiones de las barras se mantuvieron dentro de los parámetros esperados, lo que sugiere una correcta ejecución del refuerzo durante la construcción.
- Viga B3-B4: La viga mostró una disposición de armadura más compleja, con 4 barras de 12 mm en la parte superior y otras 4 barras de 12 mm en la parte inferior, reforzadas con estribos de 12 mm cada 20 cm. Este tipo de configuración es típico para vigas sometidas a mayores esfuerzos de flexión y cortante.

Los datos obtenidos reflejan una adecuada distribución del refuerzo en las columnas y la viga evaluadas. La presencia de estribos cada 20 cm proporciona un confinamiento adicional al núcleo del concreto, mejorando la capacidad de carga y la resistencia a deformaciones excesivas. Sin embargo, es importante continuar monitoreando el estado de las armaduras, especialmente en áreas expuestas a humedad constante o agentes corrosivos, para prevenir posibles problemas futuros.

Tabla 2-6: Resultados de ensayos de detección de varillas.

	Evaluación y Rehabilitación de Elementos Estructurales Deteriorados “Vigas y Columnas” de Hormigón Armado de un Edificio de 3 Pisos en Guayaquil.				VERSIO N N 002	CODIGO E- CCC - A001
					FECHA:	17-ene-25
ENSAYO DE DETECCIÓN DE ARMADURAS - ENSAYO DE PACHOMETRIA						
100	ESQUEMA ESTRUCTURAL: PLANTA Y ELEVACIÓN DE LA EDIFICACIÓN A EVALUARSE				101	DATOS EDIFICACIÓN
DATOS CONSTRUCCIÓN				Nombre de la Edificación:	Edificio Carlos Cañar Cordón	
Área construida:	527,96 M2			Dirección:	Calles Lorenzo de Garaicoa y calle Manuel Galecio	
Año de construcción:	527,96 M2			Sitio de referencia:	Canton Guayaquil Parroquia Tarqui	
Año de remodelación:	2025			Tipo de uso:	Vivienda Unifamiliar	
ELEMENTOS EVALUADOS						GRAFICO/ DETALLE ARMADURA
Nivel	Elemento	Ubicación eje	Dimensiones			
			Longitud (cm)	ancho (Cm)	altura (Cm)	
Planta baja	Columna	C2	25	25	240	4 ϕ 12 mm Estribos ϕ 8 mm/ 20 Cm
Nivel	Elemento	Ubicación eje	Dimensiones			
			Longitud (cm)	ancho (Cm)	altura (Cm)	
Planta baja	Columna	C3	25	25	240	4 ϕ 12 mm Estribos ϕ 8 mm/ 20 Cm
Nivel	Elemento	Ubicación eje	Dimensiones			
			Longitud (cm)	ancho (Cm)	altura (Cm)	
Planta baja	Viga	C2 - C3	25	25	240	4 ϕ 12 mm Armadura superior 4 f 12 mm Armadura inferior Estribo ϕ 12 mm/ 20 Cm
404	OBSERVACIONES:				FIRMA RESPONSABLE EVALUACIÓN: Ing. Byron Baque Campozano	
ACI 228.2R , BS 1881-204						
Descripción: Identifica la ubicación, diámetro y recubrimiento de las barras de refuerzo de acero en concreto armado. Equipos: Escáner de armaduras (Pachometro). Norma: ACI 228.2R , BS 1881-204 Procedimiento: 1. Limpiar la superficie de concreto. 2. Configurar el escáner para la profundidad estimada de las barras. 3. Desplazar el equipo de detección en líneas paralelas sobre la superficie del concreto. 4. Registrar la ubicación, diámetro y el espesor del recubrimiento de las armaduras detectadas.						

2.2.3.5 Análisis de los daños detectados

Durante la inspección de los elementos estructurales, se identificaron diversos daños que comprometen la integridad estructural del edificio, entre ellos fisuras superficiales, pérdida de sección en las vigas y columnas, y presencia significativa de corrosión en las armaduras de refuerzo. Estos deterioros han reducido la capacidad portante de los elementos afectados, lo que pone en riesgo su desempeño frente a cargas estáticas y dinámicas, especialmente en un entorno sísmico como el de la ciudad de Guayaquil.

2.2.3.6 Evaluación de la capacidad portante

Los resultados obtenidos a través de los ensayos destructivos y no destructivos fueron comparados con los criterios establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) y las directrices del ACI 562-19. Se evidenció que algunos elementos estructurales no alcanzan los valores mínimos de resistencia especificados, lo que representa una disminución importante en la capacidad portante. Este diagnóstico confirma la necesidad de implementar medidas correctivas inmediatas para garantizar la seguridad y estabilidad estructural del edificio.

2.2.3.7 Evaluación del estado actual estructural

El proceso de evaluación estructural incluyó la recopilación y análisis de datos mediante inspecciones visuales, ensayos técnicos y modelado computacional para determinar el grado de deterioro de las vigas y columnas. Este enfoque integral permitió caracterizar con precisión el estado actual del edificio y definir las intervenciones más adecuadas.

✓ Modelación estructural

Mediante el uso del software ETABS se modeló el comportamiento estructural bajo las condiciones actuales de carga. Este análisis permitió identificar la distribución de esfuerzos, tensiones y deformaciones en las vigas y columnas, proporcionando información clave sobre la capacidad residual de los elementos estructurales y facilitando la identificación de zonas críticas.

✓ Comparación con normativas

Los resultados del análisis fueron contrastados con las disposiciones de la NEC-15 y el ACI 562-19 para verificar el cumplimiento de los estándares de seguridad estructural. Esta comparación permitió identificar las deficiencias que requieren intervención inmediata en la etapa de rehabilitación.

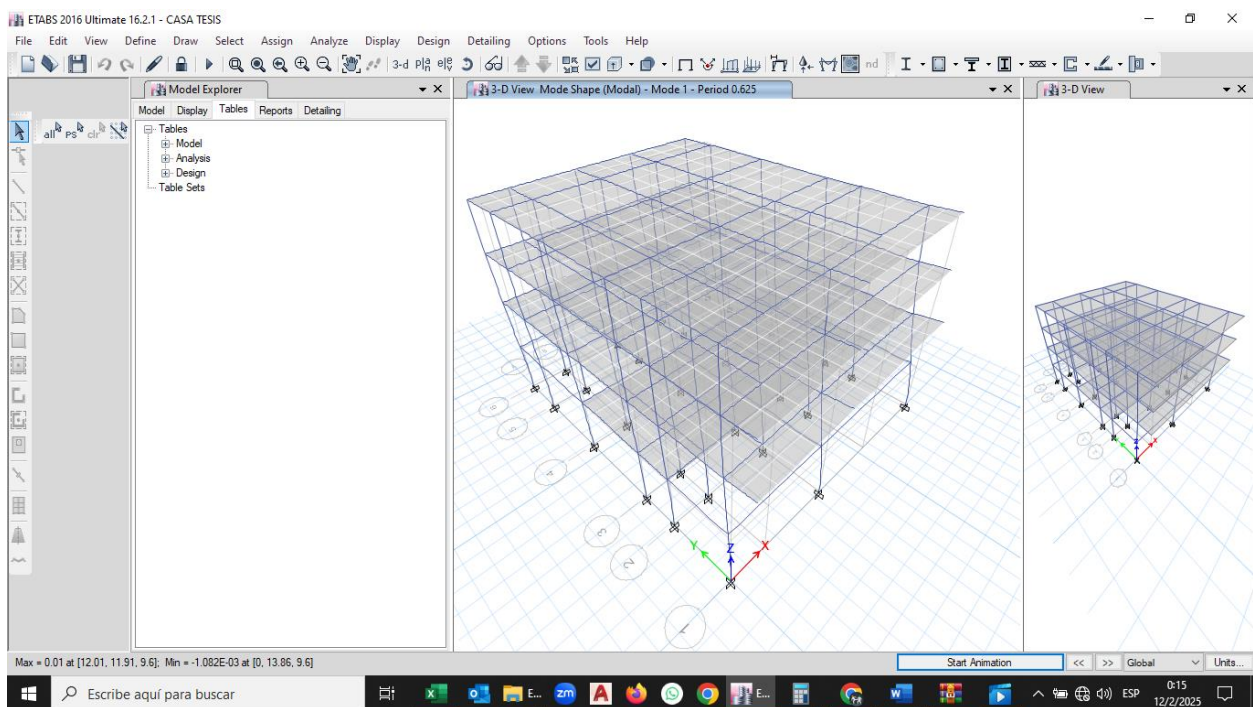
El procedimiento implementado proporcionó una evaluación integral del estado estructural, facilitando la priorización de las intervenciones necesarias para restablecer las condiciones de resistencia y funcionalidad del edificio.

2.2.3.8 Modelo matemático y configuración estructural

El análisis estructural del edificio se realizó mediante un modelo tridimensional utilizando el software ETABS V21.1.0, basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Este modelo permitió simular el comportamiento estructural del edificio, evaluando la interacción entre elementos como vigas, columnas y muros de corte. Se utilizaron las especificaciones de la NEC-15 para garantizar el cumplimiento de los requisitos sísmicos y de seguridad estructural.

Las propiedades del hormigón y el acero de refuerzo fueron asignadas de manera homogénea e isotrópica para reflejar con precisión las condiciones reales de los materiales utilizados.

Figura 2-29: Modelo tridimensional en ETABS del edificio evaluado



2.2.3.9 Modos de vibración

Modos de Vibración

El análisis modal realizado permitió identificar los tres primeros modos de vibración de la estructura, los cuales son fundamentales para evaluar su comportamiento dinámico. La interpretación de estos modos asegura que más del 70% de la masa de la estructura

participe en las direcciones predominantes, evitando así movimientos torsionales no deseados y garantizando una respuesta estructural adecuada.

Primer Modo de Vibración: Representa el comportamiento predominante en dirección X. Se observa cómo las deformaciones se concentran en el extremo derecho de la estructura, lo que muestra una mayor flexibilidad en esa zona (figura 2-28).

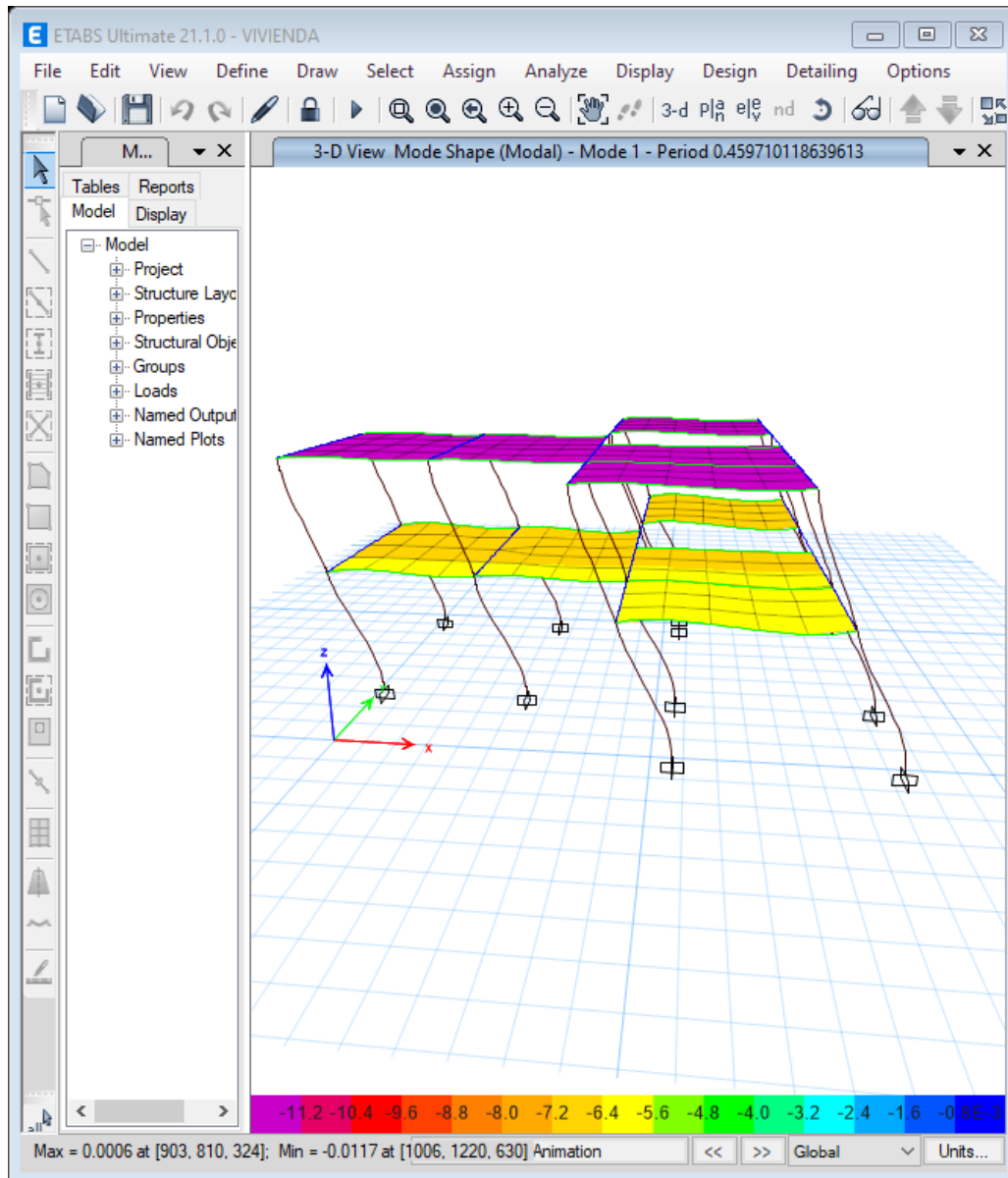


Figura 2-30: Primer Modo de Vibración (T: 0.459 seg).

Segundo modo de vibración: Ilustra las deformaciones principales en la dirección Y. La respuesta de la estructura es más homogénea en comparación con el primer modo, aunque se identifican ciertas áreas críticas que requieren verificación adicional (figura 2-29).

