



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN PATOLÓGICA Y DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE UNA VIVIENDA
UNIFAMILIAR DE HORMIGÓN ARMADO CONSTRUIDA EN EL SECTOR JUAN
MONTALVO GUAYAQUIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniería Civil

AUTORES:

FRANCISCO ALEXANDER DAVILA GALAN

MAYRA ALEJANDRA PRIETO MALDONADO

TUTOR: ING. LEONARDO ECHEVERRIA FABRE, DBA.

Guayaquil - Ecuador

2026

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Francisco Alexander Davila Galan con documento de identificación N° 0952902948 y Mayra Alejandra Prieto Maldonado con documento de identificación N° 0956579114; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 15 de enero del año 2026

Atentamente,



Francisco Alexander Davila Galan

0952902948



Mayra Alejandra Prieto Maldonado

0956579114

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Francisco Alexander Davila Galan con documento de identificación No. 0952902948 y Mayra Alejandra Prieto Maldonado con documento de identificación No. 0956579114, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "EVALUACIÓN PATOLÓGICA Y DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE HORMIGÓN ARMADO CONSTRUIDA EN EL SECTOR JUAN MONTALVO GUAYAQUIL" el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero/a Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 15 de enero del año 2026

Atentamente,



Francisco Alexander Davila Galan
0952902948



Mayra Alejandra Prieto Maldonado
0956579114

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Leonardo Javier Echeverria Fabre con documento de identificación N° 0902190883, docente de la Universidad Politécnica Salesiana , declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación EVALUACIÓN PATOLÓGICA Y DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE HORMIGÓN ARMADO CONSTRUIDA EN EL SECTOR JUAN MONTALVO GUAYAQUIL, realizado por Francisco Alexander Davila Galan con documento de identificación N° 0952902948 y por Mayra Alejandra Prieto Maldonado con documento de identificación N° 0956579114, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 15 de enero del año 2026

Atentamente,



Ing. Leonardo Javier Echeverria Fabre, DBA

0902190883

Dedicatoria

Autor: Mayra Alejandra Prieto Maldonado

Con profundo agradecimiento y sincero afecto, dedico este trabajo de investigación a mis padres, Eloy Oswaldo Prieto Lozado y Yanine Cristina Maldonado Vázquez, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias a su amor incondicional, orientación y esfuerzo constante, he aprendido el verdadero valor de la dedicación, la disciplina y la humildad. Su apoyo inquebrantable y sus enseñanzas han sido la fuerza que me ha impulsado a alcanzar mis metas y a superar los desafíos que se presentaron en el camino. Este logro es también suyo, porque detrás de cada paso que doy se encuentran sus sacrificios, su confianza y su fe en mí.

A mi hermana, Stefany Roxana Prieto Maldonado, expreso mi gratitud por su apoyo incondicional, su paciencia y su compañía constante durante este proceso. Su fortaleza y comprensión fueron fundamentales para mantenerme firme en los momentos más exigentes. A mi sobrina, Kiara Charlotte Arreaga Prieto, por ser una fuente de alegría, ternura e inspiración que me recordó siempre la importancia de continuar adelante y no rendirme ante las dificultades.

De igual manera, dedico este logro a mi compañero de tesis, Francisco Alexander Dávila Galán, con quien compartí el compromiso, la perseverancia y la responsabilidad que este proyecto demandó. Su colaboración, amistad y entrega fueron esenciales para alcanzar los objetivos propuestos. Juntos formamos un equipo que supo afrontar los retos con determinación y respeto, demostrando que el trabajo conjunto y la confianza mutua son la base del éxito.

Autor: Francisco Alexander Davila Galan

Dedico esta tesis, fruto de mi esfuerzo, perseverancia y compromiso, a mi querida tía Nancy Magdalena Galán Sánchez, por su apoyo incondicional, por acompañarme en cada etapa de mi formación académica y personal, y por ser un ejemplo de fortaleza, generosidad y amor. Su guía, sus palabras de aliento y su confianza en mis capacidades fueron una fuente constante de motivación para seguir adelante y no rendirme ante las adversidades. Este logro no sería posible sin su presencia y su dedicación, que han marcado profundamente mi camino.

A mis padres, Francisco Xavier Dávila Sánchez y Susana Alexandra Galán Sánchez, su paciencia, su comprensión y los valores que me han inculcado desde siempre. Gracias por ser mi ejemplo de trabajo, honestidad y responsabilidad. Su orientación constante, su sabiduría y su apoyo incondicional han sido la base sobre la cual he construido cada uno de mis logros. Este triunfo es también de ustedes, porque con su guía y sacrificio me enseñaron que todo esfuerzo tiene su recompensa.

Asimismo, extendo esta dedicatoria a mi compañera de tesis, Mayra Alejandra Prieto Maldonado, por su valiosa colaboración, compromiso y apoyo a lo largo del desarrollo de nuestro proyecto. Su constancia, disciplina y compañerismo fueron elementos fundamentales para alcanzar con éxito cada objetivo planteado. Este trabajo representa no solo el resultado de largas horas de dedicación, sino también la unión de esfuerzos y la pasión compartida por culminar una meta común.

A cada una de las personas que han formado parte de mi vida y me han brindado su apoyo incondicional, les dedico este logro con gratitud y afecto. Esta tesis no solo simboliza la culminación de una etapa académica, sino también el reflejo de todos los valores, enseñanzas y esfuerzos que me han acompañado a lo largo de este camino.

Agradecimientos

Autor: Mayra Alejandra Prieto Maldonado

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada etapa de mi vida. Gracias por brindarme sabiduría, paciencia y salud para superar cada desafío y llegar hasta este momento tan importante. Sin su bendición, nada de esto habría sido posible.

A mis amigos, por su amistad sincera, su apoyo constante y las sonrisas que hicieron más llevadero este camino académico. Gracias por acompañarme con alegría, comprensión y motivación en los momentos difíciles, y por compartir conmigo la satisfacción de cada logro alcanzado.

A mis padres, Oswaldo Prieto y Yanine Maldonado, a mi hermana Stefany Prieto y a mi sobrina Kiara Arreaga, por su amor incondicional, su comprensión y por ser mi mayor inspiración. Gracias por creer siempre en mí, por su paciencia y por acompañarme con palabras de aliento y apoyo inquebrantable en cada paso de mi formación.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis profesores de ingeniería civil, cuya experticia, experiencia y dedicación académica contribuyeron enormemente al desarrollo de mi formación profesional y a la creación de este proyecto de investigación. Para este trabajo, la orientación técnica y las exigencias académicas realizadas por los docentes fueron cruciales para fortalecer mi potencial como futuro ingeniera. Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Ing. Leonardo Echeverría Fabre, por su orientación, apoyo y dedicación inquebrantable durante el desarrollo de la presente tesis. El apoyo y los estándares profesionales fueron cruciales para la realización de este trabajo.

Autor: Francisco Alexander Davila Galan

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada etapa de mi vida. Gracias por brindarme sabiduría, paciencia y salud para superar cada desafío y llegar hasta este momento tan importante. Sin su bendición, nada de esto habría sido posible.

A mis padres, Francisco Xavier Dávila Sánchez y Susana Alexandra Galán Sánchez, y a mi tía Nancy Magdalena Galán Sánchez, por su amor, guía y apoyo incondicional. Su ejemplo, esfuerzo y confianza en mí fueron la base sobre la cual construí este logro.

A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de esta etapa y por demostrarme que, con fe, esfuerzo y el apoyo de quienes amamos, todo es posible.

A mis amigos, por su amistad sincera, su apoyo constante y las sonrisas que hicieron más llevadero este camino académico. Gracias por acompañarme con alegría, comprensión y motivación en los momentos difíciles, y por compartir conmigo la satisfacción de cada logro alcanzado.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis profesores de la carrera de Ingeniería Civil, los cuales con su conocimiento, experiencia y compromiso académico contribuyeron significativamente en la construcción de mi formación profesional y en la generación de este trabajo de investigación. La orientación técnica y la exigencia en el ámbito académico ejercidas por los profesores para este trabajo fueron clave para fortalecer las capacidades que puedo ofrecer como futuro ingeniero. Asimismo, muestra mi especial agradecimiento hacia mi tutor, Ing. Leonardo Echeverría Fabre, por su guía, asesoramiento y dedicación constante por parte de él en el proceso de elaboración de la presente tesis. Su apoyo y su criterio profesional fueron determinantes en la culminación de este trabajo.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como fin realizar un diagnóstico exhaustivo de patologías de una vivienda unifamiliar realizada con hormigón armado y detectar, en consecuencia, las principales señales de deterioro, sobre las cuales se procederá a valorar el estado estructural, y, finalmente, a aportar un plan de intervención técnico que ayude a mejorar tanto su seguridad como su durabilidad. El edificio analizado presenta patologías diversas, relacionadas con defectos constructivos, envejecimientos de materiales y la falta de mantenimientos, que son características de las casas construidas sin la apropiada dirección técnica.

La metodología empleada se basa en una combinación de inspección visual exhaustiva, el uso de pruebas no destructivas y análisis estructural. La inspección visual son elementos que facilitaron la detección, clasificación y localización de las lesiones en los diferentes elementos estructurales, tales como fisuras, humedades, desprendimientos en el recubrimiento y signos de corrosión del acero de refuerzo. Posteriormente, se realizó una prueba de esclerometría con el fin de validar la resistencia superficial del hormigón, aportando una estimación de la calidad sin perjudicar la integridad de la estructura.

A raíz de la evaluación llevada a cabo, se plantea un Plan de Intervención centrado en la restauración de las patologías que han sido evidenciadas y en el tratamiento de otros aspectos que hacen que el comportamiento estructural de la edificación mejore y se adapte a los requerimientos actuales. De esta forma, el estudio también pone de manifiesto la importancia de la evaluación patológica.

Abstract

The present research work aims to carry out an exhaustive diagnosis of pathologies in a single-family dwelling constructed with reinforced concrete and, consequently, to identify the main signs of deterioration. Based on this assessment, the structural condition of the building is evaluated, and finally, a technical intervention plan is proposed to help improve both its safety and durability. The analyzed building presents various pathologies related to construction defects, material aging, and lack of maintenance, which are characteristic of houses built without adequate technical supervision.

The methodology employed is based on a combination of comprehensive visual inspection, the use of non-destructive testing, and structural analysis. The visual inspection made it possible to detect, classify, and locate damage in the different structural elements, such as cracks, moisture, concrete cover detachment, and signs of reinforcement corrosion. Subsequently, a rebound hammer test was performed in order to assess the surface strength of the concrete, providing an estimation of its quality without compromising the integrity of the structure.