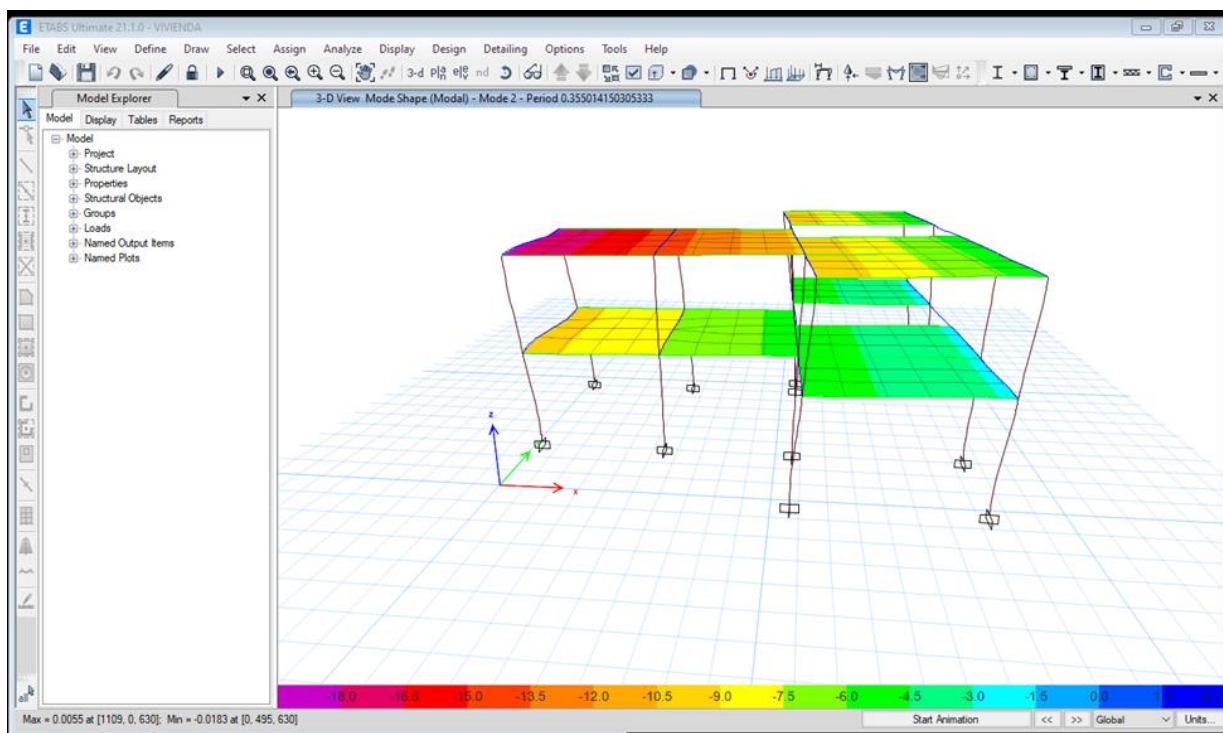


Figura 2-31: Segundo Modo de Vibración (T: 0.355 seg).

Tercer Modo de Vibración: Muestra el comportamiento torsional de la estructura. Las deformaciones son menores en comparación con los modos anteriores, pero es esencial monitorear las áreas donde las fuerzas se concentran para evitar daños acumulativos (figura 2-30).

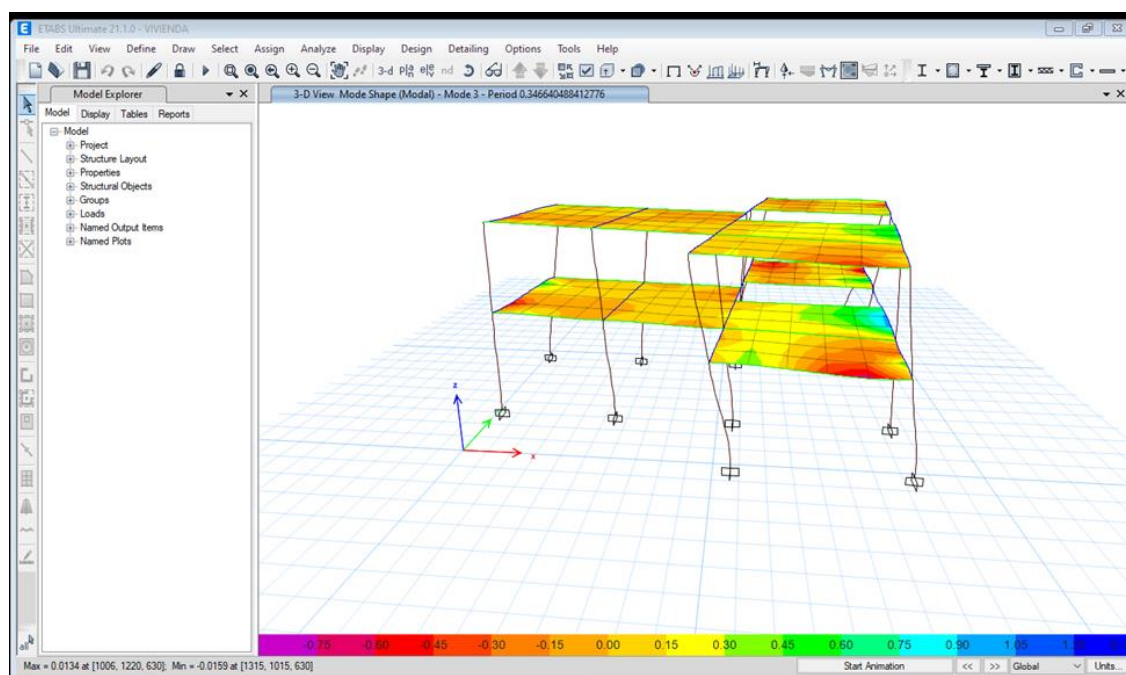


Figura 2-32: Tercer Modo de Vibración (T: 0.345 seg)

2.2.3.10 *Análisis Espectral*

El análisis espectral se llevó a cabo para evaluar la respuesta dinámica del edificio frente a las componentes espectrales del sismo de diseño. Este análisis permite obtener una visión más precisa del comportamiento estructural al considerar las características del espectro de diseño definido en la NEC-15, ajustado por los factores de amplificación según la categoría de uso y el tipo de suelo.

Los resultados del análisis mostraron que las fuerzas internas generadas son menores que las obtenidas en el análisis estático, lo que confirma que la estructura cumple con los requisitos de seguridad establecidos por la normativa.

La Figura 2-31 ilustra la distribución de los desplazamientos máximos por piso en función del análisis espectral. Se observa que los desplazamientos son mayores en la cubierta del edificio, pero no superan los límites de desplazamiento establecidos en la normativa.

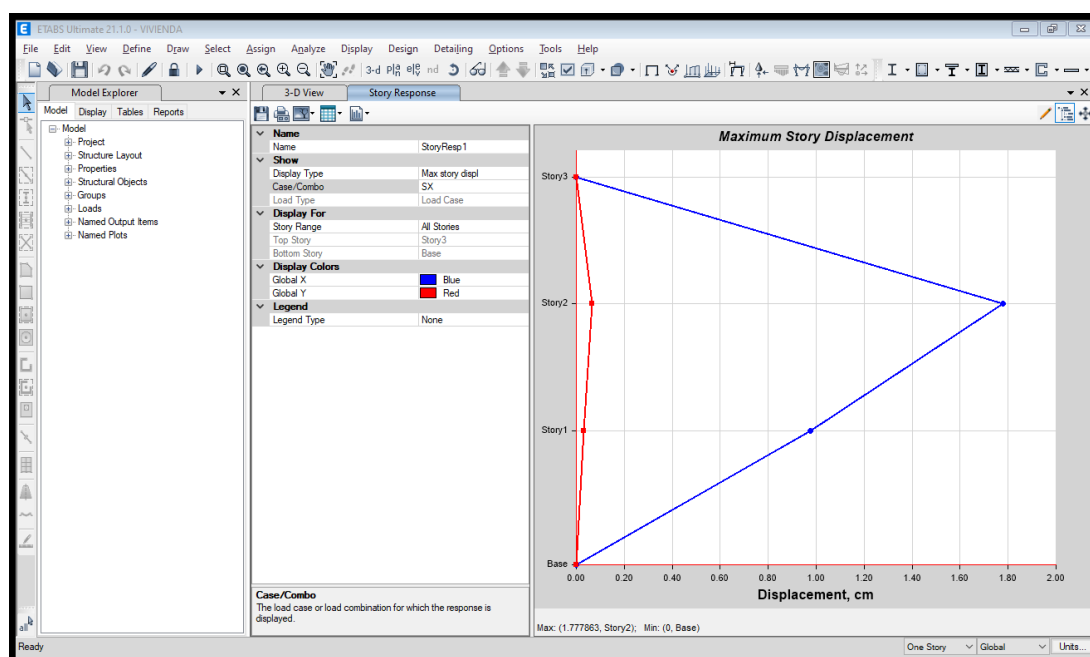


Figura 2-33: Espectro de Respuesta NEC-15

2.2.3.11 *Deformaciones Verticales*

Se evaluaron las deformaciones máximas de servicio en las vigas de losas y de cubierta del edificio, verificando que no excedan la deformación límite establecida por el código ($L/360$).

- Longitud de vano losa: 515 cm
- Longitud de vano cubierta: 515 cm

Los resultados mostraron que las deformaciones están dentro de los límites aceptables.

La figura 2-1 ilustra las deformaciones verticales que se presentan en la viga losa bajo la combinación de carga CM-CV. Se muestra la distribución del esfuerzo cortante, momento flector y la deformación, permitiendo identificar las zonas críticas que requieren especial atención. La representación gráfica ayuda a visualizar la magnitud máxima y mínima de la deformación, facilitando la comparación con los valores límite establecidos por las normativas vigentes.

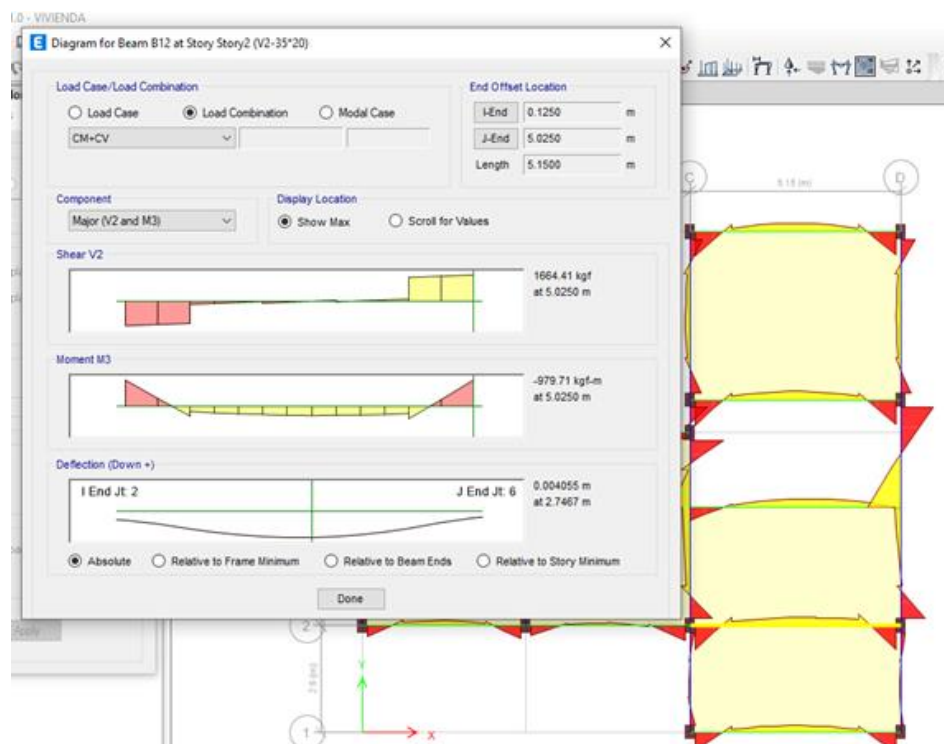


Figura 2-34: Deformaciones verticales en viga losa

En la figura 2-32 se muestran las deformaciones verticales correspondientes a la viga de la cubierta. Se observa una mayor concentración de deformaciones en ciertos puntos, lo que es indicativo de áreas donde la capacidad portante podría estar comprometida. El diagrama permite analizar los esfuerzos principales y verificar si el comportamiento estructural sigue siendo seguro bajo las cargas combinadas.

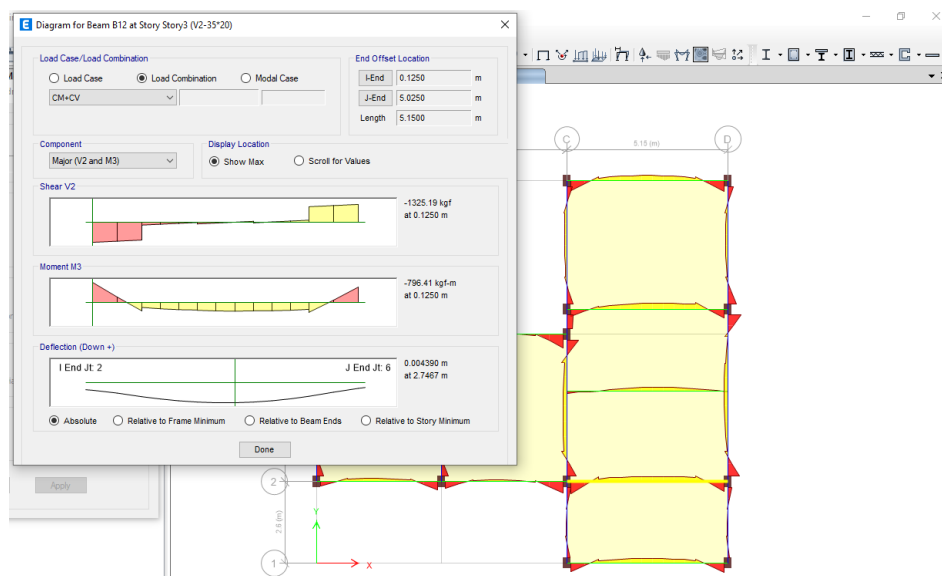


Figura 2-35: Deformaciones Verticales en Viga Cubierta

Esta representación gráfica muestra las deformaciones verticales globales del edificio, destacando el comportamiento estructural general bajo las diferentes combinaciones de carga. El análisis permite evaluar la respuesta global de la estructura y verificar el cumplimiento de los desplazamientos máximos permitidos por la NEC-15. La información obtenida es fundamental para determinar la necesidad de refuerzos adicionales en los elementos.

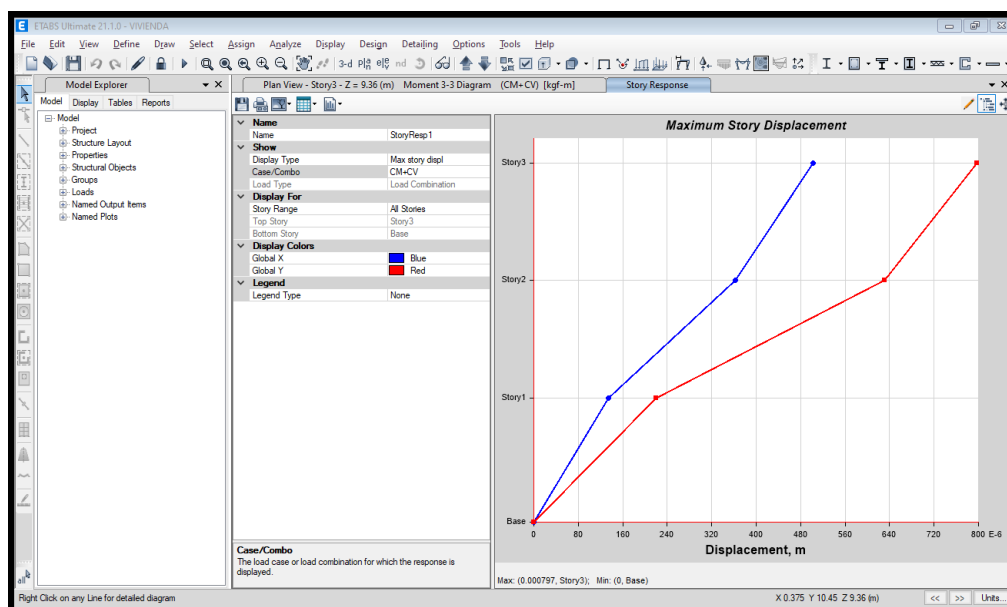


Figura 2-36: Deformaciones Verticales Globales

2.2.3.12 Comprobación de cortante basal estático y dinámico acorde a NEC-15

De acuerdo con la NEC-15, el valor del cortante basal dinámico debe ser al menos el 80% del cortante basal estático para estructuras regulares y el 85% para estructuras irregulares. El análisis realizado verificó este criterio, asegurando el cumplimiento de la normativa mediante la comparación de los resultados del cortante basal estático y dinámico. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Deformaciones Verticales

En la Tabla 2-7 se muestra el resumen de las deformaciones verticales obtenidas bajo las combinaciones de carga consideradas. Las deformaciones máximas en las vigas losa y vigas cubierta cumplen con los límites permitidos por la normativa, asegurando que no se presenten deflexiones excesivas que puedan comprometer la funcionalidad estructural.

Tabla 2-7: Deformaciones Verticales

Estado de carga	δ_{max} (cm)	Δ_{per} (L/360) (cm)	$\Delta_{max} < \delta_{per}$ (cm)	Ubicación
CM+CV	0.044	1.04	ok	Viga losa
CM+CV	0.039	1.04	ok	Viga cubierta

La Tabla 2-8 presenta el valor del cortante basal estático obtenido en el análisis. Este valor es la base de comparación para verificar el cumplimiento del requisito de la NEC-15 respecto al cortante basal dinámico.

Tabla 2-8: Cortante Basal Estático

Edificación	Cortante Basal Estático (Tonf)
VIVIENDA	45.86

En la Tabla 2-9 se muestra el resultado del análisis dinámico en la dirección del sismo X. El valor del cortante basal dinámico cumple con el porcentaje mínimo requerido por la NEC-15, superando el 85% del valor estático.

Tabla 2-9: Cortante Dinámico Sismo X

Proyecto	Cortante Dinámico Mín (Tonf)	Vx (Tonf)	Vy (Tonf)	Resultante (Tonf)	Observación
VIVIENDA	38.98	40.87	0.69	40.88	Ok

La Tabla 2-10 muestra el cortante basal dinámico para el sismo en la dirección Y, el cual también cumple con el porcentaje mínimo requerido.

Tabla 2-10: Cortante Dinámico Sismo Y

Proyecto	Cortante Dinámico Mín (Tonf)	Vx (Tonf)	Vy (Tonf)	Resultante (Tonf)	Observación
VIVIENDA	38.98	0.69	40.16	40.16	Ok

2.2.3.13 Resultados del análisis modal

El análisis modal del edificio mostró que los tres primeros modos de vibración son los más significativos, garantizando que más del **70%** de la masa estructural participe en las direcciones predominantes, evitando movimientos torsionales no deseados.

Tabla 2-11: Resultados del análisis modal

Period	UX (%)	UY (%)	UZ (%)	SumUX	SumUY	SumUZ
0.53	82.4	0.1	0.0	0.82	0.00	0.00
0.46	0.1	75.4	0.0	0.83	0.75	0.00
0.41	0.1	6.1	0.0	0.83	0.82	0.00

El cortante basal obtenido por el método dinámico, en las direcciones principales, es mayor al 85% del cortante basal obtenido por el método estático.

- Sismo en dirección X: 89%
- Sismo en dirección Y: 88%

Cumpliendo con el mínimo establecido por la normativa NEC-15.

2.2.3.14 Deformaciones y desplazamientos

• Desplazamientos horizontales

El análisis de desplazamientos laterales permitió evaluar el comportamiento de la estructura bajo cargas sísmicas, verificando el cumplimiento de los límites establecidos por la NEC-15. Este análisis es fundamental para garantizar la seguridad estructural y evitar deformaciones excesivas que puedan comprometer la estabilidad del edificio.

Los desplazamientos máximos se registraron en la cubierta del edificio, sin superar el límite permitido por la normativa.

- Desplazamiento Máximo en Dirección X: 1.72 cm
- Desplazamiento Máximo en Dirección Y: 1.85 cm
- Límite de Desplazamiento según NEC-15: 2.50 cm

Estos resultados muestran que la estructura mantiene un comportamiento adecuado bajo las condiciones de carga sísmica consideradas, sin superar los valores de desplazamiento límite establecidos.

2.2.3.15 Comparación con el Límite Normativo

El análisis de desplazamientos permitió verificar el cumplimiento de la normativa NEC-15 para garantizar que la estructura se mantenga dentro de los límites de seguridad recomendados. Los desplazamientos horizontales máximos registrados se comparan con el límite permitido por la normativa. Los resultados confirman que la estructura cumple con los criterios establecidos para desplazamientos laterales.

A continuación, se presenta un resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2-12: Comparación de desplazamientos horizontales

Dirección	Desplazamiento Máximo (cm)	Límite NEC-15 (cm)	Cumplimiento
X	1.72	2.50	Cumple
Y	1.85	2.50	Cumple

Los resultados muestran que los desplazamientos máximos registrados en ambas direcciones (X e Y) se encuentran por debajo del límite establecido por la NEC-15. Esto evidencia que la estructura responde favorablemente a las cargas sísmicas consideradas, manteniendo la estabilidad y reduciendo el riesgo de deformaciones excesivas que puedan comprometer su integridad estructural. Esta comparación garantiza que el diseño y la ejecución del reforzamiento cumplen con las exigencias normativas, asegurando la seguridad estructural del edificio.

2.2.4 Solución a diseñar

La propuesta de rehabilitación estructural fue desarrollada para garantizar la estabilidad del edificio, prolongar su vida útil y corregir las deficiencias detectadas en las columnas y vigas deterioradas. El diseño estructural tomó como referencia los resultados del análisis computacional realizado en ETABS y los ensayos efectuados en campo, asegurando el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas por la NEC-15.

2.2.4.1 Planteamiento de la solución estructural

El análisis estructural del edificio evaluado permitió identificar las áreas críticas en las vigas y columnas, las cuales presentaban deterioro significativo debido a la pérdida de sección y la exposición prolongada a agentes ambientales adversos. Para garantizar

la seguridad y funcionalidad de la edificación, se desarrolló un modelo computacional detallado utilizando el software ETABS V21.1.0, basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Este modelo integró los datos obtenidos de los ensayos destructivos y no destructivos, tales como la resistencia a compresión del concreto y el estado de las armaduras, brindando una representación fiel de las condiciones actuales del edificio.

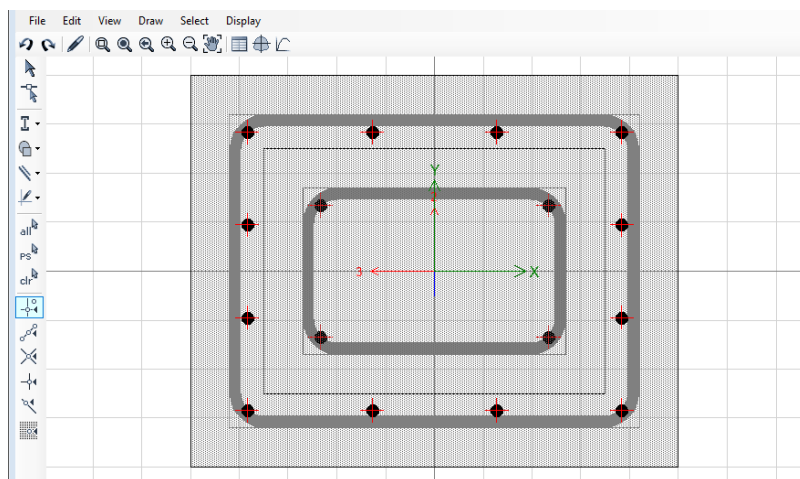
El proceso de modelado estructural incluyó la asignación de propiedades mecánicas específicas para el concreto y el acero de refuerzo, considerando la resistencia residual obtenida en los ensayos de extracción de núcleos y la profundidad de carbonatación detectada en las columnas y vigas principales. Esta metodología permitió evaluar la respuesta de la estructura ante diferentes escenarios de carga, incluidas las combinaciones de carga sísmica definidas en la NEC-15, y detectar zonas con deformaciones y desplazamientos superiores a lo recomendado por la normativa.

Una vez modelada la estructura, se realizaron múltiples simulaciones para analizar su comportamiento bajo cargas gravitacionales y dinámicas. Los resultados mostraron que algunas columnas y vigas presentaban desplazamientos y deformaciones cercanas al límite permitido, lo que confirmaba la necesidad de intervenir para reforzar y estabilizar estos elementos.

Entre las alternativas evaluadas para la rehabilitación estructural, se consideraron las siguientes:

- **Encamisado de concreto armado** para incrementar la sección transversal de las columnas más afectadas y mejorar su capacidad de carga.
- **Refuerzo de vigas**, enfocado en mejorar la resistencia a la flexión y controlar las deformaciones verticales.
- **Aplicación de aditivos anticorrosivos y recubrimiento protector** para prevenir futuros procesos de degradación en las armaduras expuestas.

Estas intervenciones fueron validadas mediante el modelo estructural, simulando las nuevas condiciones de carga después del reforzamiento. El análisis mostró que las soluciones propuestas garantizan la estabilidad del edificio y cumplen con las exigencias de la NEC-15, asegurando un desempeño estructural adecuado ante eventos sísmicos y cargas permanentes.



2.2.4.2 Diseño estructural de la propuesta de rehabilitación

Para las columnas afectadas, se determinó la necesidad de aplicar encamisado de concreto reforzado, una técnica que permite aumentar la capacidad portante y restaurar la sección perdida debido a procesos de deterioro y carbonatación. Esta intervención se diseñó considerando las siguientes etapas:

1. **Preparación de la superficie:** Retiro del concreto deteriorado y limpieza de las armaduras expuestas, eliminando todo residuo de óxido para garantizar la correcta adherencia del nuevo concreto.
2. **Colocación de nuevas armaduras:** Refuerzo adicional con barras longitudinales y estribos con espaciamientos definidos, según el cálculo estructural, para mejorar la resistencia a compresión y corte.
3. **Aplicación del concreto de encamisado:** Se utilizó un concreto de alta resistencia, modificado con aditivos anticorrosivos para proteger las armaduras existentes y evitar futuros procesos de degradación.

Las simulaciones realizadas después de incorporar las mejoras estructurales mostraron una reducción significativa en las deformaciones y un aumento en la capacidad de carga de las dos columnas y la viga intervenidas. El modelo estructural actualizado verificó que las condiciones reforzadas cumplen con los criterios de seguridad de la NEC-15, asegurando que el edificio pueda resistir futuras cargas sísmicas sin comprometer su estabilidad.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

Los resultados obtenidos en el presente estudio se basan en la aplicación de cuatro ensayos realizados para evaluar el estado estructural del edificio en análisis, utilizando métodos destructivos y no destructivos. Estos ensayos permitieron recopilar datos fundamentales sobre la resistencia, durabilidad y estabilidad de los elementos estructurales. En primer lugar, los ensayos destructivos, que incluyeron la extracción de núcleos y el análisis de carbonatación, proporcionaron información detallada sobre la calidad del hormigón y el estado de las armaduras internas. Por otro lado, los ensayos no destructivos, como la pachometría y la esclerometría, permitieron identificar características importantes del hormigón y las armaduras sin comprometer la integridad de la estructura.

En el ensayo de extracción de núcleos, se obtuvieron muestras cilíndricas de los elementos estructurales para evaluar su resistencia a la compresión y detectar fisuras internas. Los resultados mostraron variaciones en la resistencia del hormigón, indicando zonas con posibles defectos de fabricación o degradación debido a la exposición prolongada a agentes externos. De manera complementaria, el análisis de carbonatación reveló que la profundidad de este proceso químico alcanzó valores que comprometen la alcalinidad del hormigón, facilitando la corrosión de las armaduras de acero en varias áreas críticas de la estructura.

Los ensayos no destructivos presentaron resultados consistentes con los ensayos destructivos. La pachometría permitió identificar la ubicación de las armaduras internas y medir el recubrimiento de hormigón, lo cual es clave para evaluar la protección frente a agentes corrosivos. Mientras tanto, la esclerometría proporcionó estimaciones de la resistencia superficial del hormigón, destacando discrepancias significativas en ciertas zonas que coincidieron con las áreas afectadas identificadas en los ensayos destructivos. Estos datos integrados permiten obtener una visión general del estado estructural del edificio y sentar las bases para el diseño de soluciones de rehabilitación.

3.1.1 Ensayos destructivos

3.1.1.1 Extracción de núcleos

El ensayo de extracción de núcleos permitió evaluar directamente las propiedades mecánicas del hormigón utilizado en los elementos estructurales. Se obtuvieron núcleos cilíndricos de diferentes columnas y vigas, siguiendo los procedimientos establecidos por la norma ASTM C42. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a pruebas de compresión para determinar su resistencia y uniformidad. Los resultados indicaron que la resistencia promedio del hormigón presentó variaciones significativas en distintas zonas del edificio, con valores más bajos en áreas sometidas a mayores niveles de humedad o exposición ambiental prolongada. Además, se detectaron microfisuras internas en algunos núcleos, lo que evidencia el deterioro progresivo del material.

La evaluación también incluyó el análisis visual de las muestras extraídas, donde se observaron evidencias de segregación del hormigón en algunas secciones, lo que pudo influir en la pérdida de resistencia. Este comportamiento es común en estructuras que no han recibido un mantenimiento adecuado o que han estado expuestas a condiciones ambientales agresivas. Los resultados obtenidos de la extracción de núcleos confirman la necesidad de realizar intervenciones correctivas en varias zonas del edificio para garantizar su seguridad estructural.



Figura 3-1: Extracción de núcleos

3.1.1.2 Carbonatación en el Hormigón

El ensayo de carbonatación, llevado a cabo sobre los núcleos extraídos, permitió evaluar el impacto de este proceso químico en la integridad del hormigón y las armaduras embebidas. Para ello, se aplicó una solución de fenolftaleína a las superficies recién fracturadas de los núcleos, siguiendo las directrices de la norma ISO 1920-7. Los resultados indicaron que la profundidad de carbonatación varió entre 5 mm y 15 mm en diferentes zonas de la estructura, siendo más pronunciada en áreas con menor recubrimiento de hormigón.

La reducción de la alcalinidad detectada por este ensayo representa un riesgo significativo para las armaduras de acero, ya que facilita su corrosión. Este deterioro progresivo podría comprometer la estabilidad de los elementos estructurales a largo plazo. Además, se observó que las zonas con mayor profundidad de carbonatación coincidieron con las áreas identificadas como críticas durante el ensayo de extracción de núcleos, lo que refuerza la necesidad de intervenir en dichas secciones para garantizar la durabilidad del edificio.



Figura 3-2: Proceso de carbonatación en el hormigón

3.1.2 Ensayos no destructivos

3.1.2.1 Pachometría

El ensayo de pachometría permitió determinar la ubicación exacta de las armaduras internas en los elementos estructurales, así como medir el recubrimiento de hormigón que las protege. Para ello, se utilizó un dispositivo electromagnético de alta precisión, capaz de detectar elementos metálicos en el interior del hormigón sin necesidad de intervenir destructivamente en la estructura. Este ensayo se realizó en múltiples puntos

críticos de las columnas y vigas del edificio, obteniendo datos valiosos sobre la disposición y protección de las armaduras.