As a result of the evaluation carried out, an Intervention Plan is proposed, focused on the restoration of the identified pathologies and on addressing other aspects that contribute to improving the structural behavior of the building and adapting it to current requirements. In this way, the study also highlights the importance of pathological assessment.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema de Estudio	3
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.	5
1.4.2 Objetivos específicos.	5
1.5 Marco hipotético.	6
CAPÍTULO II	8
2.1 Introducción al hormigón armado.	8
2.1.1 Origen y evolución histórica del hormigón armado.	8
2.1.2 Composición y propiedades del hormigón.	12
2.1.3 Propiedades del acero de refuerzo.	13
2.1.4 Interacción entre concreto y acero.	13
2.1.5 Factores que afectan la durabilidad del hormigón.	14
2.1.6 Importancia del control de calidad en materiales y ejecución.	15
2.1.7 Normativa ecuatoriana de diseño estructural (NEC-SE-HM).	16
2.2 Patología del hormigón armado.	19
2.2.1 Definición de patología estructural.	19
2.2.2 Causas y origen de las patologías en estructuras.	21
2.2.3 Clasificación de lesiones estructurales y no estructurales.	22
2.2.4 Factores de riesgo: diseño, ejecución, materiales y mantenimiento.	23

2.2.5 clasificación de patologías del hormigón armado y pretensado, identificación de causas raíz y criterios de severidad. _____	25
2.2.6 Mapeo de lesiones y registro gráfico. _____	29
2.3 Procesos de degradación del hormigón armado. _____	33
2.3.1 Introducción general al deterioro del hormigón. _____	33
2.3.2 Degradación química. _____	34
2.3.3 Degradación química. _____	40
2.3.4 Daños mecánicos: sobrecargas, impactos, retracción y asientos diferenciales. _____	45
2.3.5. Efectos del ambiente marino y la contaminación atmosférica. _____	48
2.3.6. Modelos de predicción de vida útil (referencia: ACI 201.1R y ACI 562). _____	51
2.3.7. Estrategias de durabilidad propuestas por Helene (2003): diagnóstico preventivo, reparación oportuna y mantenimiento planificado. _____	53
2.4 Metodologías de diagnóstico estructural. _____	56
2.4.1 Concepto y etapas del diagnóstico estructural (inspección, ensayo, interpretación). _____	57
2.4.2. Metodología ACI 201.1R: levantamiento de información, descripción de daños y determinación de causas. _____	58
2.4.3. Ensayos No Destructivos (END) según ACI 228.2R: _____	60
2.4.4. Ensayos destructivos y semi-destructivos _____	63
2.4.5. Instrumentación moderna: termografía infrarroja, radar de penetración GPR y drones _____	63
2.4.6. Modelado estructural en programas de análisis. _____	64
2.4.7 Elaboración del informe diagnóstico basado en ACI 562 (evaluación y criterios de aceptación). _____	65
<hr/>	
2.5. Principios y técnicas de reparación estructural _____	66
2.5.1 Criterios ACI 562: compatibilidad de materiales, durabilidad y seguimiento pos-reparación. _____	68
2.5.2 Etapas del proceso de reparación (limpieza, aplicación, curado, control) _____	69
2.5.3. Métodos de reparación según Helene (2003) _____	71

2.6. Refuerzo estructural	73
2.6.1 Concepto y objetivos del refuerzo estructural.	73
2.6.2 Criterios de evaluación.	74
2.6.3 Métodos convencionales de refuerzo	75
2.6.4 Métodos modernos de refuerzo	76
2.6.5 Modelado y simulación del refuerzo	76
2.6.6 Aplicación práctica del refuerzo estructural	77
2.7. Normativas técnicas comparadas.	78
2.7.1 Revisión de normativa ecuatoriana (NEC, INEN)	78
2.7.2. Normas internacionales del American Concrete Institute (ACI)	79
2.7.3 Buenas prácticas de ingeniería en rehabilitación estructural.	82
CAPITULO III	84
3.1 Marco metodológico	84
3.1.1 Enfoque de la investigación	84
3.1.2 Tipo y diseño de investigación	84
3.1.3 Modalidad de investigación	85
3.1.4 Métodos de investigación	85
3.1.5 Población y muestra	86
3.1.6 Técnicas e instrumentos de recolección de información.	86
3.2 Procedimiento metodológico	87
3.3 Inspección visual ACI 221 1R	88
3.3.1 Planificación previa y revisión de antecedentes	88
3.3.2 Preparación de instrumentos.	88
3.3.3 Reconocimiento general del inmueble y del entorno	88
3.3.4 Inspección visual interior de la vivienda	89
3.3.5 Identificación y caracterización de lesiones	89

3.3.6 Registro fotográfico y mapeo de daños _____	89
3.4 Ensayo de esclerometría ACI 228.2R _____	89
3.4.1 Selección de elementos a evaluar _____	90
3.4.2 Preparación de la superficie de ensayo _____	90
3.4.3 Calibración del esclerómetro _____	90
3.4.4 Procedimiento de medición en campo _____	90
3.4.5 Registro y tratamiento de resultados _____	91
3.5 Metodología de Evaluación Sísmica mediante el Método Estático Equivalente de acuerdo con la Nec-2015 y ASCE 7-16 _____	91
3.5.1 Levantamiento geométrico y elaboración de planos en AutoCAD _____	91
3.5.2 Exportación e implementación del modelo en Robot Structural Analysis _____	92
3.5.3 Definición de cargas gravitacionales _____	96
3.5.4 Determinación de parámetros sísmicos según la NEC-2015 – ASCE 7-16 _____	98
3.5.5 Cálculo del cortante basal mediante el método estático equivalente _____	102
Capítulo IV _____	103
4.1 Resultados obtenidos _____	103
4.1.1 Resultados obtenidos de la inspección visual _____	103
4.1.2 Resultados obtenidos del ensayo de esclerometría _____	106
4.1.3 Resultados del análisis estructural Robot _____	109
CAPITULO V _____	116
5.1 Análisis de los resultados _____	116
5.1.1 Análisis de la inspección Visual _____	116
5.1.2 Análisis del ensayo no destructivo (esclerometría) _____	116
5.1.3 Análisis de la discrepancia entre el cortante basal calculado manualmente y el sismo estático equivalente obtenido en software. _____	120

CAPITULO VI	122
6.1 Plan de intervención estructural (ACI 562-19 y NEC – 2015)	122
6.2 Patología Identificadas	122
6.3 Estrategias de intervención por patología	123
6.3.1 Corrosión del acero y desprendimiento del recubrimiento.	123
6.3.2 Nidos de grava y mala compactación del hormigón	123
6.3.3 Humedad, Filtraciones y eflorescencia	123
6.3.4 Fisuras no estructurales en paredes	124
6.4 Fichas técnicas de intervención	124
6.5 Presupuesto orientativo	125
6.6 Mantenimiento Preventivo	125
CAPITULO VII	126
7.1 Conclusiones	126
7.2 Recomendaciones	127
Bibliografía	128
8.2 Anexos	130

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Orígenes del hormigón	8
Ilustración 2 Charles Rabut	10
Ilustración 3 Félix Candela.....	10
Ilustración 4 Eugène Freyssinet.....	11
Ilustración 5 Composición del hormigón	12
Ilustración 6 Patologías estructurales	20
Ilustración 7 Inspección visual	30
Ilustración 8 Diagrama de procesos	31
Ilustración 9 Patologías estructurales 2	31
Ilustración 10 Patologías estructurales 3	32
Ilustración 11 Patologías estructurales 4	32
Ilustración 12 Aplicación de cuadrillas	92
Ilustración 13 Asignación de materiales.....	93
Ilustración 14 Definición de sección – columnas.....	93
Ilustración 15 Definición de sección – vigas.....	94
Ilustración 16 Empotramiento	94
Ilustración 17 Aplicaciones de cargas	95
Ilustración 18 Aplicaciones de cargas 2	95
Ilustración 19 Modelo bidimensional.....	96
Ilustración 20 Vista 3D.....	96
Ilustración 21 Aplicaciones de casos de carga muerta.	97
Ilustración 22 Aplicación de carga viva	97
Ilustración 23 Peso de la vivienda	97

Ilustración 24 Configuración en elevación y configuración en planta	100
Ilustración 25 Factor R	101
Ilustración 26 S_s = Aceleración espectral a período corto	101
Ilustración 27 S_1 = Aceleración espectral a período largo	101
Ilustración 28 Humedad	103
Ilustración 29 Corrosión	104
Ilustración 30 Fisura no estructural	105
Ilustración 31 Ensayo de esclerometría columna 1	108
Ilustración 32 Ensayo de esclerometría columna 2	108
Ilustración 33 Ensayo de esclerometría columna 3	108
Ilustración 34 Ensayo de esclerometría viga	109
Ilustración 35 Conversión de cargas a masa.....	109
Ilustración 36 Cargas - Conversión	110
Ilustración 37 Cargas especiales.....	111
Ilustración 38 Carga sísmicas equivalente.....	111
Ilustración 39 Sismo Estático equivalente X-Y.....	112
Ilustración 40 Cortante basal	112
Ilustración 41 Método del esfuerzo lateral equivalente.....	113
Ilustración 42 Análisis ASCE 7-16.....	113
Ilustración 43 Valor S_s	114
Ilustración 44 Valor S_1	114
Ilustración 45 Cortante Basal - ASCE 7-16.....	114
Ilustración 46 Valor corregido S_s	115
Ilustración 47 Valor corregido S_1	115

Ilustración 48 Cortante Basal Corregido - ASCE 7-16	115
Ilustración 49 Columna Central.....	117
Ilustración 50 Columna Esquinera	118
Ilustración 51 Columna Lateral	119
Ilustración 52 Viga 1.....	120
Ilustración 53 Viga hormigón pobre.....	120

Índice de Tablas

Tabla 1 Zona sísmica	98
Tabla 2 Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.	98
Tabla 3 Fd: Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamiento para diseño en roca	99
Tabla 4 Fs.: Comportamiento no lineal de los suelos.....	99
Tabla 5 I: Coeficiente de importancia	100
Tabla 6 FICHA DE INSPECCIÓN 1.....	103
Tabla 7 FICHA DE INSPECCIÓN 2.....	104
Tabla 8 FICHA DE INSPECCIÓN 3.....	105
Tabla 9 Ensayo de esclerometría - columnas	106
Tabla 10 Ensayo de esclerometría - vigas	107
Tabla 11 FICHA TÉCNICA 01 - Corrosión del acero y desprendimientos del recubrimiento	130
Tabla 12 FICHA TÉCNICA 02- Cangrejeras por mala compactación.....	131
Tabla 13 FICHA TÉCNICA 03 - Humedad, Filtraciones y eflorescencia.....	131
Tabla 14 FICHA TÉCNICA 04 - Fisuras no estructurales en paredes	132
Tabla 15 Ensayo de esclerometría - columna 1	140
Tabla 16 Ensayo de esclerometría - columna 2	140
Tabla 17 Ensayo de esclerometría - columna 3	141
Tabla 18 Tabla 17 Ensayo de esclerometría - viga 1	141
Tabla 19 Ensayo de esclerometría - viga 2	142

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Columna fuerte - viga débil	17
Ecuación 2 Carbonatación y penetración de dióxido de carbono.....	34
Ecuación 3 Profundidad de carbonatación	35
Ecuación 4 Vida útil del concreto	44
Ecuación 5 Curvas de rendimiento.....	53
Ecuación 6 Cortante Basal.....	102

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

El avance del crecimiento urbano en Ecuador ha sido acelerado en las décadas pasadas, sobre todo en las áreas habitacionales, las cuales se han forjado mediante la autoconstrucción o la escasez de supervisión técnica. De este modo, se han conformado grandes extensiones de edificaciones de concreto armado que no obedecen de manera plena la normatividad vigente, lo que puede provocar daños en los edificios de relativa premura y acortar la vida útil de las mismas. A partir de esta perspectiva, la evaluación de patologías en edificaciones existentes se convierte en una herramienta importante para verificar unas debidas condiciones de seguridad, funcionalidad y durabilidad.