Los resultados mostraron que, en términos generales, las armaduras estaban colocadas conforme a los planos estructurales originales. Sin embargo, en algunas zonas específicas se identificaron discrepancias importantes en el espesor del recubrimiento, con valores inferiores al mínimo requerido según la norma NEC-15 (20 mm). Estas deficiencias aumentan significativamente la vulnerabilidad de las armaduras a procesos de corrosión, especialmente en áreas con alta exposición a humedad o agentes agresivos. Además, se observaron diferencias de hasta 8 mm en el recubrimiento entre distintos puntos de una misma columna, lo que indica un control de calidad inconsistente durante la construcción.

Además de localizar las armaduras, la pachometría permitió identificar áreas con posibles indicios de corrosión incipiente. Estas observaciones se correlacionaron con los resultados del ensayo de carbonatación, destacando una relación directa entre el bajo recubrimiento y el avance de los procesos de degradación química. La información obtenida es esencial para planificar intervenciones en las zonas más vulnerables, como la aplicación de recubrimientos adicionales o el uso de materiales protectores para prolongar la vida útil de las estructuras.

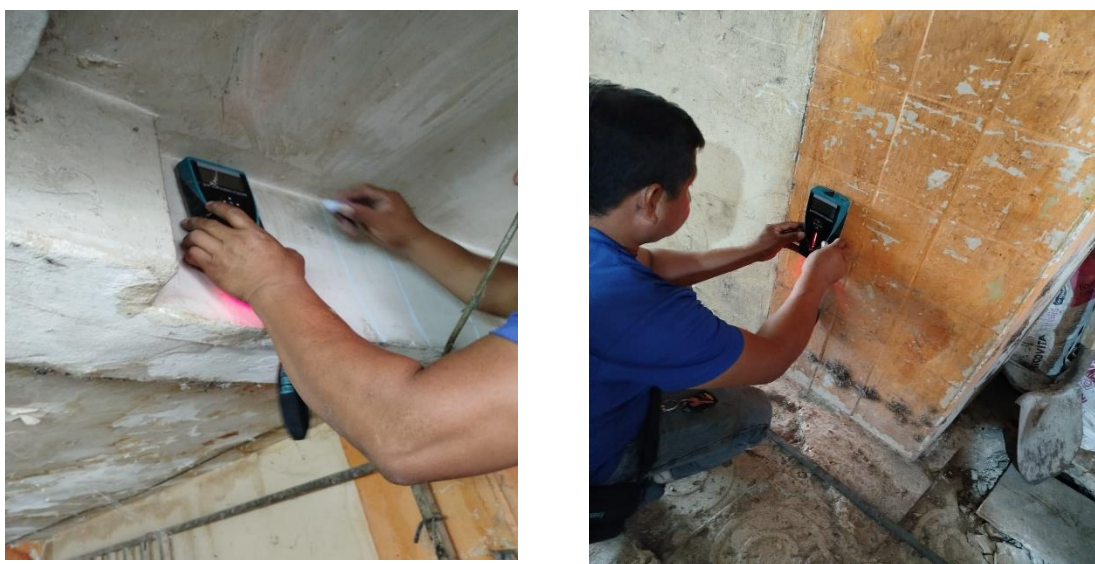


Figura 3-3: Aplicación del ensayo de pachometría.

3.1.2.2 Esclerometría

El ensayo de esclerometría permitió estimar la resistencia superficial del hormigón mediante el uso de un esclerómetro o martillo de rebote, siguiendo los procedimientos establecidos en las normas ASTM C805. Durante el ensayo, se tomaron múltiples mediciones en diferentes elementos estructurales para evaluar la homogeneidad del hormigón. Los resultados mostraron que la resistencia superficial era heterogénea en distintas áreas del edificio, con valores más bajos en las zonas más expuestas a condiciones ambientales adversas. Esto sugiere la posible existencia de deterioro superficial debido a procesos como la carbonatación o la absorción de humedad.

El ensayo también permitió identificar zonas con posibles daños superficiales que podrían estar relacionadas con fisuras o desgaste mecánico. Aunque la esclerometría proporciona solo una estimación indirecta de la resistencia a compresión, los valores obtenidos fueron consistentes con los resultados de los ensayos destructivos, especialmente en las áreas donde se realizaron extracciones de núcleos. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de implementar medidas de rehabilitación que no solo refuercen el hormigón superficial, sino que también protejan las armaduras internas de procesos de corrosión.



Figura 3-2: Aplicación del ensayo de esclerometría

3.2 Análisis de Resultados

El análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados permitió establecer un diagnóstico estructural claro y preciso del estado actual del edificio. Se llevaron a cabo ensayos destructivos y no destructivos, cuyos resultados se complementaron para identificar las principales deficiencias y características estructurales. Cada método aportó datos específicos que, al ser correlacionados, ofrecen una visión integral de la capacidad portante y los riesgos estructurales asociados.

3.2.1 Ensayos destructivos

La extracción de núcleos proporcionó información clave sobre la resistencia a compresión del concreto en columnas y vigas. Se observaron variaciones significativas en los resultados, lo que reflejó una diferencia en la calidad y desempeño del material. La resistencia medida en los núcleos fue comparada con los valores de diseño especificados por la NEC-15 para determinar el grado de cumplimiento. Los resultados evidenciaron que, mientras algunos elementos estructurales mostraron una resistencia adecuada, otros presentaron valores por debajo de lo esperado, lo que sugiere la necesidad de intervención estructural.

3.2.2 Extracción de Núcleos

El ensayo de extracción de núcleos se realizó para evaluar la resistencia a compresión del concreto in situ. Se seleccionaron estratégicamente columnas y vigas de la planta baja para obtener muestras representativas del estado estructural del edificio.

Los resultados obtenidos de la tabla 3-, para cada elemento estructural se detallan a continuación:

- Columna B3: La resistencia a compresión fue ligeramente inferior al valor de resistencia a la compresión estructural mínima según la NEC15 [210 Kg/ cm²] diseño esperado, alcanzando entre el 79% y 80% de la resistencia nominal. Este resultado refleja una pérdida de capacidad estructural que podría deberse a factores como una mezcla inadecuada, deficiencias en el proceso constructivo y de curado o exposición prolongada a condiciones ambientales adversas.
- Columna B4: Los resultados mostraron una resistencia ligeramente superior a la resistencia a la compresión estructural mínima según la NEC15 [210 Kg/ cm²], con valores ligeramente superior al 100% en ambas mediciones. Esto

indica que la calidad del concreto en esta columna es adecuada y que mantiene su capacidad portante sin problemas estructurales evidentes.

- Viga C1 PA: La resistencia a compresión superó también la resistencia nominal en ambas mediciones, lo que confirma que el concreto de esta viga está en buen estado, sin signos de deterioro o pérdida de resistencia.

Tabla 3-1: Ensayo de extracción de núcleos

	TOMA DE DATOS EXTRACCIÓN NÚCLEO Y ENSAYO A COMPRESIÓN	VERSIÓN N 001		CÓDIGO E- CCC - A001
		FECHA:	17-ene-25	
		RESPONSABLE: Ing. Byron Baque C.		
EXTRACCIÓN NÚCLEO Y ENSAYO A COMPRESIÓN				
PROYECTO:	Evaluación y Rehabilitación de Elementos Estructurales Deteriorados “Vigas y Columnas” de Hormigón Armado de un Edificio de 3 Pisos en Guayaquil.			
LOCALIZACIÓN:	Calles Lorenzo de Garaicoa y calle Manuel Galecio			
FECHA:	17-ene-25			
Elementos Evaluados	Fc=kg/cm2	% de resistencia		
Columna B3	166,14	79.11%		
Columna B4	218,45	104.02%		
Viga C1 PA	221,45	105.45%		
Columna B3	169,04	80.49%		
Columna B4	218,80	105.45%		
Viga C1 PA	222,01	105.45%		

3.2.2.1 Análisis de los resultados del ensayo de extracción de núcleos:

Columna B3:

NOTA: Se realizaron dos mediciones en cada columna.

- Primera medición: 166,14 kg/cm² (79,11% de la resistencia nominal).
- Segunda medición: 169,04 kg/cm² (80,49% de la resistencia nominal).

La resistencia del concreto en la columna B3 se encuentra por debajo del valor de resistencia mínima estructural de 210 Kg/Cm². Esta condición puede comprometer la seguridad estructural si no se toman medidas correctivas. Según la modelación estructural realizado en software especializado ETBAS, indica que la estructura por poseer redundancia de ejes no falla por desplazamientos excesivos, sin embargo presenta fallas debido a la poca sección transversal de columna y cuantía de acero

por flexión por lo que se requiere de un incremento de sección transversal y acero de refuerzo, esto se logra mediante la técnica de rehabilitación empelando encamisado de concreto armado para restaurar la capacidad portante del elemento.

Columna B4:

NOTA: Se realizaron dos mediciones en cada columna.

- Primera medición: 218,45 kg/cm² (104,02% de la resistencia nominal).
- Segunda medición: 218,80 kg/cm² (105,45% de la resistencia nominal).

La columna B4 muestra una resistencia superior a la nominal en ambas mediciones, mostrando que el concreto en este elemento presenta una buena calidad y capacidad estructural. Estos resultados reflejan que no existen problemas significativos relacionados con la resistencia del hormigón pues los valores de resistencia a la compresión estarían aproximados a la resistencia mínima estructural según la NEC15 esto es una resistencia nominal de 210 Kg/cm², sin embargo al igual que en la columna B3, según la modelación estructural se evidencia que la columna presenta fallas debido a la poca sección transversal de columna y cuantía de acero por flexión por lo que se requiere de un incremento de sección transversal y acero de refuerzo, esto se logra mediante la técnica de rehabilitación empelando encamisado de concreto armado para restaurar la capacidad portante del elemento

Viga C1 PA:

NOTA: Se realizaron dos mediciones en cada viga.

- Primera medición: 221,45 kg/cm² (105,45% de la resistencia nominal).
- Segunda medición: 222,01 kg/cm² (105,45% de la resistencia nominal).

Los resultados obtenidos en la viga C1 PA son consistentes y muestran una resistencia superior a la nominal en ambas mediciones. Esto confirma que el concreto en este elemento se encuentra en buen estado, con una capacidad de resistencia a compresión aceptable. Además, no se evidencian signos de deterioro o pérdida de resistencia en el concreto de esta viga, lo que garantiza su desempeño estructural, sin embargo, según modelación estructural en ETABS, es necesario reforzar la viga para mejorar su capacidad de resistencia a flexión, lo cual se modela empleando la técnica de rehabilitación con encamisado de concreto armado para mejorar la capacidad portante del elemento.

3.2.2.2 Conclusiones y recomendaciones de los ensayos y modelación estructural:

Columna B3:

Los resultados del ensayo de extracción de núcleos mostraron que la columna B3 no alcanzó la resistencia mínima especificada por la NEC-15, con valores del 79% y 80% de la resistencia nominal en las dos mediciones realizadas. Esta condición indicó que el concreto no cumplía con los parámetros requeridos para garantizar su seguridad estructural, lo que requería medidas correctivas para evitar posibles riesgos.

Recomendación técnica:

- Según el modelo estructural realizado en ETABS, se deberá reforzar la columna mediante encamisado con concreto armado, lo que permitirá recuperar su capacidad portante y mejorar su desempeño estructural, asegurando un mejor comportamiento ante cargas sísmicas, para lo cual será necesario emplear hormigón de alta resistencia $f'_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$.
- Es necesario realizar una inspección detallada del estado de las armaduras para evaluar la presencia de corrosión y determinar si es preciso aplicar tratamientos de protección o sustitución parcial de barras de refuerzo.
- Se recomienda implementar un monitoreo periódico de las columnas intervenidas para evaluar el desempeño del refuerzo y prevenir futuros deterioros, asegurando así la durabilidad del sistema estructural.

Columna B4 y Viga C1 PA:

En la columna B4 y la viga C1 PA, los resultados del ensayo indicaron una resistencia a la compresión aceptable en ambas mediciones. Esto evidenció que el concreto en estos elementos estaba en buen estado y cumplía con las especificaciones de diseño establecidas por la NEC-15.

Recomendación técnica:

- Se recomienda realizar un monitoreo periódico para asegurar la preservación de su estado estructural y detectar posibles signos de deterioro a largo plazo.
- En las zonas expuestas a condiciones ambientales agresivas, se recomienda aplicar recubrimientos protectores para prevenir la penetración de agentes corrosivos y asegurar la durabilidad del concreto a largo plazo.

Cumplimiento con la Norma NEC-15:

De acuerdo con las disposiciones de la NEC-15, el concreto debe mantener una resistencia mínima de $f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ especificada en el diseño estructural para garantizar la seguridad y durabilidad de las edificaciones. Mientras que la columna B4 y la viga C1 PA cumplieron con estos requisitos, la columna B3 presentó una deficiencia que hace necesario tomar medidas de rehabilitación, si embargo el modelo estructural realizado en ETABS, evidencio deficiencia en la capacidad a flexión, por lo que se evidencia la necesidad de incrementar la sección transversal de hormigón y la sección transversal de acero de refuerzo, esto mediante encamisado de concreto armado, recomendando utilizar hormigón de resistencia $f'_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$.

Evaluación de las causas de baja resistencia

- Problemas en el diseño o mezcla del concreto: Se recomienda revisar el historial de construcción para identificar posibles inconsistencias en el diseño de mezcla o deficiencias en el control de calidad.
- Curado inadecuado: Será necesario evaluar si el proceso de curado se realizó de forma insuficiente, lo que pudo haber afectado el desarrollo de la resistencia en la columna B3.
- Exposición ambiental: Se deberán analizar las condiciones del entorno para determinar si la exposición prolongada a humedad o sales contribuyó al deterioro del concreto.

Se sugiere además establecer un plan de mantenimiento preventivo y monitoreo periódico para todos los elementos estructurales evaluados.

3.2.3 Carbonatación en el Hormigón

El ensayo de carbonatación se realizó en tres elementos estructurales del edificio: dos columnas (B3 y B4) y una viga (B3-B4). Este ensayo consistió en la aplicación de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%, lo que permitió determinar la profundidad de carbonatación en el concreto. Las áreas no afectadas por el proceso de carbonatación mostraron un color rosado intenso al contacto con el reactivo, mientras que las zonas carbonatadas permanecieron sin cambio de color, indicando una pérdida de la alcalinidad protectora. A continuación, se detalla el análisis de los resultados obtenidos en la Tabla 3-2:

Tabla 3-2: Resultados evaluación de carbonatación

		Evaluación y Rehabilitación de Elementos Estructurales Deteriorados “Vigas y Columnas” de Hormigón Armado de un Edificio de 3 Pisos en Guayaquil.				VERSIÓN N 002		CÓDIGO E- CCC - A001	
						FECHA:		17-ene-25	
"Las áreas carbonatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor a 9 tomarán un color rosado"									
NIVEL ELEMENTO		UBICACIÓN EJE	Longitud del espécimen (mm)		Longitud de profundidad del área carbonatada (mm)		% de carbonatación	Observación	
Planta baja	Columna	B3	Muestra N1	100	Muestra N1	10	10,0%	Se requiere intervención	
Planta baja	Columna	B4	Muestra N2	100	Muestra N2	5	5,0%	Se requiere intervención	
Planta baja	Viga	C1 PA	Muestra N3	100	Muestra N3	40	40,0%	Se requiere intervención	

3.2.3.1 Columna B3 (Planta Baja)

- Longitud del espécimen: 100 mm
- Profundidad de carbonatación: 10 mm (10% del espécimen)

La muestra extraída de la columna B3 presentó una profundidad de carbonatación del 10%, lo que evidencia una penetración moderada del dióxido de carbono en el concreto. Aunque este nivel de carbonatación no es extremadamente alto, sí indica un riesgo significativo para las armaduras si el recubrimiento de concreto es insuficiente. La pérdida de alcalinidad en esta sección puede haber afectado la capa pasiva de protección del acero, aumentando la posibilidad de corrosión.

3.2.3.2 Recomendación técnica para Columna B3:

- Se recomienda verificar el espesor del recubrimiento para determinar si la profundidad de carbonatación ha alcanzado las armaduras.
- En caso de contacto con las armaduras, se debe realizar un tratamiento anticorrosivo y aplicar un mortero reparador con aditivos inhibidores de carbonatación.
- Monitoreo periódico para detectar el avance del proceso en futuras inspecciones.
- Columna B4 (Planta Baja)

- Longitud del espécimen: 100 mm
- Profundidad de carbonatación: 5 mm (5% del espécimen)

La columna B4 mostró una profundidad de carbonatación del 5%, lo que indica un daño más superficial en comparación con la columna B3. Este nivel de carbonatación puede considerarse leve, pero sigue siendo una señal de que el proceso ha comenzado a afectar la estructura. Aunque la profundidad es reducida, si no se toman medidas preventivas, existe el riesgo de que la carbonatación avance y alcance las armaduras en el futuro, especialmente en condiciones de alta humedad o exposición a CO₂.

- Recomendación técnica para Columna B4:
- Aplicar un tratamiento superficial preventivo con recubrimientos protectores diseñados para inhibir la penetración de dióxido de carbono.
- Verificar el estado de las armaduras en zonas críticas para garantizar que no haya comenzado el proceso de corrosión.
- Considerar la impermeabilización de la superficie externa para reducir la absorción de humedad.

Viga C1 PA (Planta Alta)

- **Longitud del espécimen:** 100 mm
- **Profundidad de carbonatación:** 40 mm (40% del espécimen)

La viga C1 PA presentó el nivel más alto de carbonatación, con un 40% de la longitud del espécimen afectada. Esta profundidad es preocupante, ya que sugiere que la carbonatación ha alcanzado o incluso superado el nivel de las armaduras. La pérdida de alcalinidad en esta magnitud expone directamente el acero PA de refuerzo al riesgo de corrosión acelerada, lo que podría reducir drásticamente la capacidad portante del elemento y comprometer su integridad estructural.

Recomendación técnica para Viga C1 PA:

- Se deberá realizar la rehabilitación de la viga mediante la remoción del concreto deteriorado y la aplicación de un nuevo recubrimiento con concreto reforzado, asegurando su adecuada integración con la estructura existente.
- Es necesario limpiar y tratar las armaduras expuestas para eliminar cualquier presencia de óxido y aplicar un recubrimiento anticorrosivo que prolongue su durabilidad.

- Se recomienda el reforzamiento estructural mediante encamisado de hormigón armado, empleando hormigón con resistencia a la compresión $f'_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$ para lograr un aumento en la capacidad portante de la viga y reduciendo el riesgo de futuras deficiencias estructurales.

El ensayo de carbonatación permitió identificar el grado de afectación en tres elementos estructurales clave. La columna B3 y la viga C1PA muestran un riesgo significativo debido a la profundidad alcanzada por la carbonatación, lo que exige medidas de intervención inmediatas. Por su parte, la columna B4 presentó un daño superficial que puede controlarse mediante acciones preventivas. Este diagnóstico subraya la importancia de implementar un plan de mantenimiento periódico y monitoreo constante para mitigar el riesgo de corrosión en las armaduras y garantizar la durabilidad del edificio a largo plazo.

3.2.4 Ensayos no destructivos

Los ensayos de pachometría y esclerometría complementaron el análisis destructivo al proporcionar datos adicionales sobre el estado de las armaduras y la resistencia superficial del concreto sin causar daño a la estructura. La pachometría confirmó la insuficiencia del recubrimiento de las armaduras en algunas zonas, lo que incrementa el riesgo de corrosión, mientras que la esclerometría reveló ciertas discrepancias en la resistencia superficial del material.

3.2.5 Ensayo de pachometría - detección de armadura.

El ensayo de pachometría se realizó para determinar la ubicación, el diámetro y el recubrimiento de las armaduras internas en los elementos estructurales del edificio. Este tipo de ensayo es esencial para evaluar la disposición de las barras de refuerzo y verificar si cumplen con las especificaciones del diseño estructural, además de identificar posibles discrepancias que puedan comprometer la integridad estructural.

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos:

Tabla 3-3: Ensayo de detección de armadura ensayo de pachometría

	Evaluación y Rehabilitación de Elementos Estructurales Deteriorados “Vigas y Columnas” de Hormigón Armado de un Edificio de 3 Pisos en Guayaquil.	VERSIÓN N 002		CÓDIGO E- CCC - A001
		FECHA:		17-ene-25
ENSAYO DE DETECCIÓN DE ARMADURAS - ENSAYO DE PACHOMETRIA				

ELEMENTOS EVALUADOS						GRAFICO/ DETALLE ARMADURA
Nivel	Elemento	Ubicación eje	Dimensiones			
			Longitud (cm)	ancho (Cm)	altura (Cm)	
Planta baja	Columna	B3	25	25	240	4 ϕ 12 mm Estribos ϕ 8 mm/ 20 Cm
Nivel	Elemento	Ubicación eje	Dimensiones			
			Longitud (cm)	ancho (Cm)	altura (Cm)	
Planta baja	Columna	B4	25	25	240	4 ϕ 12 mm Estribos ϕ 8 mm/ 20 Cm
Nivel	Elemento	Ubicación eje	Dimensiones			
			Longitud (cm)	ancho (Cm)	altura (Cm)	
Planta baja	Viga	C1 PA.	25	25	240	4 ϕ 12 mm Armadura superior 4 f 12 mm Armadura inferior Estribo ϕ 12 mm/ 20 Cm

Columna B3 (Planta Baja)

- **Ubicación del eje:** B3
- **Dimensiones:** Longitud 25 cm, Ancho 25 cm, Altura 240 cm
- **Armadura detectada:** 4 barras longitudinales de 12 mm de diámetro (ϕ 12 mm) y estribos de ϕ 8 mm cada 20 cm.

La pachometría confirmó que la columna B3 contiene 4 barras longitudinales de refuerzo de 12 mm de diámetro y estribos distribuidos uniformemente cada 20 cm. El patrón de refuerzo cumple con lo esperado según el diseño estructural inicial. Sin

embargo, será necesario verificar el estado del recubrimiento del concreto para asegurarse de que la armadura interna esté debidamente protegida frente a procesos de corrosión, especialmente en zonas expuestas a humedad.

Columna B4 (Planta Baja)

- **Ubicación del eje:** B4
- **Dimensiones:** Longitud 25 cm, Ancho 25 cm, Altura 240 cm
- **Armadura detectada:** 4 barras longitudinales de 12 mm de diámetro (Ø12 mm) y estribos de Ø8 mm cada 20 cm.

La columna B4 presenta características estructurales similares a las de la columna B3, con un refuerzo longitudinal de 4 barras de 12 mm y estribos de Ø8 mm cada 20 cm. Se observó una adecuada disposición de las barras de refuerzo, lo que sugiere que el comportamiento estructural es óptimo. Sin embargo, se recomienda verificar la continuidad del recubrimiento de concreto y realizar inspecciones periódicas para garantizar su durabilidad.

Viga B3-B4 (Planta Baja)

- **Ubicación del eje:** B3-B4
- **Dimensiones:** Longitud 25 cm, Ancho 25 cm, Altura 240 cm
- **Armadura detectada:** Armadura superior e inferior con 4 barras de 12 mm de diámetro (Ø12 mm) y estribos de Ø12 mm cada 20 cm.

En la viga B3-B4, el ensayo de pachometría reveló la presencia de armaduras superiores e inferiores con refuerzos longitudinales de 12 mm de diámetro y estribos de Ø12 mm cada 20 cm. La disposición de las armaduras sugiere que este elemento fue diseñado para soportar cargas significativas. No obstante, la revisión detallada del recubrimiento y el estado general del concreto es clave para garantizar la integridad del refuerzo y prevenir futuros problemas estructurales.

3.2.6 Ensayo de Esclerometría.

El ensayo de esclerometría se llevó a cabo para evaluar la resistencia superficial del concreto en elementos estructurales como columnas y vigas. Este ensayo no destructivo utiliza el martillo de rebote tipo Schmidt para medir la dureza del concreto en la superficie, permitiendo estimar su resistencia a compresión de forma rápida y precisa sin causar daños a la estructura.

Los resultados obtenidos durante el ensayo proporcionan una visión detallada del estado del concreto en los elementos evaluados, permitiendo correlacionar las lecturas con los valores de resistencia estimada y verificar la uniformidad del material.

Tabla 3-4: Resultados ensayo esclerometria

	TOMA DE DATOS ENSAYOS DE ESCLEROMETRÍA								VERSION N 001		CÓDIGO E- CCC - A002
									FECHA:	17-ene-25	
									RESPONSABLE: Ing. Byron Baque C.		
PROYECTO:											
LOCALIZACIÓN:											
FECHA:											
ELEMENTO	POSICIÓN				LECTURAS				LECTURA PROMEDIO	RESISTENCIA Kg/Cm2	
	VER	HOR	INC+	INC-	L1	L2	L3	L4			
COLUMNA B3		90			36	33	32		31	33	194,11
COLUMNA B4		90			40	42	41		38	40,25	236,76
VIGA C 1PA		90			42	41	40		36	39,75	233,82

A continuación, se presenta un análisis detallado de las lecturas obtenidas:

Columna B3 (Planta Baja)

- **Lectura promedio:** 33
- **Resistencia estimada:** 194,11 kg/cm²

La resistencia superficial estimada en la columna B3 fue de 194,11 kg/cm². Este valor es inferior a la resistencia mínima estructural según las normas NCE15 [210 kg/cm²], lo que sugiere la necesidad de verificar si estos datos son confiable al compararlos con los resultados del ensayo de extracción de núcleos.. Se recomienda realizar una inspección más exhaustiva para determinar la causa de esta baja resistencia.

Columna B4 (Planta Baja)

- **Lectura promedio:** 40,25
- **Resistencia estimada:** 236,76 kg/cm²

La columna B4 mostró una resistencia superficial de 236,76 kg/cm², valor superior a la resistencia nominal. Este resultado confirma que el concreto en esta columna se encuentra en buen estado, con una resistencia adecuada para soportar las cargas estructurales asignadas.

Viga C1 PA (Planta Alta.)

- **Lectura promedio:** 39,75
- **Resistencia estimada:** 233,82 kg/cm²

La viga C1 PA presentó una resistencia superficial estimada de 233,82 kg/cm², lo que indica que el concreto en este elemento también cumple con las especificaciones de diseño. No se detectaron problemas significativos de resistencia en esta viga, lo que garantiza su desempeño estructural.

Conclusiones del ensayo de esclerometría.

1. **Columna B3:** La resistencia superficial estimada fue menor que la esperada, lo que podría indicar una posible degradación del concreto en este elemento. Será necesario correlacionar este resultado con otros ensayos para confirmar la necesidad de intervención.
2. **Columna B4 y Viga C1 PA:** Ambos elementos mostraron valores de resistencia superiores a la nominal, evidenciando que el concreto se encuentra en buen estado y que la estructura cumple con los requisitos de resistencia establecidos por la NEC-15.

Recomendaciones Técnicas

1. **Columna B3:**
 - Realizar una evaluación complementaria mediante ensayos adicionales para confirmar la resistencia real del concreto y verificar el estado de las armaduras internas.
 - Considerar la posibilidad de reforzar este elemento mediante encamisado de concreto reforzado o el uso de fibra de carbono para aumentar su capacidad portante.
2. **Columna B4 y Viga C1 PA:**
 - Monitorear periódicamente el estado de estos elementos para detectar cualquier cambio en su condición estructural.
 - Aplicar recubrimientos protectores en áreas expuestas a humedad para prevenir la corrosión del acero de refuerzo y garantizar la durabilidad del concreto.

3.2.7.1 Presupuesto referencial.

SON: Tres cientos doce, 00/100 DOLARES AMERICANOS

3.2.7.2 Especificaciones Técnicas.

1 Obras Preliminares

1.01 Sistema de Apuntalamiento de Columnas

- **Descripción**

El proceso de rehabilitación de columnas en una estructura requiere un soporte temporal que garantice la estabilidad del edificio mientras se ejecutan los trabajos correctivos. Para ello, se implementa un sistema de apuntalamiento diseñado para sostener y redistribuir las cargas sin comprometer la seguridad de los elementos estructurales. La instalación de este sistema debe realizarse siguiendo un protocolo técnico que contemple las características específicas de la edificación, asegurando que las cargas sean transmitidas de manera adecuada. Además, se debe verificar que los componentes utilizados cumplan con las regulaciones establecidas en normativas de construcción y seguridad, minimizando cualquier riesgo durante la intervención.

- **Mano de Obra**

Para la ejecución de este procedimiento, se requiere personal capacitado con conocimientos en montaje de estructuras de soporte. Se estima la necesidad de al menos dos operarios con experiencia en la manipulación de puntales y sistemas de sujeción. Durante la instalación, es fundamental seguir los protocolos de seguridad, asegurando que cada componente quede correctamente fijado para evitar desplazamientos o fallos en la estructura.

- **Materiales**

Los elementos empleados en este tipo de soporte varían en función de las especificaciones técnicas del proyecto y las condiciones estructurales del edificio. Los principales materiales incluyen:

- Puntales metálicos o de madera, seleccionados de acuerdo con la capacidad de carga requerida.
- Cables de acero y tensores, que contribuyen a mejorar la estabilidad del sistema.
- Anclajes y fijaciones, utilizados para asegurar los componentes sin generar daños en los elementos intervenidos.

- **Forma de Pago**

El desembolso se realiza únicamente tras la verificación del sistema por parte del supervisor de obra o el ingeniero encargado, asegurando que cumple con los requisitos de estabilidad antes de proceder con los trabajos estructurales.

1.02 Sistema de Apuntalamiento de Vigas

Descripción:

Para llevar a cabo las intervenciones en las vigas de la estructura, es necesario instalar un sistema de soporte temporal que garantice su estabilidad mientras se realizan los trabajos de refuerzo. Este procedimiento evita desplazamientos o colapsos que puedan comprometer la seguridad del área intervenida. El sistema debe diseñarse de acuerdo con las características estructurales de la edificación y las cargas que soportan las vigas, asegurando que la transferencia de esfuerzos no afecte la integridad de otros elementos. La instalación debe seguir especificaciones técnicas rigurosas, considerando los lineamientos establecidos en normativas de construcción y seguridad

Mano de obra:

La ejecución de esta actividad requiere trabajadores con experiencia en la instalación de apuntalamientos estructurales. Se estima que el montaje del sistema debe ser realizado por un equipo de al menos dos operarios capacitados, quienes deben emplear técnicas apropiadas para garantizar la fijación adecuada de cada componente. Es imprescindible la supervisión de un profesional que valide la correcta disposición del sistema antes de proceder con cualquier intervención en las vigas.