Las edificaciones en concreto armado, a pesar de ser ampliamente aceptadas y utilizadas en la edificación de vivienda, no escapan a presentar deterioros debidos a diferentes factores donde pueden estar implicados errores en el proceso de formación de la edificación, baja calidad de los materiales, escasez de mantenimiento, exposición a condiciones desventajosas del medio ambiente, sismos constantes, etc., factores que pueden actuar de manera acumulativa provocando la aparición de problemas como la aparición de fisuras, desprendimiento del revestimiento, humedad, eflorescencias, corrosión en el acero de la construcción, problemas que si no son detectados y tratados a su tiempo provocaran un desempeño estructural en el edificio.

La patología estructural permite el examen metódico del origen y evolución de estos daños, que los identifica y establece directrices técnicas para su tratamiento. Cuando los edificios ya existen, el análisis deviene de particular importancia, dado que muchas de estas construcciones se levantan sin un diseño estructural o sin tener en cuenta en la forma debida los requisitos de resistencia sísmica que establecen las normativas actuales. Por lo tanto, se hace necesaria la

combinación de la inspección visual con ensayos no destructivos y evaluación estructural para saber el verdadero estado de los materiales y el comportamiento general de una edificación.

La presente tesis tiene como misión elaborar un diagnóstico global de una casa unifamiliar de estructura de hormigón armado en un entorno urbano, mediante un método técnico que combina inspección visual, ensayos no destructivos y evaluación estructural. La inspección visual se concreta en criterios normativos que permiten detectar, clasificar y registrar las lesiones que se pueden localizar en los miembros estructurales. Este levantamiento inicial es fundamental, no solo para poder analizar el nivel de deterioro que presenta una edificación, sino también para guiar las posteriores fases del estudio.

En el marco del propio estudio experimental se emplean ensayos no destructivos, correspondiéndose a la esclerometría, para determinar la resistencia superficial del hormigón y estudiar su homogeneidad sin afectar la propiedad de la edificación. Los resultados permiten valorar el nivel de calidad del hormigón existente y resultar útiles tanto a la posterioridad del análisis estructural. Este análisis se lleva a cabo mediante modelos computacionales, los cuales tienen en cuenta las características geométricas reales de la vivienda analizada, así como las cargas aplicadas y los parámetros sísmicos conforme a la normativa ecuatoriana en vigor.

A partir de los resultados del análisis estructural y de los ensayos periciales se decide qué deficiencias resulta pertinente identificar en la estructura de la edificación y cómo están relacionadas con los problemas observados. A partir del diagnóstico se elabora un plan de intervención técnica, esto es, producto de reducir los daños hallados y mejorar el comportamiento estructural de la edificación; en primer lugar, priorizando los criterios de seguridad, durabilidad y viabilidad técnica.

1.2 Problema de Estudio

Construida hace aproximadamente 30 años, la vivienda unifamiliar ubicada en la cooperativa Juan Montalvo, al norte de Guayaquil, está compuesta por hormigón armado y tiene un uso residencial y comercial. En la planta baja se encuentra una tienda, mientras que las demás áreas son unidades residenciales.

Sin embargo, con el paso del tiempo, la propiedad ha sufrido un notable deterioro. Este deterioro se atribuye a diversas causas: deficiencias en el diseño original (como la ausencia de cubiertas adecuadas), errores arquitectónicos durante su construcción, falta de mantenimiento preventivo y exposición prolongada a condiciones ambientales adversas como humedad, carbonatación y cloruros.

El análisis de caso revela varios signos patológicos: fisuras longitudinales en las columnas, desprendimiento de yeso, manchas persistentes de humedad y corrosión activa en el acero de refuerzo. Estos daños comprometen tanto la integridad estructural como la seguridad de los residentes.

Además, sin que haya un rediseño estructural documentado, la vivienda ha sido modificada en dos ocasiones: primero, se amplió una tienda existente (de 24.8 m² a 27.75 m²) y segundo, se adaptó una nueva tienda en el área de la sala (11.05 m²). Estas modificaciones dieron lugar a una nueva configuración del sistema estructural que generó excentricidades y concentraciones de esfuerzo ante cargas sísmicas y gravitacionales.

Pregunta de Investigación: ¿Cuáles son las causas raíz del deterioro patológico observado en la estructura de hormigón armado de la vivienda en estudio, y cuál es su impacto en la capacidad portante y durabilidad de la misma?

1.3 Justificación

La investigación se fundamenta en aspectos sociales, técnicos y económicos.

Desde la perspectiva social, el estudio mejora la seguridad y habitabilidad de los residentes al detectar y prevenir posibles fallas estructurales. En el ámbito técnico, se aplica y valida una metodología integral para diagnosticar condiciones patológicas estructurales mediante inspecciones visuales, pruebas no destructivas y análisis estructural. En términos económicos, la identificación precisa de patologías permitirá un uso eficiente de los recursos y priorizará las intervenciones estructurales, previniendo reparaciones superficiales ineficaces o costosas reconstrucciones. Además, el estudio tiene como objetivo desarrollar una propuesta de optimización estructural cuantificable que apoye decisiones técnicas hacia soluciones duraderas, seguras y económicamente sostenibles.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general.

Realizar un diagnóstico patológico de la estructura de hormigón armado de la vivienda unifamiliar ubicada en el sector Juan Montalvo, a través de inspecciones, análisis estructural y ensayos complementario, para identificar las razones detrás de su deterioro y presentar un plan de intervención técnica que mejore su rendimiento y durabilidad.

1.4.2 Objetivos específicos.

- ✚ Ejecutar una inspección visual detallada (organoléptica), siguiendo la norma ACI 201.1R, para identificar, clasificar y mapear (levantamiento de lesiones) todos los daños visibles presentes en los elementos estructurales.
- ✚ Analizar la resistencia de la estructura a través de simulaciones en ROBOT y la aplicación de pruebas de esclerometría (ACI 228 2R), evaluando cómo las patologías afectan su rigidez y fortaleza.
- ✚ Desarrollar un plan de intervención estructural que contemple fichas técnicas, un presupuesto orientativo y sugerencias para el mantenimiento preventivo, de acuerdo con las normativas ACI 562-19 y NEC-2015.

1.5 Marco hipotético.

Este estudio postula que todas las estructuras de hormigón armado, a lo largo de su vida útil, están sujetas a procesos de deterioro provocados tanto por factores intrínsecos —como deficiencias en el diseño, calidad inadecuada de los materiales o errores en la construcción— como por agentes extrínsecos relacionados con condiciones ambientales (humedad, carbonatación, presencia de cloruros, cambios térmicos y contaminación). Si estos problemas no son identificados y abordados oportunamente, pueden comprometer la capacidad de carga y la durabilidad del sistema estructural, aumentando el riesgo de fallos progresivos o pérdida funcional.

La principal hipótesis que se plantea es que el deterioro estructural en viviendas unifamiliares del sector Juan Montalvo se origina esencialmente en una combinación de deficiencias constructivas y falta de mantenimiento preventivo, exacerbado por la constante exposición a agentes agresivos presentes en el entorno urbano de Guayaquil. Estos factores generan fisuras, corrosión en el acero reforzado, desprendimientos y pérdida parcial de adherencia entre los materiales; lo cual conduce a una disminución gradual tanto de la rigidez como de la resistencia estructural.

A través del desarrollo de esta investigación, se propone evaluar dicha hipótesis mediante un protocolo sistemático para el diagnóstico estructural que incluirá inspecciones visuales enfocadas en el desgaste estructural, pruebas no destructivas (como esclerometría y mediciones del recubrimiento) así como análisis computacionales estructurales utilizando herramientas como ROBOT. Este enfoque también facilitará establecer una relación entre las patologías observadas y los mecanismos físicos o químicos que las han ocasionado.

Asimismo, se argumenta que validar esta hipótesis permitirá desarrollar propuestas técnicas cuantificables para intervenciones basadas en normativas vigentes (como ACI 201.1R, ACI 228.2R, ACI 562 y NEC-2015), con el fin de restaurar la capacidad portante y prolongar la

vida útil de la vivienda. De este modo, el estudio no solo confirmará la hipótesis planteada, sino que también ofrecerá una metodología replicable para el diagnóstico y rehabilitación de similares dentro del contexto urbano guayaquileño.

CAPÍTULO II

2.1 Introducción al hormigón armado.

2.1.1 Origen y evolución histórica del hormigón armado.

El hormigón, un pilar fundamental de la ingeniería civil moderna, es el resultado de un largo proceso evolutivo en la búsqueda de materiales que puedan unirse y resistir tanto el paso del tiempo como las cargas estructurales. Carles Romea, en su análisis histórico, traza una línea continua que va desde los primeros aglomerantes minerales utilizados por las civilizaciones del Mediterráneo hasta las formulaciones actuales que incorporan fibras, aditivos y nanotecnología (Romea, n.d.).

El autor Carles Romea, conecta la tradición con la innovación, subrayando que el conocimiento empírico que hemos heredado de civilizaciones antiguas —que usaban yeso, cal y más tarde cemento Portland— fue fundamental para el desarrollo de los hormigones armados, pretensados y de alta resistencia que

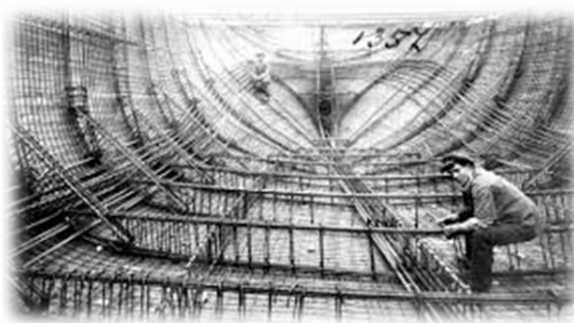


Ilustración 1 Orígenes del hormigón

conocemos hoy. Su historia comienza en las culturas ibéricas y griegas, donde el yeso, que se obtenía al calentar sulfato cálcico, se utilizaba como material de unión y revestimiento, anticipando la noción moderna de cohesión estructural. Más tarde, los romanos perfeccionaron estas técnicas al añadir arena y otros áridos, lo que incrementó la resistencia y durabilidad del material (Romea, n.d.).

El gran avance llegó con la civilización romana, que descubrió las propiedades del agua en la mezcla de cal, cenizas volcánicas (puzolana), arena y grava, dando vida al opus caementicium,

el precursor directo del hormigón moderno. Gracias a este descubrimiento, pudieron erigir impresionantes obras como el Panteón de Agripa y los acueductos, cuya durabilidad aún nos deja boquiabiertos. Vitruvio, en su tratado *De Architectura*, documentó y estableció las proporciones de los materiales, mostrando un temprano dominio técnico y racional del proceso de construcción. Sin embargo, con la caída del Imperio Romano en el año 476 d.C., gran parte de este conocimiento se desvaneció, lo que llevó a un retroceso en la calidad (Romea, n.d.).