Materiales:

Los materiales seleccionados para este tipo de soporte deben cumplir con los requerimientos de carga y resistencia establecidos en el proyecto. Entre los principales elementos utilizados se encuentran:

- **Puntales metálicos o de madera**, ajustados en función de la longitud de las vigas y las condiciones de carga.
- **Cables de tensión y tensores**, empleados para distribuir esfuerzos y aumentar la estabilidad del sistema.
- **Anclajes y fijaciones estructurales**, diseñados para garantizar que el apuntalamiento permanezca firme durante todo el proceso de rehabilitación.

Forma de pago:

El pago por la ejecución de este trabajo se establece bajo la modalidad de compensación por unidad de instalación concluida. Una vez que el sistema de apuntalamiento ha sido montado y su estabilidad ha sido verificada por el responsable técnico del proyecto, se procede con la liquidación del servicio prestado.

2. Reparación de Columnas

2.01 Remoción de enlucido y recubrimiento para rehabilitación estructural en columnas.

Descripción:

Para proceder con la rehabilitación estructural de las columnas, es fundamental retirar el enlucido o revestimiento que las cubre, permitiendo así la inspección directa del estado del concreto. Este proceso facilita la identificación de fisuras, desprendimientos o deterioros que puedan comprometer la capacidad portante del elemento. La ejecución de esta actividad debe llevarse a cabo de manera controlada, evitando impactos que puedan generar daños en la estructura subyacente. Se debe considerar el uso de técnicas adecuadas para no debilitar las zonas circundantes y permitir un tratamiento efectivo de las áreas afectadas.

Mano de obra:

Este trabajo requiere personal con experiencia en la eliminación de recubrimientos en estructuras de concreto. La labor debe ser realizada por un equipo mínimo de dos trabajadores especializados, quienes deben emplear herramientas adecuadas para garantizar la limpieza completa de la superficie sin afectar la resistencia de la columna.

Materiales:

Para la ejecución de esta actividad, se deben emplear herramientas y equipos que permitan la remoción eficiente del recubrimiento sin comprometer la estabilidad del concreto. Entre los elementos necesarios se incluyen:

- **Herramientas manuales y eléctricas**, tales como martillos, cinceles y esmeriles, según el tipo de recubrimiento a retirar.
- **Elementos de protección personal**, como guantes, gafas de seguridad y mascarillas, para resguardar la integridad de los trabajadores.

Forma de pago:

La retribución por este trabajo se establece bajo un esquema de pago por unidad de intervención, considerando cada columna como una unidad de trabajo. El pago se efectúa una vez finalizada la remoción y realizada la verificación del estado del concreto por parte del equipo técnico a cargo del proyecto.

2.02 Encamisado de hormigón armado para reforzamiento estructural en columnas, incluye encofrado y ligante de hormigón existente con hormigón nuevo

Descripción:

El proceso de encamisado de columnas consiste en la aplicación de una capa de concreto reforzado alrededor del elemento estructural, con el propósito de mejorar su capacidad portante y restablecer su integridad. Esta técnica se emplea en columnas que han experimentado deterioro por factores ambientales, cargas excesivas o deficiencias constructivas. Para su ejecución, se deberá preparar la superficie del concreto existente, asegurando una adecuada adherencia entre el nuevo material y la estructura original. Se utilizarán refuerzos de acero que se fijarán en torno a la columna antes de la aplicación del concreto, lo que permitirá incrementar su resistencia y mejorar su comportamiento ante cargas sísmicas y gravitacionales.

Mano de obra:

Este trabajo requiere la participación de un equipo especializado en el manejo de concreto estructural y refuerzos. Se necesitará un mínimo de tres operarios, quienes se encargarán de la mezcla, colocación y nivelación del material, garantizando una aplicación uniforme y libre de discontinuidades que puedan comprometer su desempeño.

Materiales:

Para la ejecución de esta actividad, se emplearán insumos que cumplan con los requisitos técnicos establecidos en el proyecto estructural, entre ellos:

- **Concreto de alta resistencia**, formulado de acuerdo con las especificaciones del diseño.
- **Refuerzo de acero**, que puede consistir en barras o mallas metálicas, dispuestas conforme a la configuración estructural definida.
- **Aditivos**, incorporados a la mezcla para mejorar su trabajabilidad y aumentar la adherencia con el material existente.

Forma de pago:

La retribución por la ejecución del encamisado se establece en función del volumen de concreto aplicado. El pago se efectúa una vez que se haya completado la intervención y se haya verificado el cumplimiento de las especificaciones estructurales definidas en el proyecto.

3. Reparación de Vigas

3.01 Remoción de enlucido y recubrimiento para rehabilitación estructural en vigas.

Descripción:

Este procedimiento implica la eliminación del revestimiento existente en las vigas, con el objetivo de exponer el concreto y evaluar su estado. La remoción del enlucido es una etapa fundamental dentro del proceso de rehabilitación, ya que permite identificar daños ocultos, fisuras o pérdida de material, facilitando la aplicación de refuerzos estructurales adecuados. La intervención debe realizarse con herramientas y técnicas que eviten comprometer la integridad de la viga. Se deberá prestar especial atención a la uniformidad en la remoción, garantizando que toda la superficie afectada quede completamente expuesta y lista para su posterior reparación.

Mano de obra:

Esta tarea será ejecutada por personal con experiencia en trabajos de demolición controlada y rehabilitación de estructuras. Se requiere un mínimo de dos operarios que se encarguen de la remoción del enlucido, asegurando un proceso ordenado y seguro.

Materiales:

Para la ejecución de esta actividad se utilizarán herramientas y equipos que faciliten la remoción sin causar daño al concreto estructural, entre ellos:

- **Martillos y cinceles manuales o eléctricos**, adecuados para desprender el revestimiento sin afectar la estructura subyacente.
- **Equipos de protección personal**, como guantes, gafas de seguridad y mascarillas, que resguarden a los trabajadores del polvo y fragmentos generados durante la actividad.

Forma de pago:

El pago por este trabajo se establece por unidad de viga intervenida. La retribución se efectúa una vez que la remoción del enlucido haya sido completada y se haya verificado que la superficie expuesta cumple con las condiciones necesarias para la siguiente fase de rehabilitación.

3.02 Encamisado de hormigón armado para reforzamiento estructural en vigas, incluye encofrado y ligante de hormigón existente con hormigón nuevo.

Descripción:

En esta fase se llevará a cabo la aplicación de una capa de concreto estructural reforzado sobre los elementos previamente rehabilitados, con el fin de mejorar su capacidad portante y prolongar su vida útil. Este proceso permitirá restaurar las dimensiones originales de la viga afectada, asegurando que el refuerzo estructural cumpla con los requisitos de seguridad y resistencia. Se empleará concreto de alta resistencia $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$, con la utilización de ligantes de hormigón existente con hormigón nuevo que optimicen su adherencia y además de emplear inhibidores de corrosión que reduzcan el riesgo de este efecto en las armaduras existentes. La aplicación se realizará garantizando una distribución homogénea del material, evitando vacíos o fisuras que puedan comprometer su desempeño estructural.

Mano de obra:

Para la correcta ejecución del encamisado se requiere la intervención de personal calificado con experiencia en la manipulación de concreto estructural. Se estima la participación de al menos tres trabajadores, quienes se encargarán de la preparación, vertido, vibrado y nivelación del concreto. Además, se deberá supervisar el proceso para garantizar que se cumplan los espesores y dimensiones definidos en el diseño estructural.

Materiales:

Los materiales necesarios para la ejecución del encamisado incluyen:

- **Concreto de alta resistencia**, con una composición diseñada para mejorar su adherencia y capacidad estructural.
- **Aditivos anticorrosivos y plastificantes**, que contribuyen a la protección de las armaduras y mejoran la trabajabilidad del concreto.

Forma de pago:

El pago se realizará con base en el volumen de concreto utilizado, medido en metros cúbicos. La retribución se efectúa después de concluir la aplicación del encamisado y verificar que cumple con las especificaciones técnicas establecidas, garantizando su adecuada adherencia y funcionalidad dentro del sistema estructural.

3.3 Diseño de la solución

Con base en los resultados obtenidos y el análisis detallado de los ensayos, se presenta el diseño de la solución estructural orientado a garantizar la rehabilitación de las zonas críticas del edificio. Este enfoque busca mejorar la funcionalidad, durabilidad y cumplimiento normativo bajo las directrices de la NEC-15, asegurando una respuesta estructural adecuada ante eventos sísmicos y otras condiciones de carga.

3.3.1 Propuesta de rehabilitación

El diagnóstico integral reveló problemas significativos en algunos elementos estructurales clave. Las propuestas de intervención están dirigidas a garantizar la restauración de la capacidad estructural, considerando la naturaleza y severidad del daño identificado en los ensayos destructivos y no destructivos y modelación estructural. A continuación, se describen las acciones correctivas específicas:

1. Reparación de zonas con recubrimiento insuficiente:

- Aplicación de morteros de reparación estructural con alta adherencia y baja permeabilidad para asegurar el recubrimiento adecuado en las armaduras detectadas mediante pachometría, en caso que se requieran poner.
- Verificación del espesor mínimo de recubrimiento según la NEC-15 y ACI-318-19, para prevenir futuras afectaciones por carbonatación.

2. Tratamiento y rehabilitación de áreas afectadas por carbonatación:

- Aplicación de tratamientos químicos neutralizantes para detener el avance de la carbonatación.

3. Refuerzo estructural:

- Implementación de encamisado con concreto de alta resistencia en las dos columnas y viga analizada.
- Aplicación de encamisado de hormigón armado en vigas para incrementar su resistencia estructural, mejorar su capacidad de carga y garantizar su estabilidad frente a las solicitaciones a las que están sometidas.

3.3.2 Memorias de cálculo

Se realizaron cálculos detallados para justificar las intervenciones propuestas, asegurando el cumplimiento de las cargas estructurales requeridas y los factores de seguridad establecidos en la NEC-15. Los aspectos principales incluyen:

1. Cálculo de refuerzos estructurales:

- Determinación de la sección adicional necesaria para el encamisado de columnas, considerando la capacidad de carga original y el incremento requerido para cumplir con las especificaciones sísmicas.
- Verificación de las deformaciones máximas permitidas para garantizar la estabilidad global del edificio tras la rehabilitación.

2. Estimación de vida útil tras la rehabilitación:

- Para que un elemento de hormigón armado sea durable y mantenga su forma original y la calidad especificada durante su vida útil, no solo debe cumplir con los requisitos de resistencia sino también tener en cuenta los aspectos de durabilidad.
- La proyección de la durabilidad estructural está basada en las condiciones ambientales del entorno y la resistencia mejorada del hormigón armado empleado en el diseño del encamisado empleando hormigón con resistencia a la compresión $F'_c=180 \text{ Kg/Cm}^2$, acompañado de un correcto proceso constructivo, garantizarían ampliar la vida útil de las columnas y viga evaluadas.
- Si la edificación es mantenida periódicamente se da origen a una nueva vida útil del proyecto, cuya extensión dependerá del tipo de mantenimiento o rehabilitación efectuado, en este caso se plantea lograr al menos un tiempo adicional de vida útil de al menos 30 años para los elementos rehabilitados en el presente estudio.

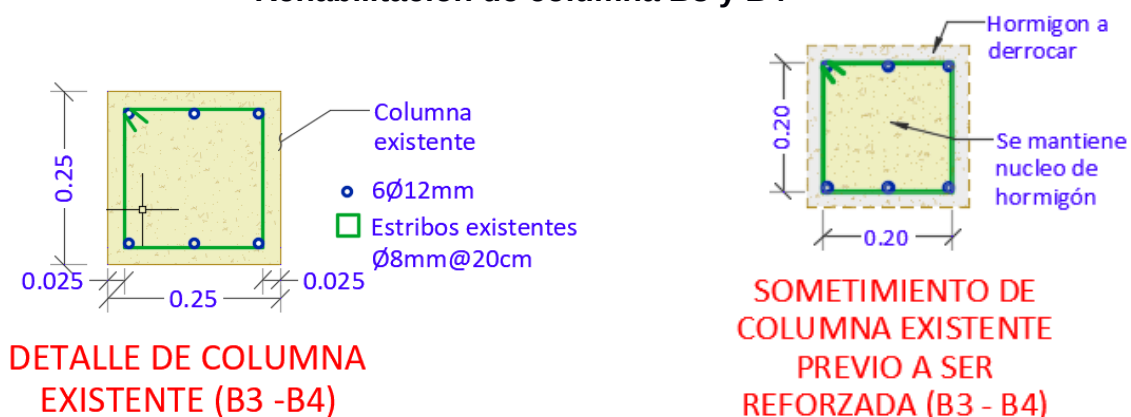
3.3.3 Planos y anexos

Se desarrollaron planos estructurales que detallan las modificaciones a implementar, asegurando la correcta ejecución de las intervenciones propuestas. Estos planos incluyen:

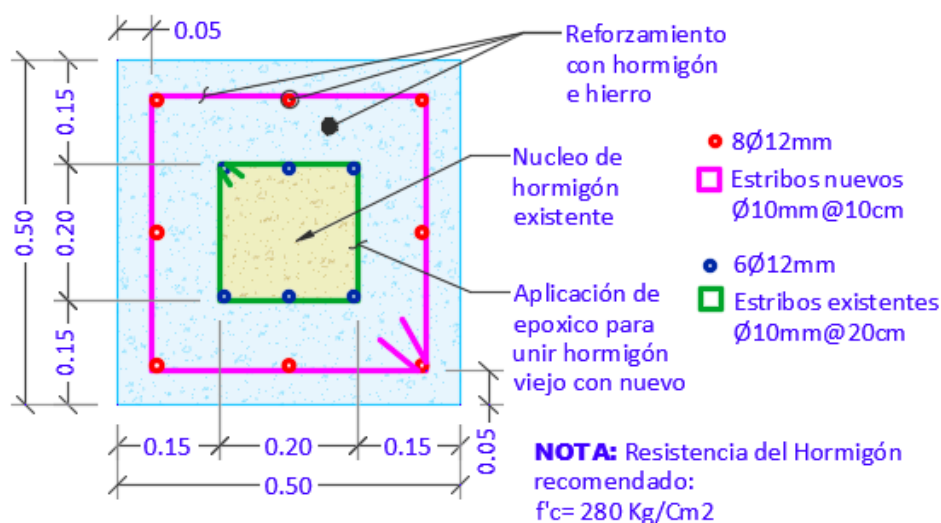
- **Distribución de las áreas a intervenir:** Identificación de las zonas críticas en las dos columnas y una viga, con especificaciones claras de las medidas de refuerzo y reparación.
- **Detalles técnicos de encamisados y recubrimientos:** Secciones transversales y detalles constructivos para garantizar la correcta aplicación de los refuerzos propuestos.