Durante la Edad Media, la falta de conocimiento científico y la discontinuidad en las técnicas romanas llevaron a que la piedra se convirtiera en el material estructural más utilizado, mientras que el uso de morteros se volvió bastante básico. Sin embargo, el Renacimiento trajo consigo un renovado interés por las técnicas clásicas: Brunelleschi, al diseñar la cúpula de Santa María del Fiore entre 1420 y 1436, reinterpretó los métodos romanos para levantar una estructura monumental sin necesidad de andamios, y Miguel Ángel continuó este legado con la cúpula de San Pedro en el Vaticano. Estas obras son un claro reflejo de la transición hacia una nueva comprensión de los materiales y la recuperación de conocimientos antiguos. de las edificaciones (Romea, n.d.).

En el siglo XVIII, la ciencia empezó a explorar los aglomerantes de una manera más experimental. John Smeaton, al reconstruir el faro de Eddystone, redescubrió la capacidad hidráulica de las mezclas de cal con arcilla, tomando inspiración de los métodos romanos. Más tarde, Louis Vicat se adentró en el estudio químico de estos compuestos y, en 1818, desarrolló lo que se conoce como “cal hidráulica”. Finalmente, en 1824, Joseph Aspdin patentó el cemento Portland, una mezcla calcinada de piedra caliza y arcilla, famosa por su alta resistencia y fraguado controlado. Esto sentó las bases del hormigón moderno, un material que combina áridos, cemento y agua, marcando el comienzo de la era industrial en la construcción (Romea, n.d.).

El hormigón armado nació de la fusión ideal entre el concreto, que es fuerte a la compresión, y el acero, que brilla por su resistencia a la tracción. Esta combinación logró superar una de las grandes limitaciones del material. Entre los pioneros de esta técnica se encuentran figuras como Joseph-Louis Lambot, quien en 1848 creó la primera barca de “ferrocemento”; Joseph Monier, que patentó macetas reforzadas y luego se aventuró en elementos estructurales; François Coignet, responsable del primer edificio de hormigón reforzado en 1853; y François Hennebique, quien en 1892 sistematizó el uso de armaduras y patentó la primera viga con estribos. Este último fue fundamental para establecer el principio de colaboración entre el acero y el concreto, siendo el Puente del Risorgimento, inaugurado en 1911 en Roma, su máxima expresión, consolidando así al hormigón armado como un pilar de la arquitectura moderna (Romea, n.d.).

Durante la primera mitad del siglo



Ilustración 3 Félix Candela

XX, el material se expandió a nivel global. Ingenieros como Charles Rabut, Eugène Freyssinet y Félix Candela jugaron un papel clave en su evolución, gracias a sus



Ilustración 2 Charles Rabut

innovaciones en cálculo y diseño

estructural. La arquitectura de Le Corbusier elevó al hormigón a la categoría de símbolo de modernidad y eficiencia industrial. Al mismo tiempo, Freyssinet presentó el pretensado, una técnica que permitía aplicar tensiones previas al acero para contrarrestar las deformaciones y fisuras del hormigón, lo que mejoraba su durabilidad y resistencia. En 1928, patentó el sistema de hormigón pretensado y lo utilizó en el Puente de Luzancy sobre el río Marne, marcando un hito en la ingeniería estructural (Romea, n.d.).



Ilustración 4 Eugène Freyssinet

Desde la década de 1980, el hormigón ha experimentado una transformación notable gracias a los avances tecnológicos.

La incorporación de aditivos, fibras y microcomponentes ha permitido un control preciso de sus propiedades físicas y químicas. Han surgido hormigones autocompactables, autonivelantes, de alta resistencia (superiores a 100 MPa) y aquellos reforzados con fibras metálicas o poliméricas, que mejoran la ductilidad y disminuyen la fisuración. Estas innovaciones han dado lugar al hormigón de comportamiento programable, donde se pueden ajustar parámetros como la trabajabilidad, la durabilidad y la textura superficial (Romea, n.d.).

Romea también resalta la incorporación de técnicas de prefabricación y pretensado exterior, lo que ha permitido reducir el peso y mejorar la precisión de las estructuras. Además, se mencionan estudios de la NASA de los años 80 que exploraban la posibilidad de crear “hormigón lunar” utilizando materiales del regolito, abriendo así un nuevo horizonte para la construcción en entornos extraterrestres (Romea, n.d.).

El autor llega a la conclusión de que el hormigón ha estado presente en la historia de la humanidad desde sus inicios, hasta los ambiciosos proyectos de colonización espacial. Su bajo costo, versatilidad y durabilidad lo han establecido como el material estructural más crucial a lo largo del tiempo. La combinación con el acero ha dado lugar a sistemas compuestos más robustos, mientras que la integración de nanotecnología, polímeros y fibras está llevando al desarrollo de materiales inteligentes: autolimpiables, translúcidos, autorreparables e incluso capaces de captar energía (Romea, n.d.).

Finalmente, Romea sostiene que el futuro del hormigón radica en su constante reinención. Las nuevas tecnologías —en especial las fibras reforzadas con polímeros (FRP)— ofrecen

soluciones ligeras, duraderas y eficientes para la rehabilitación estructural, particularmente en edificaciones patrimoniales o infraestructuras deterioradas. Así, el hormigón se reafirma no solo como un símbolo de permanencia y resistencia, sino también como un campo de innovación que une la sabiduría constructiva del pasado con la visión tecnológica del siglo XXI (Romea, n.d.).

2.1.2 Composición y propiedades del hormigón.

El hormigón es un material compuesto que se forma a partir de una mezcla de cemento, áridos finos y gruesos, todo ello unido por la hidratación del cemento. Su rendimiento estructural está muy influenciado por la relación entre el agua y el cemento (w/c), así como por el tipo y la cantidad de áridos utilizados, la inclusión de aditivos y la calidad del curado. Según Mousavi, hay cuatro parámetros clave que determinan su composición: el agua, el contenido de polvo (que incluye cemento y adiciones), el tipo de árido y el uso de aditivos superplastificantes. Estos aditivos pueden alterar la densidad, la trabajabilidad y la resistencia a la compresión del hormigón. Con cambios en estos factores, el material puede experimentar variaciones notables en su microestructura y en la adherencia con el acero, lo que a su vez impacta en la resistencia general de los elementos estructurales (Mousavi et al., 2020).



Ilustración 5 Composición del hormigón

González-Moreno señalan que la durabilidad del hormigón en ambientes marinos también depende de factores como la permeabilidad, la porosidad y la capacidad de difusión iónica. El

hormigón con una baja relación agua/cemento y aditivos minerales (como microsílíce, escoria o cenizas volantes) tiende a tener una matriz más densa, lo que ayuda a minimizar la penetración de cloruros y, por consiguiente, la corrosión del acero (González-Moreno et al., 2024a).

2.1.3 Propiedades del acero de refuerzo.

El acero de refuerzo es fundamental porque le da al hormigón una resistencia a la tracción que este material no puede ofrecer por sí solo. Entre sus propiedades mecánicas más importantes se encuentran el límite elástico (f_y), el módulo de elasticidad ($E \approx 200$ GPa) y la ductilidad, que son características clave para absorber esfuerzos de flexión y corte. Según el estudio de González-Moreno et al. (2024), la composición química del acero, especialmente el contenido de carbono y manganeso, tiene un impacto significativo en su resistencia a la corrosión en ambientes salinos. Los aceros que tienen menos impurezas y una mayor homogeneidad microestructural tienden a ser más estables frente al ataque de cloruros (González-Moreno et al., 2024a).

Además, Mousavi vinculan las dimensiones y el recubrimiento de las barras (los factores d_b y c) con la adherencia y la longitud de anclaje que son necesarias para asegurar la transmisión de esfuerzos. Las normas tienen en cuenta aspectos como el tipo de recubrimiento (ya sea epóxico o no) y el diámetro de la barra al calcular la longitud de desarrollo, lo que demuestra que el comportamiento del acero no es algo aislado, sino que está directamente influenciado por su interacción con la matriz de cemento (Mousavi et al., 2020).

2.1.4 Interacción entre concreto y acero.

La interfaz entre el acero y el hormigón (RCI, Rebar–Concrete Interface) es un área clave donde se transmiten las fuerzas entre estos dos materiales. Según Mousavi el fenómeno conocido como “bond–slip” se refiere al deslizamiento relativo que ocurre entre la barra de acero y el concreto. La adherencia en esta zona depende de varios factores, como la fricción, la adherencia química y el anclaje mecánico que proporcionan las nervaduras del acero. Si la adherencia es

deficiente, esto puede llevar a un aumento en la apertura de fisuras y a una disminución de la ductilidad estructural (Mousavi et al., 2020).

La forma en que se compone el concreto tiene un impacto directo en la calidad de la interfaz. Por ejemplo, una mayor finura del árido, una relación agua/cemento baja y la inclusión de sílice fume ayudan a reducir la porosidad en la zona de transición, lo que resulta en una unión más densa y resistente. Los autores mencionan dos mecanismos que explican por qué varía el comportamiento de esta interfaz: (a) la porosidad interfacial, que influye en la difusión de iones y en la capacidad de adherencia, y (b) la cantidad de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en la zona de transición, ya que un exceso de este puede debilitar la unión al formar capas cristalinas frágiles (Mousavi et al., 2020).

González-Moreno señalan que la exposición prolongada al agua de mar favorece la difusión de cloruros a través del hormigón hasta que alcanzan el acero, lo que provoca la ruptura de la película pasiva protectora y acelera la corrosión. Esto pone de relieve el papel crucial de la densidad y la compactación del hormigón para mantener la adherencia entre el acero y el hormigón (González-Moreno et al., 2024b).

2.1.5 Factores que afectan la durabilidad del hormigón.

La durabilidad del hormigón armado depende de varios factores, tanto físicos como químicos y ambientales. Según (González-Moreno et al., 2024b), hay tres agentes principales que contribuyen a su deterioro:

- ✚ **Ataque por cloruros**, que causa corrosión del acero al destruir la capa pasivante.
- ✚ **Carbonatación**, reducción del pH del concreto por reacción del CO_2 con el hidróxido de calcio.
- ✚ **Sulfatos y ambientes marinos**, que producen expansiones internas y fisuración.

El estudio señala que la presencia de microfisuras, altos valores de w/c y un curado deficiente incrementan la penetración de agentes agresivos, reduciendo la vida útil de las estructuras (González-Moreno et al., 2024b).

Mousavi destacan que la microestructura del concreto en la zona de transición interfacial juega un papel crucial: una alta porosidad o la acumulación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ facilitan la migración de iones, lo que acelera los procesos de corrosión. Al añadir componentes como sílice fume o nanopartículas, se logra una mayor densidad en la matriz, se reduce la porosidad y se mejora la adherencia entre el acero y el concreto, lo que a su vez incrementa la durabilidad (Mousavi et al., 2020).

2.1.6 Importancia del control de calidad en materiales y ejecución.

Ambos artículos coinciden en que la durabilidad y el rendimiento estructural del hormigón armado dependen tanto de la composición de los materiales como del control de calidad durante su ejecución. (González-Moreno et al., 2024a) subrayan que es fundamental llevar a cabo un control riguroso de las mezclas, del curado y de la protección superficial para evitar la entrada de cloruros y la fisuración prematura. En entornos agresivos, se aconseja utilizar cementos con bajo contenido de C_3A y realizar una verificación continua de la resistencia y permeabilidad del concreto colocado.