3.3.3.1 Detalles de reforzamiento estructural de dos columnas ejes B3 y B4 y viga C1 PA.

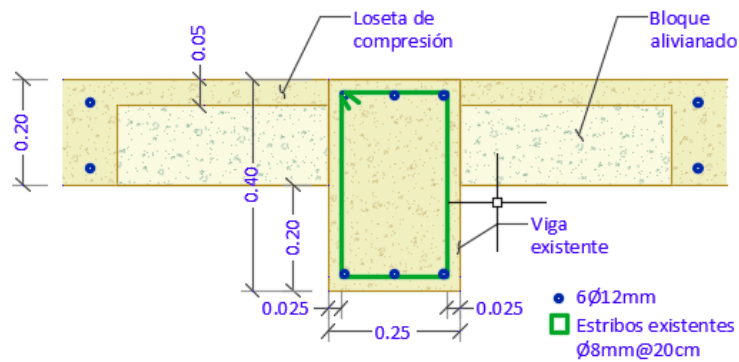
Rehabilitación de columna B3 y B4



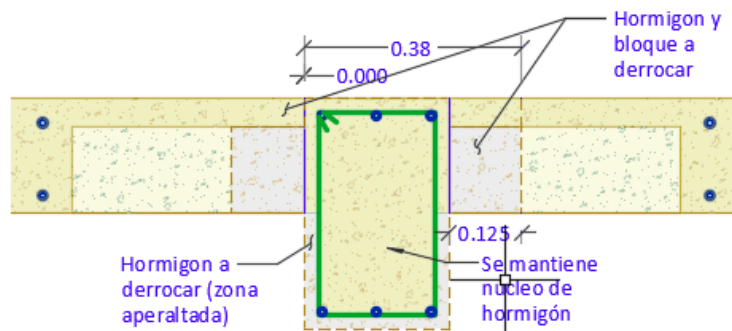
NOTA: Columna B3, se deberá aplicar tratamiento químico para detener el avance del efecto de la carbonatación se recomienda emplear **inhibidor de corrosión**



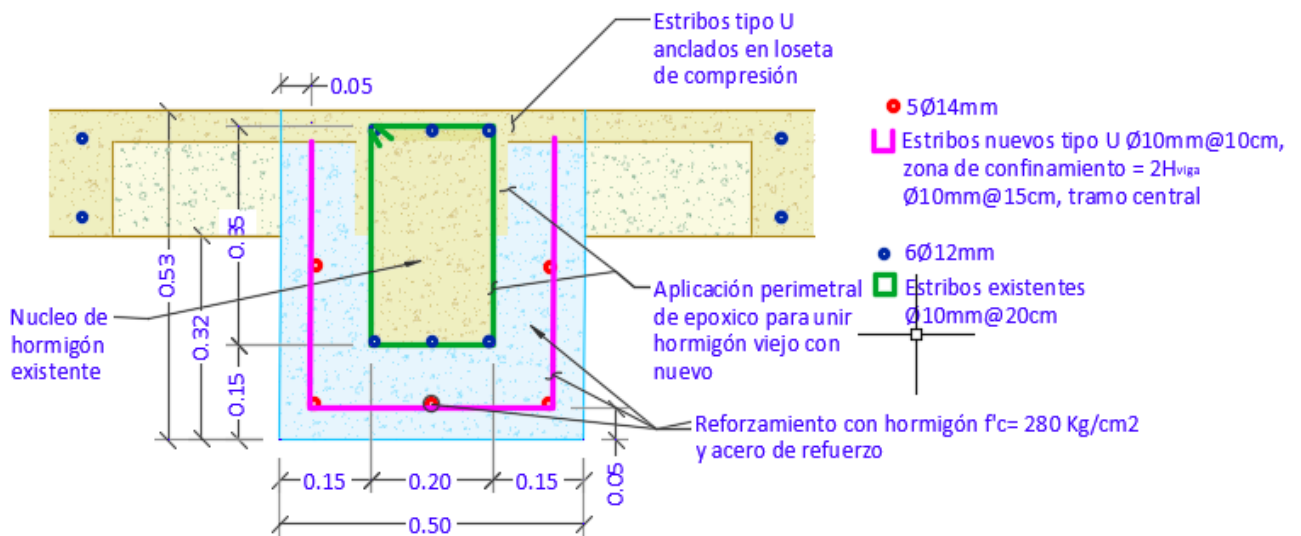
Rehabilitación de viga C1 PA



DETALLE DE VIGA EXISTENTE (C1 PA)



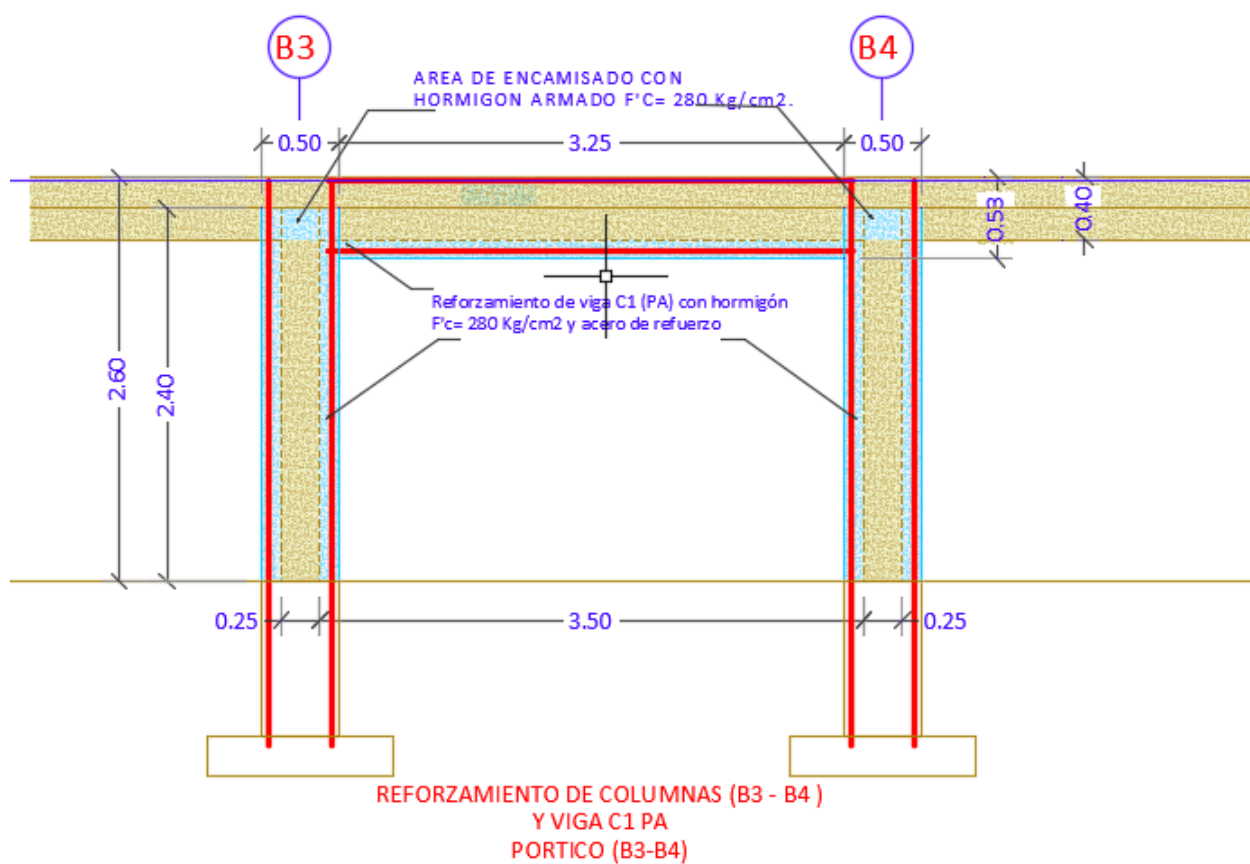
SOMETIMIENTO DE VIGA EXISTENTE PREVIO A SER REFORZADA C1 (PA)



DETALLE DE VIGA (C1- PA) REFORZADA

NOTA: Los estribos de la viga no se deben anclar de manera directa a la losa en razón de que interceptan el vacío de los bloques alivianados.

Detalle de rehabilitación de columnas B3, B4 y viga C1 PA
Pórtico B3 – B4



CAPÍTULO 4

3.4 Conclusiones Y Recomendaciones

3.4.1 Conclusiones

- El diagnóstico estructural realizado permitió evaluar de manera integral el estado del edificio de tres pisos en Guayaquil. Los resultados de los ensayos, junto con el modelado estructural, revelaron variaciones significativas en la resistencia del hormigón y la profundidad de carbonatación, lo que permitió evaluar el comportamiento estructural de las columnas y vigas en mal estado.
- Los resultados del ensayo de extracción de núcleo, mostraron que la columna B3 presentó los valores más bajos de la resistencia estructural mínima según la NCE15 [210 Kg/cm^2], con $166,14$ y $169,04 \text{ kg/cm}^2$, equivalentes al $79,11\%$ y $80,49\%$ de la resistencia esperada, lo que indica una posible reducción en su capacidad estructural. Esta condición sugiere posibles deficiencias en el proceso constructivo o degradación del material, requiriendo atención inmediata para evitar riesgos estructurales. Por el contrario, la columna B4 y la viga C1 PA presentaron resistencias superiores a 218 kg/cm^2 , alcanzando más del 100% de la resistencia nominal esperada, lo que confirma su buen estado estructural. Estos resultados fueron correlacionados con los valores obtenidos en el ensayo de esclerometría, evidenciándose que estos resultados son confiables y sirven para tomar futuras decisiones para garantizar una correcta aplicación de las técnicas de rehabilitación y reforzamiento en las dos columnas y viga objeto del presente estudio.
- El ensayo de carbonatación evidenció que la viga C1 PA es uno de los elementos más afectados, con un 40% de la sección evaluada afectada por el proceso de carbonatación, mientras que las columnas B3 y B4 mostraron profundidades de carbonatación del 10% y 5% , respectivamente. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de aplicar tratamientos específicos para evitar la progresión del deterioro y proteger las armaduras internas contra la corrosión.
- El análisis modal mostró que los tres primeros modos de vibración son fundamentales para la respuesta estructural del edificio, garantizando que más del 70% de la masa estructural participe en las direcciones predominantes. Los resultados del análisis espectral demostraron que las fuerzas internas generadas

son menores que las obtenidas en el análisis estático, asegurando que el comportamiento dinámico de la estructura cumple con los requisitos de la NEC.

- Los desplazamientos horizontales obtenidos en el análisis confirmaron que la estructura se mantiene dentro de los límites establecidos por la normativa, con desplazamientos máximos de 1,72 cm en dirección X y 1,85 cm en dirección Y, ambos por debajo del límite de 2,50 cm establecido por la NEC-15. Estos resultados corroboran que, a pesar de las deficiencias detectadas en ciertos elementos, el comportamiento global del edificio sigue siendo aceptable, siempre que se realicen las intervenciones necesarias para corregir las debilidades identificadas.
- La evaluación inicial realizada al edificio Carlos Cañar Cordon, ofrece una visión clara y detallada del estado actual del edificio, además este análisis se complementa con los resultados obtenidos de ensayos destructivos y no destructivos y en la modelación estructural en ETABS, proporcionando las bases para tomar decisiones fundamentadas sobre las medidas de rehabilitación necesarias. Los datos obtenidos aseguran que las intervenciones futuras puedan ser efectivas y alineadas con las normativas actuales, prolongando la vida útil del edificio y garantizando su seguridad estructural.

3.4.2 Recomendaciones

- Las zonas críticas identificadas, especialmente en columnas y vigas, deben ser intervenidas mediante el encamisado de concreto reforzado. Esta técnica permitirá restaurar la sección perdida y aumentar la resistencia estructural, asegurando el correcto comportamiento de los elementos ante cargas gravitacionales y sísmicas. Además, estas intervenciones deben realizarse de manera progresiva y controlada para no comprometer la seguridad del resto de la estructura durante el proceso de rehabilitación.
- Las zonas que han mostrado señales de afectación por carbonatación deben recibir tratamientos preventivos y correctivos. Es fundamental aplicar recubrimientos protectores para evitar la corrosión de las armaduras, así como tratamientos de pasivación para neutralizar el avance de este proceso químico. La implementación de estas medidas permitirá prolongar la vida útil del concreto, reduciendo el riesgo de pérdida de capacidad estructural a largo plazo. Los materiales utilizados para el tratamiento deben ser seleccionados considerando las condiciones ambientales de la zona y los requisitos técnicos establecidos por la normativa vigente.
- Implementar un plan de monitoreo estructural periódico para asegurar un correcto proceso de mantenimiento. Este monitoreo debe incluir inspecciones visuales y el uso de métodos no destructivos como el ultrasonido y la esclerometría, permitiendo identificar a tiempo posibles deficiencias. La frecuencia de estas inspecciones puede ser anual, intensificándose en caso de detectarse cambios significativos en la estructura o eventos sísmicos de gran magnitud.
- Realizar ensayos complementarios en las zonas que presentaron una menor resistencia a compresión y aquellas con mayor profundidad de carbonatación. Ensayos de ultrasonido y análisis petrográfico ayudarán a detectar la presencia de fisuras internas y evaluar la calidad del concreto en mayor detalle. Esta información adicional facilitará la toma de decisiones sobre las técnicas de rehabilitación más apropiadas y permitirá mejorar la precisión del diagnóstico estructural.

- Cualquier modificación futura en el edificio, ya sea por cambios de uso o ampliaciones, debe estar respaldada por una actualización del modelo estructural. Esto permitirá evaluar el impacto de las modificaciones en la respuesta global de la estructura, asegurando que las nuevas intervenciones cumplan con los requisitos de seguridad estructural.