Mousavi sostienen que el control de calidad no debe centrarse únicamente en la resistencia a la compresión, sino que también debe incluir una evaluación microestructural del hormigón, especialmente en la zona de transición acero-hormigón. Sugieren que la combinación de estudios macroscópicos y microscópicos es esencial para garantizar el buen desempeño del material en las últimas generaciones de hormigones, como los autocompactantes o los nanomoficados, lo que ayuda a evitar errores de diseño o sobreestimaciones en la longitud de anclaje (Mousavi et al., 2020).

2.1.7 Normativa ecuatoriana de diseño estructural (NEC-SE-HM).

La Norma Ecuatoriana de la Construcción – Sección Estructural de Hormigón Armado (NEC-SE-HM), publicada en 2015 por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), es el documento normativo más importante que regula el diseño, la construcción y el control de estructuras de hormigón armado en Ecuador. Su objetivo principal es asegurar la seguridad estructural, la durabilidad y un comportamiento sísmico adecuado de los edificios, teniendo en cuenta las condiciones geográficas y geotécnicas que caracterizan al país (De & Construcción, n.d.).

La NEC-SE-HM se aplica a todas las estructuras de concreto reforzado, tanto en edificaciones nuevas como en trabajos de rehabilitación o refuerzo. Esta norma establece criterios de diseño fundamentados en la filosofía de resistencia última (LRFD). Este enfoque, que se deriva del ACI 318-14, reemplaza por completo el método de esfuerzos admisibles que se usaba en las normas anteriores (CEC-79 y CEC-01), promoviendo un diseño que asegura la resistencia estructural, el desempeño sísmico y la ductilidad de los elementos. La norma ecuatoriana adopta principios esenciales de análisis por estados límite, que incluyen los estados límite últimos (ELU), enfocados en la resistencia y estabilidad, y los estados límite de servicio (ELS), que se relacionan con la fisuración, deformación y vibraciones excesivas. Este cambio en la normativa busca asegurar que las estructuras no solo sean capaces de resistir cargas extremas, sino que también mantengan su funcionalidad y durabilidad durante toda su vida útil. (CEC-79 y CEC-01) Se promueve así un diseño que garantice tanto la resistencia estructural como un buen desempeño sísmico y la ductilidad de los elementos. La norma exige que se cumplan al mismo tiempo las condiciones de resistencia, estabilidad global, ductilidad y control de fisuración. En el caso de los pórticos que resisten momentos, se establece obligatoriamente el criterio de “columna fuerte – viga

débil”, lo que asegura que la plastificación ocurra en las vigas antes que en las columnas, evitando así colapsos frágiles (De & Construcción, n.d.).

El capítulo (De & Construcción, n.d.) establece que los elementos estructurales deben diseñarse de acuerdo con las siguientes expresiones fundamentales:

$$\phi P_n \geq P_u, \quad \phi M_n \geq M_u, \quad \phi V_n \geq V_u$$

Ecuación 1 Columna fuerte - viga débil

donde:

- ✚ P_n, M_n, V_n : Resistencias nominales de los elementos estructurales,
- ✚ P_u, M_u, V_u : Solicitaciones de diseño,
- ✚ ϕ : Factor de reducción de resistencia, determinado según el tipo de esfuerzo (flexión, compresión o corte).

La NEC-SE-HM (De & Construcción, n.d.) regula los aspectos clave en el diseño de elementos de concreto armado. Para las vigas, se establecen las cuantías mínimas de acero longitudinal (A_s), se definen los límites de espaciamiento entre las barras, así como la resistencia a flexión y corte, y los requerimientos de confinamiento transversal, todo esto dependiendo de la ductilidad de la zona sísmica.

En cuanto a las columnas, se fijan las cuantías mínimas y máximas de refuerzo ($1\% \leq \rho \leq 8\%$), se especifican los recubrimientos mínimos, se realiza un análisis de flexo-compresión y se controla la esbeltez.

Respecto a las losas, se indican los espesores mínimos, las cuantías de refuerzo tanto inferior como superior, y se establecen criterios para la fisuración y la deformación admisible. Para los muros estructurales y diafragmas, se especifica la rigidez mínima, las cuantías de refuerzo horizontal y vertical, y los requisitos de anclaje en zonas críticas.

Finalmente, en las conexiones estructurales, se exige que se cumpla la condición $M_{columnas} \geq 1.2 \times M_{viga}$, asegurando así la disipación de energía en las zonas dúctiles.

La NEC-SE-HM se interrelaciona de manera significativa con la NEC-SE-DS (Diseño Sismorresistente), que establece los criterios de riesgo sísmico, los espectros de respuesta, los factores de reducción (R) y las aceleraciones de diseño que deben ser tenidos en cuenta para el cálculo estructural. Así, la NEC-SE-HM supervisa la resistencia y el diseño minucioso de los componentes de concreto reforzado, mientras que la NEC-SE-DS especifica las cargas sísmicas y las combinaciones de carga pertinentes (De & Construcción, n.d.).

Uno de los aportes más destacados de la NEC-SE-HM es la incorporación de criterios de ductilidad y confinamiento, que son apropiados para la considerable actividad sísmica en Ecuador. Se definen áreas de refuerzo confinado en vigas y columnas, se imponen límites a las derivas máximas intermedias ($\Delta \leq 0.02h$), y se establecen condiciones de sobre-resistencia para asegurar un comportamiento inelástico controlado (De & Construcción, n.d.).

También especifica que toda estructura de concreto reforzado debe ser evaluada utilizando dos enfoques de diseño sísmico:

- ✚ El método estático equivalente, aplicable a edificaciones regulares de hasta 60 metros de altura.
- ✚ El método dinámico modal-espectral, que es obligatorio para edificaciones irregulares o de mayor estatura.

La NEC-SE-HM 2015 marca un progreso significativo en la ingeniería estructural en Ecuador, al integrar criterios contemporáneos de diseño que priorizan la resistencia, la ductilidad controlada y la seguridad frente a sismos. Su alineación con el ACI 318, el Eurocódigo 2 y las normativas ASTM garantiza que Ecuador cuente con un marco normativo moderno, en sintonía

con las tendencias internacionales relativas al diseño y la garantía de calidad en estructuras de concreto armado (*ASTM International* | *ASTM*, n.d.).

2.2 Patología del hormigón armado.

2.2.1 Definición de patología estructural.

La patología estructural se refiere a la ciencia que investiga las causas, manifestaciones, evolución y posibles soluciones a los daños que afectan el comportamiento de una estructura, comprometiendo su capacidad de resistencia, estabilidad o durabilidad. Según Morais, este término proviene del ámbito médico y se adapta a la ingeniería civil para describir la “enfermedad” que sufren los elementos constructivos cuando pierden sus propiedades originales o su funcionalidad. Al igual que en el cuerpo humano, donde la patología busca identificar el origen y la evolución de una dolencia, en la ingeniería estructural se busca diagnosticar los síntomas visibles del daño, entender su mecanismo interno y establecer un tratamiento o intervención correctiva adecuada (Morais et al., 2020).

En el ámbito del hormigón armado, estas patologías aparecen cuando hay un desequilibrio entre los materiales que forman el sistema —el concreto y el acero—, lo que provoca cambios en su comportamiento mecánico y químico. Las causas pueden ser diversas: físicas (como cargas dinámicas, cambios de temperatura o retracciones), químicas (ataques por sulfatos, carbonatación o cloruros), mecánicas (sobrecargas o impactos) o simplemente el resultado del envejecimiento natural y la falta de un mantenimiento adecuado. Así, la patología estructural implica un estudio completo del proceso de degradación, desde su inicio hasta el colapso, lo que permite desarrollar estrategias para su diagnóstico, pronóstico y reparación (Morais et al., 2020).

Morais destacan que toda estructura pasa por un proceso de deterioro gradual que puede hacerse evidente a través de fisuras, trincas, corrosión, desprendimientos o deformaciones, o puede manifestarse de manera más sutil, afectando la adherencia interna entre el concreto y el acero de

refuerzo. Estos síntomas son las manifestaciones patológicas que no solo afectan la apariencia del edificio, sino que también indican una posible pérdida de funcionalidad y seguridad estructural. Cuando las fisuras llegan a las armaduras, permiten la entrada de agentes dañinos como el CO₂, cloruros y humedad, lo que provoca corrosión y empeora la situación con el tiempo, disminuyendo la capacidad resistente y acelerando el riesgo de colapso parcial o total de los elementos (Morais et al., 2020).



Ilustración 6 Patologías estructurales

Onofre amplían esta definición al señalar que los problemas estructurales en edificios de hormigón armado no deben considerarse simplemente fallos de construcción. En cambio, reflejan el deterioro acumulado debido a decisiones técnicas deficientes tomadas durante las fases de diseño, ejecución o mantenimiento. De esta manera, la patología se convierte en una valiosa herramienta para el aprendizaje y el control de calidad, ya que ayuda a identificar patrones de errores recurrentes, mejorar los estándares técnicos y optimizar los procesos constructivos futuros (Onofre et al., 2021).

Desde una perspectiva metodológica, la patología estructural se basa en un proceso diagnóstico que integra la observación visual, ensayos no destructivos (END), análisis de materiales y el monitoreo del comportamiento estructural. A través de esta metodología, el ingeniero puede determinar si un daño es activo o pasivo, estructural o superficial, y cuál es su potencial de evolución. Este enfoque no solo se enfoca en reparar el daño visible, sino también en

eliminar la causa raíz, con el fin de restaurar la capacidad funcional de la estructura y alargar su vida útil (Onofre et al., 2021).

2.2.2 Causas y origen de las patologías en estructuras.

Se indica que las patologías en las estructuras de hormigón armado surgen por diversas razones y pueden manifestarse en cualquiera de las cuatro etapas del ciclo constructivo: pre-proyecto, diseño, ejecución y mantenimiento. En cada una de estas etapas, los errores técnicos o la falta de control pueden dar lugar a condiciones que facilitan la aparición de daños físicos, químicos o mecánicos en los elementos estructurales (Morais et al., 2020).

Durante la fase de pre-proyecto, los autores subrayan que la falta de estudios sobre el suelo, la caracterización ambiental o la evaluación de la agresividad química puede llevar a decisiones erróneas, como el uso de materiales que no son compatibles con las condiciones de exposición. Si no se identifican variables como la humedad, las sales disueltas o el contenido de CO₂ en el entorno, se limita desde el principio la durabilidad potencial del concreto armado (Morais et al., 2020).

En la fase de diseño, la literatura revisada por Moraes et al. menciona errores comunes en el dimensionamiento, un detallado inadecuado de las armaduras, la omisión de los efectos térmicos y la falta de compatibilidad entre los proyectos eléctricos, hidráulicos y estructurales. Estas fallas generan discontinuidades en el esfuerzo, recubrimientos deficientes o concentraciones de tensiones que favorecen la fisuración temprana (Morais et al., 2020).

El estudio resalta que el mal uso de materiales, la dosificación incorrecta del concreto, la falta de vibrado y curado, así como el uso de agregados contaminados, son causas recurrentes de patologías que surgen en la etapa de ejecución. Las obras analizadas mostraron deficiencias en la compactación y limpieza de las formas, ausencia de separadores y recubrimiento insuficiente.

Estas condiciones propiciaron la corrosión del acero, que fue la patología más común, presente en el 100 % de los casos estudiados (Padra Rafael, 2020).