4. BIBLIOGRAFIA

- Abbass, W., Khan, M. I., & Mourad, S. (2018). Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and Building Materials*, 168, 556–569. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.02.164>
- Abdel-Latif, M. A., Nassr, A. A., Sumelka, W., Mohamed, M. M., Abd El-Shafi, A. G., & Soliman, E. (2023). Effect of Geometric Parameters on the Behavior of Eccentric RC Beam–Column Joints. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 1980, 13(8), 1980. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13081980>
- Akshay, K. J. (2024). Investigating the seismic behavior of multi-story buildings across diverse plan areas and heights using etabs software. *I-Manager's Journal on Civil Engineering*, 14(1), 18. <https://doi.org/10.26634/JCE.14.1.20573>
- Al Nuaimi, N., Sohail, M. G., Hawileh, R. A., Abdalla, J. A., & Douier, K. (2020). Durability of reinforced concrete beams strengthened by galvanized steel mesh-epoxy systems under harsh environmental conditions. *Composite Structures*, 249, 112547. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112547>
- Apostolopoulos, C. A., & Papadakis, V. G. (2008). Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2316–2324. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.10.006>
- Aprile, A., & Monti, G. (2022). Advanced Methods for Structural Rehabilitation. *Buildings* 2022, Vol. 12, Page 79, 12(1), 79. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12010079>
- Arteta, carlos. (2010, August 6). *Ensayo flexión viga concreto reforzado* [Video recording]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=4ni2oWDNgAA>
- ASTM C42/C42M-20. (2020). *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete 1*. https://doi.org/10.1520/C0042_C0042M-20
- Breysse, D. (2010). *Deterioration processes in reinforced concrete: an overview*. 28–56. <https://doi.org/10.1533/9781845699536.1.28>
- Busnelli, A. P., López, R. E., & Adué, J. (2017). Refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de PRFV (plástico reforzado con filtro de vidrio). *Alternativas*, 17(3), 32–42. <https://doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.210>
- Byond. (2013, February 24). *Qué es el Hormigón Armado: ventajas y usos - Byond*. <https://www.byond.es/blog/hormigon-armado/>

- Carvajal, A., Vera, R., Corvo, F., & Castañeda, A. (2012). Diagnosis and rehabilitation of real reinforced concrete structures in coastal areas. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 47, 70–77. <https://doi.org/10.1179/1743278211Y.0000000018>
- Chan, J. L. Y., & Lo, S. H. (2020). Stability design of system scaffold with differential settlement. *Structures*, 27, 1467–1478. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.07.024>
- Christodoulou, C. (2013). *Repair and corrosion management of reinforced concrete structures*. <https://consensus.app/papers/repair-and-corrosion-management-of-reinforced-concrete-christodoulou/97c1db8d167c5e659ca27ad609036d16/>
- Civilgeeks. (2016, December 4). *10 errores en el diseño de estructuras de concreto #hormigón #fail | CivilGeeks.com*. <https://civilgeeks.com/2016/11/04/10-errores-diseno-estructuras-concreto-hormigon-fail/>
- Construneic. (2024, July 2024). *Ensayo de carbonatación del concreto*. <https://construneic.com/concreto-armado/ensayo-de-carbonatacion-del-concreto/>
- Coppola, L., Beretta, S., Bignozzi, M. C., Bolzoni, F., Brenna, A., Cabrini, M., Candamano, S., Caputo, D., Carsana, M., Cioffi, R., Coffetti, D., Colangelo, F., Crea, F., De Gisi, S., Diamanti, M. V., Ferone, C., Frontera, P., Gastaldi, M. M., Labianca, C., ... Todaro, F. (2022). The Improvement of Durability of Reinforced Concretes for Sustainable Structures: A Review on Different Approaches. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 2728, 15(8), 2728. <https://doi.org/10.3390/MA15082728>
- Desarrollos ESC. (2023). *Corrosión en Estructuras de Concreto: Causas, Daños, Síntomas, Reparaciones y Prevención - Desarrollo esc*. <https://desarrollosec.com/corrosion-en-estructuras-de-concreto-causas-danos-sintomas-reparaciones-y-prevencion/>
- Di Sarno, L., Majidian, A., & Karagiannakis, G. (2021). The Effect of Atmospheric Corrosion on Steel Structures: A State-of-the-Art and Case-Study. *Buildings* 2021, Vol. 11, Page 571, 11(12), 571. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11120571>
- El-Amoury, T., & Ghobarah, A. (2002). Seismic rehabilitation of beam–column joint using GFRP sheets. *Engineering Structures*, 24(11), 1397–1407. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00081-0)
- Ezeberry, J. (2011). *Comportamiento Teórico de Elemento de Hormigón Estructural en Condiciones de Servicio, Sometido a Acciones Exteriores y Deformaciones Impuesta* [Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la ETSI]. https://oa.upm.es/10561/2/Javier_Ezeberry_Parrotta.pdf

- Feng, D. C., Liu, Z. T., Wang, X. D., Jiang, Z. M., & Liang, S. X. (2020). Failure mode classification and bearing capacity prediction for reinforced concrete columns based on ensemble machine learning algorithm. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101126. <https://doi.org/10.1016/J.AEI.2020.101126>
- Ferreira, T., Rodrigues, H., & Vicente, R. (2020). Seismic Vulnerability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Urban Centers. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su12051996>
- Ghobarah, A., Aziz, T., & Biddah, A. (1996). Seismic Rehabilitation of Reinforced Concrete Beam-Column Connections. *Earthquake Spectra*, 12, 761–780. <https://doi.org/10.1193/1.1585909>
- Ghobarah, A., & Said, A. (2001). Seismic rehabilitation of beam-column joints using FRP laminates. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(1), 113–129. <https://doi.org/10.1080/13632460109350388>
- Gribniak, V., Ng, P. L., Tamulenas, V., Misiunaite, I., Norkus, A., & Šapalas, A. (2019). Strengthening of Fibre Reinforced Concrete Elements: Synergy of the Fibres and External Sheet. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 4456*, 11(16), 4456. <https://doi.org/10.3390/SU11164456>
- Grzymiski, F., Musiał, M., & Trapko, T. (2019). Mechanical properties of fibre reinforced concrete with recycled fibres. *Construction and Building Materials*, 198, 323–331. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.183>
- Gu, X., Jin, X., & Zhou, Y. (2016). *Basic Principles of Concrete Structures*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48565-1>
- Hanna, A., & Chen, W. (2022). Response of multistory steel structure subjected to differential settlements of its foundation. *International Journal of Structural Integrity*, 13(4), 594–610. <https://doi.org/10.1108/IJSI-08-2021-0083>
- Hoła, J., & Schabowicz, K. (2010). State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10(3), 5–18. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60133-2](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60133-2)
- IFITEC. (n.d.). *REFUERZOS ESTRUCTURAS METÁLICAS - IFITEC | Diseño, fabricación y montaje de todo tipo de construcciones metálicas*. Retrieved January 22, 2025, from <https://www.ifitec.net/proyectos-ifitec/estructuras-metalicas-refuerzos-estructuras-metalicas/>

- James, A., Bazarchi, E., Chiniforush, A., Aghdam, P. P., Hosseini, M., Akbarnezhad, A., Martek, I., & Ghodoosi, F. (2019). Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: A review. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.07.250>
- Jiménez, B., Prieto, M. I., & Cobo, A. (2021). Comportamiento mecánico del hormigón sometido a altas temperaturas confinado con CFRP = Mechanical behaviour of concrete subjected to high temperatures confined with CFRP. *Anales de Edificación*, 7(3), 49–57. <https://doi.org/10.20868/ade.2021.4975>
- Khadake, S. N. (2024). An Attempt to Design of High-Rise Structures Using ETABS. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(1), 708–713. <https://doi.org/10.22214/IJRASET.2024.58029>
- Kumar, K., Babu, N., & Lingeshwaran, N. (2021). A study on repair of concrete structure using non destructive tests. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.06.414>
- Laboratorio-Citemac. (2023). *Ensayo de Esclerometría*. <https://laboratorio-citemac.com/producto/ensayo-de-esclerometria/>
- LCDV arquitectos. (2024). *Rehabilitación de estructura*. https://lcdv.es/blog/rehabilitacion_estructura/
- Mao, Q., Chen, J., Wu, W., Li, R., Shi, S., Wang, Z., & Cui, S. (2023). Multiple Self-Healing Effects of Water-Absorbing Microcapsules in Cementitious Materials. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 428, 15(2), 428. <https://doi.org/10.3390/POLYM15020428>
- Marić, M. K., Vlašić, A., Ivanković, A. M., Bleiziffer, J., Srbić, M., & Skokandić, D. (2019). Assessment of reinforcement corrosion and concrete damage on bridges using non-destructive testing. *Gradjevinar*, 71(10), 843–862. <https://doi.org/10.14256/JCE.2724.2019>
- Meskhi, B., Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., Mailyan, L. R., Beskopylny, N., & Dotsenko, N. (2022). Theoretical and Experimental Substantiation of the Efficiency of Combined-Reinforced Glass Fiber Polymer Composite Concrete Elements in Bending. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 2324, 14(12), 2324. <https://doi.org/10.3390/POLYM14122324>
- Monaldo, E., Nerilli, F., & Vairo, G. (2019). Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. *Composite Structures*, 214, 246–263. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.02.002>

- More, F. M. D. S., & Subramanian, S. S. (2022). Impact of Fibres on the Mechanical and Durable Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete. *Buildings 2022*, Vol. 12, Page 1436, 12(9), 1436. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12091436>
- Naji, A., Al-Jelawy, H., Saadoon, S., & Ejel, A. T. (2021). Rehabilitation and strengthening techniques for reinforced concrete columns: review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1895. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012049>
- Negrini, S., Selb, M., Kiekens, C., Todhunter-Brown, A., Arienti, C., Stucki, G., Meyer, T., & 3rd Cochrane Rehabilitation Methodology Meeting participants. (2022). Rehabilitation Definition for Research Purposes. A Global Stakeholders' Initiative by Cochrane Rehabilitation. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 36(7), 405–414. <https://doi.org/10.1177/15459683221093587>
- NEODEX-Concrete. (n.d.). *COMO LOCALIZAR REFUERZO EN CONCRETO USANDO GEORADAR Y PACHOMETRO*. Retrieved January 22, 2025, from <https://www.youtube.com/watch?v=FO9apLKV6bE>
- Nneka, I. S., & Ejiofor, N. E. (2024). Analyzing the Impact of Cost-Cutting Measures on Structural Integrity: A Case Study of Construction Building Collapses. *NEWPORT INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC AND EXPERIMENTAL SCIENCES*, 5(2), 35–42. <https://doi.org/10.59298/NIJSES/2024/10.5.263542>
- Oh, R. O., Kim, H. H., Choo, Y. J., Park, S. K., Rodrigazo, S. A., Yeon, J., & Park, C. G. (2024). Evaluation of Delaminations and Defects in Concrete Deck Using Non-Destructive Multi-Physical Scanning Technology. *Sustainability 2024*, Vol. 16, Page 9225, 16(21), 9225. <https://doi.org/10.3390/SU16219225>
- OjhaP, N., AdarshKumarN, S., Singh, B., Singh, A., & Patel, V. (2021). A case study on deterioration assessment and rehabilitation of fire damaged reinforced concrete structure. *Journal of Building Materials and Structures*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5044240>
- Onesvie RD. (n.d.). *Proceso de Extracción y Preparación de Núcleos de Concreto - YouTube* [Video recording]. Retrieved January 22, 2025, from <https://www.youtube.com/watch?v=jBHatNpH-KI>
- Ouzaa, K., & Oucif, C. (2019). Numerical model for prediction of corrosion of steel reinforcements in reinforced concrete structures. *Underground Space*, 4(1), 72–77. <https://doi.org/10.1016/J.UNDSP.2018.06.002>
- Pantoja, J. da C., Pazos Filho, V. C., Do Nascimento, E. W. S., & Andrade, L. M. S. de. (2023). Structural reinforcement for adaptation of architectural projects in buildings

- with pre-panels concrete moldings in Brasilia, Brazil. *Peer Review*, 5(24), 116–130. <https://doi.org/10.53660/1406.prw2824>
- Pellegrino, C., Da Porto, F., & Modena, C. (2011). Experimental behaviour of reinforced concrete elements repaired with polymer-modified cementitious mortar. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(2), 517–527. <https://doi.org/10.1617/S11527-010-9646-0>
- Poceria Madrid. (2022, September 15). *Qué es un encamisado en construcción y qué ventajas tiene*. <https://poceria-madrid.es/blog/que-es-encamisado-construccion-obras/>
- PSI concreto. (2020, June 16). *Fibra de acero para concreto: Guía I PSI Concreto*. <https://psiconcreto.com/fibra-de-acero/>
- Rahman, S. A., & Hasibuan, S. (2024). Revitalizing Infrastructure: Assessing Concrete Jacketing for Reinforced Concrete Column Rehabilitation. *International Journal of Innovative Research in Computer Science and Technology*, 12(1), 40–44. <https://doi.org/10.55524/IJIRCST.2024.12.1.8>
- Raikar, R. G., Kangda, M. Z., Wadki, V., & Noroozinejad Farsangi, E. (2023). Blast Mitigation of Reinforced Concrete Structures Incorporating Shear Walls in Modern Building Designs. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 2621, 13(10), 2621. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13102621>
- Raut, A., Pachpor, P., & Mase, D. (2021). Structural health assessment of reinforced concrete structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1197. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1197/1/012019>
- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, 269, 121240. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121240>
- Ruales, D. (2024). *Implementación de ensayos no destructivos en hormigón y correlación entre ellos, esclerómetro y ultrasonido con hormigón, con dos diferentes equipos y diferentes dosificaciones*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25909>
- Ružić, D., & Zahirović, K. (2022). USE OF CARBON FIBER IN CONCRETE STRUCTURES – STATE OF THE ART. *Glasnik Rudarsko-Geološko-Građevinskog Fakulteta*, 10(10), 55–72. <https://doi.org/10.51558/2303-5161.2022.10.10.55>

- Ryou, J. S., & Otsuki, N. (2005). Experimental study on repair of concrete structural members by electrochemical method. *Scripta Materialia*, 52(11), 1123–1127. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2005.02.001>
- Santos, N. A., Okwandu, A. C., & Akande, D. O. (2024). Leveraging advanced software for enhanced structural integrity and project efficiency. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(10), 2403–2436. <https://doi.org/10.51594/CSITRJ.V5I10.1673>
- Savery, A. B. (2005). A self-shoring method of column and beam repair. *Proceedings of the Structures Congress and Exposition*, 1339–1345. [https://doi.org/10.1061/40753\(171\)132](https://doi.org/10.1061/40753(171)132)
- Shelke, S. (2024). Structural Assessment & Repair Techniques. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24may789>
- Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669–673. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2004.04.027>
- Sucuoğlu, H., Gür, T., & Günay, M. (2004). Performance-Based Seismic Rehabilitation of Damaged Reinforced Concrete Buildings. *Journal of Structural Engineering-Asce*, 130, 1475–1486. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:10\(1475\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:10(1475))
- Surahyo, A. (2019). Errors in Design and Detailing. *Concrete Construction*, 273–285. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10510-5_12
- Tawil, D., Martín-Pérez, B., Sanchez, L. F. M., & Noël, M. (2024). Detection of corrosion effects on prestressed concrete bridge deck slabs from the champlain bridge through non-destructive testing techniques. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/SUCO.202400591>
- Toll, D. G., Abedin, Z., Buma, J., Cui, Y., Osman, A. S., & Phoon, K. K. (2012). *The impact of changes in the water table and soil moisture on structural stability of buildings and foundation systems: Systematic review CEE10-005 (SR90)*. <https://durham-repository.worktribe.com/output/1636508/the-impact-of-changes-in-the-water-table-and-soil-moisture-on-structural-stability-of-buildings-and-foundation-systems-systematic-review-cee10-005-sr90>
- Viera Arroba, L. P., Quizanga Martínez, D. M., & Andino Carranco, J. L. (2020). Análisis estático no lineal de edificios aporricados de hormigón armado aplicando normativa ecuatoriana, colombiana y peruana. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), 72–78. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.2186>

- Vimalanathan, M. (2019). EXPERIMENTAL STUDIES ON THE USE OF BIO-CEMENT WITH NANO-CARBON FIBRES OF CONCRETE USING R.C.C BEAMS. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 5(2), 3181–3188. www.ijariie.com
- Wardach, M., & Krentowski, J. R. (2023). Diagnostics of Large-Panel Buildings—An Attempt to Reduce the Number of Destructive Tests. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 18, 17(1), 18. <https://doi.org/10.3390/MA17010018>
- Yin, J., Tang, D., Chen, T., Yang, Y., Ju, L., Wan, Y., Junpeng, & Yue, X. (2023). Seismic Risk Assessment and Rehabilitation Method of Existing RCC Structures Using Micro Concrete. *Civil Engineering Journal*. <https://doi.org/10.28991/cej-2023-09-12-04>