En la etapa de mantenimiento, observan que la falta de inspección y conservación periódica es una de las causas más frecuentes de degradación progresiva. Muchas de las estructuras analizadas no contaban con planes de mantenimiento, lo que permitió que microfisuras y filtraciones evolucionaran hasta causar pérdida de sección, corrosión y carbonatación. Según los autores, la falta de mantenimiento puede transformar defectos menores en fallas estructurales graves, aumentando el riesgo para los usuarios (Padra Rafael, 2020).

2.2.3 Clasificación de lesiones estructurales y no estructurales.

Las lesiones en estructuras de hormigón armado, según (Morais et al., 2020), se pueden dividir en dos categorías principales: aquellas que afectan la integridad estructural y las que solo impactan en la estética o la protección superficial. Esta clasificación es útil para evaluar con mayor precisión el riesgo asociado a cada tipo de daño y para priorizar las acciones de reparación o monitoreo. Las lesiones estructurales son las que afectan directamente la capacidad de carga o la estabilidad del elemento de hormigón armado, y si no se controlan, pueden llevar a fallas graves o colapsos. Entre las manifestaciones más significativas que identificaron los autores están la corrosión de las armaduras, fisuras, trincas, flambaje y carbonatación. En su análisis de 15 casos reales, la corrosión del acero de refuerzo se observó en el 100 % de las obras estudiadas, siendo la patología más común y peligrosa, ya que disminuye la sección resistente del acero, provoca fisuras longitudinales por la expansión de óxidos y facilita el desprendimiento del recubrimiento de concreto (Morais et al., 2020).

La fisuración, que se presentó en el 73 % de los casos, se considera una patología estructural cuando está relacionada con esfuerzos de flexión, tracción o cortante, o cuando atraviesa todo el espesor del elemento. Estas fisuras pueden convertirse en trincas o rachaduras si

su apertura aumenta, y son vías de entrada para la humedad y agentes agresivos. Otra manifestación estructural que se describe es el flambaje o pandeo de columnas, que tuvo una incidencia del 27 %, causado por errores en el dimensionamiento o por sobrecargas no previstas. También se menciona la carbonatación (20 %), que reduce la alcalinidad del concreto y desprotege las armaduras, y la eflorescencia (47 %), que ocurre cuando hay penetración de sales que deterioran la adherencia interna (Morais et al., 2020).

Por otro lado, las lesiones no estructurales están principalmente vinculadas al aspecto superficial o estético, así como a la pérdida de hermeticidad o protección de las estructuras. Según (Morais et al., 2020) las manchas, eflorescencias y microfisuras superficiales son las más comunes en esta categoría. Las manchas, que aparecen en el 60 % de los casos, pueden ser causadas por humedad, reacciones químicas con agentes externos o el uso de desmoldantes de mala calidad. Esto no solo afecta la apariencia, sino que también puede facilitar el crecimiento de hongos o eflorescencias. Aunque estas lesiones no afectan la resistencia del elemento, su persistencia indica que hay procesos de infiltración que podrían evolucionar hacia daños estructurales más serios si no se tratan adecuadamente.

2.2.4 Factores de riesgo: diseño, ejecución, materiales y mantenimiento.

Las patologías en estructuras de hormigón armado tienen múltiples causas, generalmente relacionadas con deficiencias que se acumulan a lo largo de la vida útil del edificio. Los principales factores de riesgo se dividen en cuatro categorías: fallas en el diseño estructural, errores durante la ejecución, problemas con la calidad de los materiales y la falta de mantenimiento. Cada uno de estos aspectos contribuye, de manera directa o indirecta, al deterioro progresivo del concreto y de las armaduras, lo que a su vez reduce la durabilidad, la capacidad de carga y la seguridad estructural de la construcción (Onofre et al., 2021).

Durante la fase de diseño, los errores conceptuales o de cálculo son algunas de las causas más críticas de las patologías. Los autores notaron que la corrosión generalizada en columnas, vigas y losas se originó, en parte, por deficiencias en el diseño, como la falta de juntas de dilatación, el desconocimiento de las condiciones ambientales agresivas y el uso de secciones estructurales inadecuadas. En el caso de la losa analizada, se observó que los planos estructurales no cumplían con el recubrimiento mínimo de 25 mm requerido por la norma para ambientes urbanos, lo que facilitó la entrada de humedad y agentes químicos, acelerando así la corrosión del acero (Onofre et al., 2021).

Durante la fase de ejecución, los riesgos tienden a aumentar debido a deficiencias en la mano de obra y en el control de procesos. Un estudio realizado por Onofre reveló que una gran parte de los defectos observados en la estructura inspeccionada se atribuía a errores en la construcción, como la falta de limpieza de las armaduras antes del hormigonado, el uso de acero corroído, un vibrado insuficiente del concreto y una mala dosificación de la mezcla. Estas prácticas dieron lugar a áreas con alta porosidad, baja resistencia a la compresión y pérdida de adherencia entre el concreto y el acero. Además, se identificaron errores en la proporción agua/cemento, lo que incrementó la permeabilidad del material, facilitando la entrada de agentes agresivos (cloruros y dióxido de carbono) durante el fraguado y acortando la vida útil del elemento estructural (Onofre et al., 2021).

Otro aspecto importante fue la falta de un recubrimiento adecuado para las armaduras, tanto en columnas como en losas y vigas. Esta situación, sumada a la alta humedad ambiental, provocó una rápida expansión de los productos de corrosión del acero, lo que resultó en fisuras longitudinales y desprendimiento del recubrimiento, un fenómeno que los autores describen como “spalling of concrete”. En casos más avanzados, la pérdida de sección metálica y la exposición del

acero a las inclemencias del tiempo llevaron a un riesgo estructural crítico, especialmente en los pilares del primer nivel, que soportaban el peso de los pisos superiores (Onofre et al., 2021).

En cuanto a los materiales, el artículo destaca que una selección y control inadecuados son factores clave en la aparición de patologías. Onofre notaron que los agregados y el agua de mezcla utilizados en la construcción estaban contaminados, lo que llevó a una reacción química en el concreto que provocó una corrosión prematura. Esta situación se complicó aún más por el uso de aceros que ya mostraban signos de oxidación al momento de ser instalados. Los autores concluyen que la contaminación del material durante la construcción fue la principal causa del daño, lo que resalta la importancia de un control de calidad riguroso y de realizar pruebas de recepción de materiales antes de su uso en obra (Onofre et al., 2021).

Finalmente, la falta de mantenimiento se presenta como el cuarto factor de riesgo y el más común en estructuras de hormigón armado. La investigación de Onofre indica que, en la vivienda analizada, no se habían llevado a cabo inspecciones periódicas ni acciones preventivas desde su construcción en 1983. Esto permitió que las microfisuras iniciales se transformaran en fisuras profundas y desprendimientos visibles. Los autores subrayan que, aunque el concreto es un material resistente, su rendimiento depende de un programa de conservación y monitoreo que permita detectar y reparar a tiempo los daños incipientes. La falta de un mantenimiento adecuado provoca la acumulación de humedad en las microfisuras, acelerando los procesos de deterioro y afectando la estabilidad general de la estructura (Onofre et al., 2021).

2.2.5 clasificación de patologías del hormigón armado y pretensado, identificación de causas raíz y criterios de severidad.

2.2.5.1 Clasificación general de las patologías

Los autores de INTEMAC (Tomo Calavera José, 2005) han desarrollado una clasificación de las patologías que afectan al hormigón armado y pretensado, basándose en la etapa del ciclo de

vida en la que surgen y en la naturaleza del daño que presentan. La clasificación principal se detalla a continuación:

- ✚ **Daños originados en la etapa de proyecto:** Estos daños están relacionados con fallos en el diseño o en los cálculos, la omisión de detalles constructivos, errores en la modelización o la subestimación de las cargas. Por ejemplo, la falta de atención en el refuerzo negativo de los forjados o el uso de diámetros de barras que no son compatibles con los radios de doblado necesarios pueden causar fisuras, punzonamientos o incluso colapsos parciales. En el caso de las estructuras pretensadas, los errores de diseño en la zona de transferencia del pretensado o en la distribución de tensiones locales pueden provocar fisuras en el alma o en los anclajes de las vigas.
- ✚ **Daños debidos a los materiales:** Este tipo de daños incluye problemas como baja resistencia, retracción, contracción térmica, carbonatación, ataque por cloruros, reacciones árido-álcali o el uso de cementos inadecuados (como el cemento aluminoso, que se utilizó en viguetas pretensadas entre 1950 y 1970). Estos procesos afectan la porosidad del concreto, reducen el pH y pueden causar corrosión de las armaduras o pérdida de pretensado.
- ✚ **Daños originados durante la ejecución:** Estos se deben a defectos en la construcción, como recubrimientos insuficientes, compactación inadecuada, movimientos del encofrado, errores en el replanteo o la falta de juntas de hormigonado. En vigas y losas prefabricadas, la irregularidad en los apoyos o la mala alineación de las piezas puede generar fisuras debido a esfuerzos localizados y pérdida de apoyo.

- ✚ **Los daños que se generan a lo largo de la vida de un servicio:** Incluyen los que resultan de sobrecargas imprevistas, un mantenimiento deficiente, accidentes como incendios, explosiones, impactos o vibraciones, y condiciones ambientales severas. Un caso típico es el deterioro que se produce por no mantener adecuadamente la impermeabilización en techos o juntas, lo que facilita la filtración de agua y la corrosión del acero.

2.2.5.2 Identificación de causas raíz

Incluyen los que resultan de sobrecargas imprevistas, un mantenimiento deficiente, accidentes como incendios, explosiones, impactos o vibraciones, y condiciones ambientales severas. Un caso típico es el deterioro que se produce por no mantener adecuadamente la impermeabilización en techos o juntas, lo que facilita la filtración de agua y la corrosión del acero (Tomo Calavera José, 2005).

El método que proponen INTEMAC y Calavera (1996) para identificar las causas raíz de las patologías se basa en un análisis sistemático de cuatro niveles de origen:

1. Fase de diseño:

- ✚ Falta de detalles constructivos en áreas críticas (como los encuentros entre viga y pilar o los nudos de continuidad).
- ✚ Modelos de cálculo que no reflejan adecuadamente la realidad constructiva.
- ✚ No se consideran adecuadamente las acciones térmicas, higrométricas o las diferencias en los apoyos.

2. Fase de ejecución:

- ✚ Errores en el armado (barras mal colocadas o con un recubrimiento insuficiente).
- ✚ Mala calidad en la compactación o el curado del concreto.
- ✚ Falta de control sobre las tolerancias entre los elementos prefabricados.

3. Fase de materiales:

- ✚ Uso de cementos inestables o áridos contaminados.
- ✚ Relación agua/cemento excesivo, lo que aumenta la permeabilidad.
- ✚ Presencia de compuestos agresivos en la mezcla (como sales, sulfatos y cloruros).

4. Fase de servicio:

- ✚ Mantenimiento inadecuado o inexistente.
- ✚ Exposición a ambientes marinos o industriales sin la protección superficial adecuada.
- ✚ Sobrecargas o impactos que no se consideraron en el diseño inicial.

Los autores enfatizan que una patología rara vez tiene una única causa; más bien, suele ser el resultado de la combinación de varios factores. Por ejemplo, una fisura longitudinal en una viga puede ser causada simultáneamente por una mala colocación de las armaduras, un concreto de alta porosidad y una exposición prolongada a la humedad. Para identificar la causa raíz, es necesario realizar un diagnóstico completo que incluya inspección visual, ensayos no destructivos, verificación de documentos y análisis estructural comparativo (Tomo Calavera José, 2005).

2.2.5.3 Criterios de severidad

Para entender la importancia o gravedad de las patologías, INTEMAC (Tomo Calavera José, 2005) sugiere tres niveles jerárquicos de análisis que se basan en la relevancia estructural, la evolución con el tiempo y el riesgo de colapso:

Nivel I – Daños leves (superficiales o estéticos):

- ✚ Estos daños no afectan la seguridad ni la capacidad de resistencia de la estructura. Incluyen cosas como eflorescencias, manchas, desprendimientos de recubrimiento o fisuras menores ($\leq 0,3$ mm). La reparación en este caso es más bien preventiva o se enfoca en el mantenimiento estético.

Nivel II – Daños moderados (funcionales):

- ✚ Aquí, los daños alteran parcialmente la funcionalidad o durabilidad de la estructura. Esto abarca fisuras activas (0,3–1 mm), corrosión incipiente o pérdidas localizadas de sección. Para estos casos, se requiere un monitoreo constante y una reparación programada.

Nivel III – Daños severos (estructurales):

- ✚ Estos daños comprometen la estabilidad, resistencia o integridad de la estructura. Incluyen colapsos parciales, corrosión generalizada, pérdida de pretensado, asientos diferenciales o fisuras que superan 1 mm. En este nivel, es crucial realizar una intervención inmediata y reforzar la estructura.

Estos criterios de severidad se complementan con la metodología GUT (Gravedad, Urgencia, Tendencia) que utilizan Onofre et al. (2021) para cuantificar la prioridad de reparación. Asignan valores del 1 al 10 a cada parámetro, lo que permite obtener un índice de riesgo ($G \times U \times T$). Así, se pueden jerarquizar las intervenciones según su impacto potencial y la rapidez con la que evoluciona el daño (Onofre et al., 2021).

2.2.6 Mapeo de lesiones y registro gráfico.

El mapeo de lesiones y registro gráfico constituye una de las etapas fundamentales dentro del diagnóstico patológico de estructuras de hormigón armado, ya que permite identificar, documentar y cuantificar visualmente los daños presentes en los elementos estructurales, estableciendo una base técnica para la planificación de las intervenciones. Según Onofre, el proceso inicia con una inspección visual sistemática, complementada con registros fotográficos detallados y la elaboración de planos o diagramas de localización donde se representa gráficamente la distribución de las patologías observadas. Este procedimiento transforma las observaciones

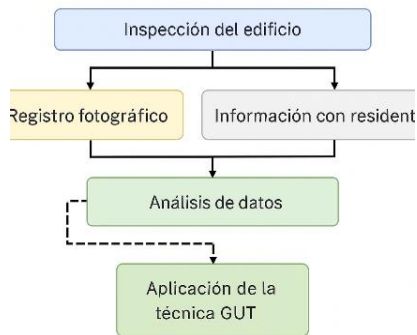
cualitativas en información técnica verificable, facilitando la toma de decisiones (Onofre et al., 2021).



Ilustración 7 Inspección visual

En un estudio de caso llevado a cabo por los autores en una vivienda unifamiliar de Passo Fundo, Brasil, construida en 1983, se realizó un mapeo que permitió documentar de manera organizada las manifestaciones patológicas encontradas en los elementos de concreto armado, como losas, vigas y columnas. Cada lesión fue fotografiada, descrita y georreferenciada en los planos de la edificación, indicando su ubicación exacta, dimensiones, tipo y estado evolutivo. Este registro gráfico y fotográfico se convirtió en la base para aplicar la metodología de análisis GUT (Gravedad, Urgencia y Tendencia), que se utiliza para priorizar la reparación de cada patología. En este contexto, el mapeo no se limita a una simple observación visual; implica sistematizar la información a través de diagramas, tablas y figuras. Los autores presentan un diagrama de flujo metodológico que describe la secuencia del trabajo: inspección visual → registro fotográfico → entrevista con los residentes → análisis técnico → aplicación del método GUT. Este flujo asegura que los datos recogidos durante la inspección se conviertan en evidencia técnica útil para evaluar el estado de la estructura y fundamentar las acciones correctivas (Onofre et al., 2021).

Durante la inspección, se identificaron varias patologías recurrentes: corrosión avanzada en



columnas, pérdida de sección y desprendimiento del recubrimiento en losas y fisuras con oxidación visible en vigas. Cada observación fue acompañada de fotografías y una ficha técnica que documentó las posibles causas (porosidad elevada, recubrimiento insuficiente, uso de materiales contaminados) y los síntomas visibles (fisuración,

Ilustración 8 Diagrama de procesos

desprendimiento, manchas, exposición del acero). Luego, la

información se tradujo a una matriz de evaluación donde se asignaron valores numéricos a los parámetros G (gravedad), U (urgencia) y T (tendencia), integrando así el análisis (Onofre et al., 2021).



Ilustración 9 Patologías estructurales 2



Ilustración 10 Patologías estructurales 3

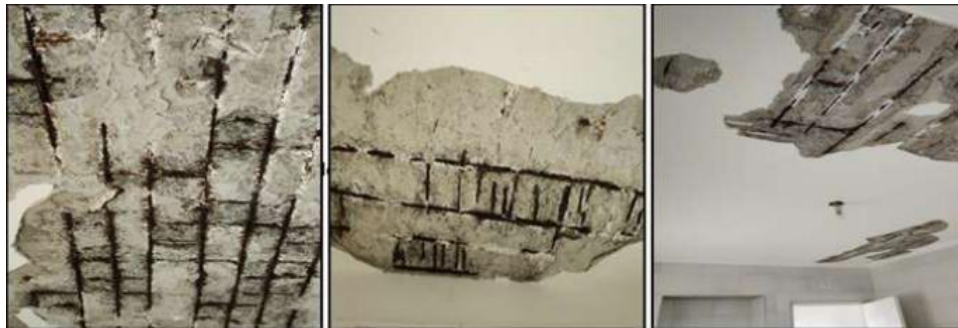


Ilustración 11 Patologías estructurales 4

Durante la inspección, se identificaron varias patologías recurrentes: corrosión avanzada en columnas, pérdida de sección y desprendimiento del recubrimiento en losas y fisuras con oxidación visible en vigas. Cada observación fue acompañada de fotografías y una ficha técnica que documentó las posibles causas (porosidad elevada, recubrimiento insuficiente, uso de materiales contaminados) y los síntomas visibles (fisuración, desprendimiento, manchas, exposición del acero). Luego, la información se tradujo a una matriz de evaluación donde se asignaron valores numéricos a los parámetros G (gravedad), U (urgencia) y T (tendencia), integrando así el análisis (Onofre et al., 2021).

El artículo también resalta la importancia de tener un registro fotográfico estandarizado. Esto significa que debemos mantener escalas de referencia, utilizar ángulos de captura coherentes y hacer anotaciones sobre las condiciones ambientales en el momento de la observación. Estos

detalles son esenciales para poder comparar el estado de la estructura en diferentes campañas de inspección, lo que ayuda a seguir la evolución de las lesiones a lo largo del tiempo. De esta manera, el mapeo no solo documenta el estado inicial, sino que se convierte en una herramienta de monitoreo continuo dentro del plan de mantenimiento estructural (Onofre et al., 2021).

Por último, Onofre et al. (2021) concluyen que el mapeo de lesiones, complementado con registros gráficos y la metodología GUT, es una práctica eficaz para evaluar la severidad de las patologías, priorizar las acciones de reparación y planificar estrategias de conservación en edificaciones de hormigón armado. Su aplicación sistemática permite una gestión técnica más precisa de la infraestructura, reduciendo los riesgos de fallas estructurales y optimizando los recursos destinados al mantenimiento (Onofre et al., 2021).

2.3 Procesos de degradación del hormigón armado.

2.3.1 Introducción general al deterioro del hormigón.

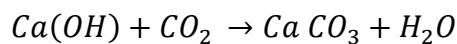
El concreto, gracias a su extraordinaria adaptabilidad, resistencia y longevidad, se ha establecido como el recurso más empleado en la ingeniería civil contemporánea. No obstante, a pesar de su apariencia sólida, no es un material que permanezca sin cambios. La exposición constante a elementos físicos, químicos y mecánicos puede provocar un desgaste progresivo que, si no se abordado de manera adecuada, podría acortar su duración y comprometer la seguridad estructural. De acuerdo con Dyer (2014), el análisis de la durabilidad del concreto ha adquirido una relevancia significativa en las últimas décadas, particularmente debido al envejecimiento de las infraestructuras y la tendencia global a prolongar la vida útil de las construcciones más allá de las previsiones iniciales. Este cambio ha puesto de manifiesto diversas fallas anticipadas y ha destacado la necesidad de entender los mecanismos que regulan la degradación del material (*Concrete Durability*, n.d.).

El deterioro del concreto reforzado puede ser descrito como una serie de transformaciones físicas, químicas y mecánicas que alteran las características originales del concreto o del acero de refuerzo, impactando su resistencia, impermeabilidad y coherencia interna. A pesar de que el concreto es un material que presenta estabilidad química y tiene la capacidad de resguardar al acero incrustado, su efectividad está estrechamente vinculada a la calidad de sus ingredientes, la formulación de la mezcla, el proceso de curado y las condiciones ambientales existentes. Dyer señala que el hormigón puede tener una durabilidad de siglos, sin embargo, su “inmadurez tecnológica” —en comparación con materiales que han sido utilizados durante milenios como la piedra o el ladrillo— ha resultado en la aparición de problemas de durabilidad inesperados en intervalos de servicio relativamente breves (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.2 Degradación química.

2.3.2.1 Carbonatación y penetración de dióxido de carbono.

La carbonatación constituye un proceso químico esencial involucrado en la descomposición del concreto reforzado, dado que modifica la alcalinidad de la sustancia y, en consecuencia, la defensa natural del acero de refuerzo. De acuerdo con Dyer (2014) (*Concrete Durability*, n.d.), esta interacción se produce cuando el dióxido de carbono (CO₂) del entorno penetra en los poros del concreto y se combina con los hidróxidos alcalinos del cemento, especialmente el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), resultando en la formación de carbonato de calcio (CaCO₃). Esta interacción se puede expresar de la siguiente manera:



Ecuación 2 Carbonatación y penetración de dióxido de carbono.

Durante esta etapa, el pH del concreto se reduce gradualmente, comenzando en un rango de 12 a 13 y descendiendo a niveles aproximados de 8 a 9. Este proceso provoca la eliminación de la película pasivante que resguarda al acero de la corrosión. Cuando el frente de carbonatación

alcanza las barras de refuerzo, el acero queda expuesto al oxígeno y a la humedad, dando inicio a la corrosión electroquímica del refuerzo (*Concrete Durability*, n.d.).

El dióxido de carbono penetra en el hormigón mediante un mecanismo denominado difusión gaseosa, el cual está determinado por factores como la porosidad, la permeabilidad y el nivel de humedad presente en los poros capilares. La tasa de carbonatación está influenciada primordialmente por:

- ✚ Proporción agua/cemento (w/c): una mayor proporción conduce a una permeabilidad aumentada, lo que permite una difusión más rápida del CO₂.
- ✚ Humedad relativa: la máxima velocidad de carbonatación se da entre un 50 % y un 70 % de humedad; por debajo de este intervalo, el CO₂ no se incorpora en el agua contenida en los poros, y por encima, la difusión se limita debido a la saturación.
- ✚ Tipo de cemento y concentración de Ca(OH)₂: los cementos que incorporan adiciones puzolánicas, tales como cenizas volantes, escoria o humo de sílice, presentan menos portlandita, lo que les confiere una mayor susceptibilidad a la carbonatación.
- ✚ Densidad y calidad del curado: un curado inadecuado produce una capa superficial porosa que facilita la entrada de gases.

Dyer (*Concrete Durability*, n.d.) indica que es posible calcular la profundidad de carbonatación (x) utilizando una relación de tipo parabólico.

$$x = k\sqrt{t}$$

Ecuación 3 Profundidad de carbonatación

Donde k es el coeficiente de carbonatación (dependiente del material y ambiente) y t es el tiempo de exposición. Esto implica que la penetración del CO₂ disminuye con el tiempo, pero nunca se detiene completamente.

La transformación del hidróxido de calcio en carbonato de calcio resulta en una disminución del volumen de la pasta de cemento, lo que conduce a la aparición de microfisuras y eleva la permeabilidad. Asimismo, los compuestos carbonatados frecuentemente se depositan en los poros, lo que endurece la superficie de manera localizada; sin embargo, esto compromete la resistencia de las capas internas del recubrimiento (*Concrete Durability*, n.d.). Con el progreso de la carbonatación, se pierde la alcalinidad crítica para mantener el acero en un estado pasivado. En presencia de humedad y oxígeno, se activa el proceso corrosivo del refuerzo, lo que resulta en la expansión y fisuración longitudinal del recubrimiento.

2.3.2.2 Ataque por cloruros (ambientes costeros).

En su obra titulada "Durabilidad del Concreto" (2013), Thomas Dyer dedica tiempo a examinar el ataque por cloruros en ambientes marinos, elucidando tanto los procesos de infiltración como las consecuencias estructurales. Dyer explica que los iones cloruro (Cl^-) logran ingresar al concreto a través de la difusión, la absorción capilar o el transporte convectivo, todos estos mecanismos impulsados por diferencias en concentración o humedad. Al alcanzar estos iones la superficie del acero de refuerzo, se produce la descomposición de la capa pasivadora de óxidos alcalinos que habitualmente resguarda al acero en un entorno de concreto alcalino. Esta descomposición origina la corrosión electroquímica, creando productos de oxidación (óxidos e hidróxidos de hierro) que pueden expandirse hasta cinco o seis veces en comparación con el volumen del acero original, lo cual provoca fisuras y delaminación del recubrimiento (*Concrete Durability*, n.d.).

Dyer también señala que en los entornos marinos, el riesgo no se limita solamente a la exposición directa al agua del mar. El aerosol salino transportado por el viento representa una fuente importante de cloruros para las construcciones adyacentes a la costa. Estos cloruros suelen

concentrarse en la zona de transición interfacial, que se ubica entre el cemento y el acero, la cual es generalmente más porosa, lo que acelera la pérdida de pasividad (*Concrete Durability*, n.d.).

Entre las medidas preventivas sugeridas por el autor se encuentran:

- ✚ Mantener una relación agua/cemento que no exceda 0.45.
- ✚ Incrementar el grosor del recubrimiento de hormigón sobre las armaduras.
- ✚ Emplear cementos que contengan adiciones minerales reactivas para disminuir la permeabilidad.
- ✚ Aplicar recubrimientos o inhibidores de corrosión en estructuras que están expuestas al rocío marino.

Por último, el texto concluye que la durabilidad frente a cloruros demanda un diseño integral que combine una mezcla de hormigón densa, un control adecuado del curado y prácticas de mantenimiento periódico para prevenir la acumulación de sales en la superficie (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.2.3 Ataque por sulfatos y reacciones expansivas.

De acuerdo con Dyer, el ataque sulfático se produce cuando los iones de sulfato que se encuentran en suelos, aguas subterráneas o agua salina interactúan con los productos resultantes de la hidratación del cemento, en particular el hidróxido de calcio y los aluminatos cálcicos. Esta interacción conduce a la generación de ettringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) y, en climas fríos o en entornos ricos en carbonatos, a la formación de thaumasita ($\text{CaSiO}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 15\text{H}_2\text{O}$). Ambas sustancias presentan un comportamiento expansivo, lo que puede resultar en la aparición de fisuras, la pérdida de adherencia y una degradación gradual del concreto (*Concrete Durability*, n.d.).

El documento expone tres mecanismos primordiales:

- ✚ Ataque sulfático convencional: Este se genera por la infiltración de sulfatos en la matriz del cemento, lo que provoca la formación de ettringita secundaria y yeso. Las expansiones internas incrementan la presión en los poros, ocasionando fisuras longitudinales y pérdida de cohesión.
- ✚ Ataque por sulfato de magnesio (MgSO_4): Este tipo de agresión es particularmente intenso, ya que el magnesio sustituye al calcio en el cemento, generando brucita (Mg(OH)_2) y silicato de magnesio hidratado. Estos productos desmineralizan la pasta y comprometen la integridad del C-S-H.
- ✚ Desarrollo de thaumasita: Este proceso se presenta a temperaturas bajas ($15\text{ }^\circ\text{C}$) y en la presencia simultánea de sulfatos, carbonatos y sílice reactiva. Afecta a concretos que son resistentes a los sulfatos, causando una pérdida total de cohesión.

Los elementos que influyen en la resistencia ante el ataque por sulfatos abarcan la concentración de sulfatos en el entorno, la temperatura, la permeabilidad del concreto y la composición del cemento. Dyer enfatiza que los cementos que contienen un bajo porcentaje de aluminato tricálcico (C_3A 5 %) o aquellos que incorporan adicciones puzolánicas (como ceniza volante o escoria granulada) tienden a ser más duraderos, ya que disminuyen la disponibilidad de aluminatos para la formación de ettringita expansiva (*Concrete Durability*, n.d.).

El autor también analiza la formación retardada de ettringita (DEF), un fenómeno que ocurre en estructuras curadas a temperaturas superiores a $65\text{ }^\circ\text{C}$. Durante este fenómeno, la ettringita se disuelve y posteriormente se reprecipita en los poros del concreto, lo que puede ocasionar fisuras expansivas que se manifiestan en una etapa posterior (*Concrete Durability*, n.d.).

Las reacciones expansivas inducidas por sulfatos, thaumasita y ettringita retardada son algunos de los principales factores que contribuyen a la degradación química del hormigón. Para mitigar estos efectos, Dyer sugiere:

- ✚ Seleccionar cementos que ofrezcan resistencia a los sulfatos (tipo V o SR).
- ✚ Restringir la relación agua/cemento a un máximo de 0,45.
- ✚ Incorporar materiales puzolánicos que ayuden a disminuir la porosidad y el contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- ✚ Asegurar un adecuado drenaje y aplicar recubrimientos protectores en zonas con alta concentración de sulfatos.

En conclusión, el ataque por sulfatos es una reacción química expansiva que depende de la permeabilidad, la composición del cemento y las condiciones ambientales, y representa una de las causas más significativas de la reducción de la durabilidad del concreto (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.2.4 Reacción álcali-agregado (RAA).

De acuerdo con la obra "Durabilidad del Hormigón" de Thomas Dyer (2013), la reacción álcali-agregado (RAA) se encuentra entre los mecanismos predominantes que generan la degradación química del hormigón reforzado. En el tercer capítulo, titulado "Reacciones Álcali-Agregado", se exploran subtemas como la Reacción Álcali-Sílice, la Reacción Álcali-Carbonato, la Reacción Álcali-Silicato, así como la expansión y fisuración ocasionadas por la RAA. También se analizan los factores que afectan estas reacciones, tales como el contenido de álcalis, la temperatura, la humedad, el tamaño de las partículas y la relación entre agua y cemento, en conjunto con las fuentes de álcalis, que comprenden el cemento Portland y otros materiales cementantes (*Concrete Durability*, n.d.).

En conclusión, Dyer detalla que la RAA es un proceso químico que se produce entre los hidróxidos alcalinos (NaOH , KOH) que se encuentran en los poros del cemento y ciertos componentes reactivos de los agregados, como la sílice amorfa o el carbonato de dolomita. Este fenómeno genera un gel expansivo alcalino-silicatado que, al absorber agua, aumenta su volumen

y genera presiones internas, lo que resulta en fisuras y una pérdida de cohesión en la matriz del cemento (*Concrete Durability*, n.d.).

El documento menciona tres tipos principales de reacciones:

- ✚ Reacción álcali-sílice (RAS), la más frecuente, que ocasiona fisuras en forma de red y desprendimientos en la superficie del hormigón.
- ✚ Reacción álcali-carbonato (RAC), menos común, que se relaciona con agregados de dolomita.
- ✚ Reacción álcali-silicato, que se vincula con filosilicatos en ciertos tipos de agregados metamórficos.

Adicionalmente, se señalan los factores que influyen en su desarrollo:

- ✚ El contenido total de álcalis en el cemento (un nivel superior al 0,6 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ incrementa el riesgo).
- ✚ La temperatura y la humedad ambiental, que facilitan la difusión de iones y la expansión.
- ✚ El tamaño y la mineralogía del agregado, dado que las partículas finas y porosas tienden a reaccionar con mayor rapidez.
- ✚ La relación entre agua y cemento y la permeabilidad, que impactan la movilidad de los iones. Se sugiere controlar la exposición a la humedad a través de un diseño y mantenimiento apropiados.

2.3.3 Degradación química.

3.3.3.1. Ciclos de hielo-deshielo y abrasión superficial.

El fenómeno relacionado con los ciclos de congelación y descongelación representa una de las causas primordiales del deterioro físico del hormigón en áreas con climas fríos. Dyer (2014) indica que este proceso se desencadena cuando el agua presente en los poros del hormigón se

transforma en hielo, lo que provoca un incremento de volumen que puede alcanzar hasta un 9 %. La repetida expansión del hielo genera presiones internas que superan la capacidad de tracción del material, provocando la formación de microfisuras que, con el tiempo, se extienden hacia la superficie. Estas fisuras facilitan la entrada de más agua, lo que intensifica el problema y da lugar a fenómenos visibles tales como desconchamientos, descomposición superficial, o D-cracking, que se define por el desprendimiento de la capa externa del hormigón. El deterioro se intensifica cuando el material se encuentra saturado y sufre variaciones rápidas de temperatura, particularmente en presencia de sales descongelantes que elevan la presión osmótica y química dentro de los poros (*Concrete Durability*, n.d.).

Dyer destaca que la capacidad del hormigón para resistir el frío depende de tres elementos fundamentales:

- ✚ Relación agua/cemento (w/c) —una proporción baja (0,45) disminuye la porosidad y la cantidad de agua libre susceptible de congelarse;
- ✚ Sistema de aireación —la incorporación de aditivos aireantes genera microburbujas que funcionan como válvulas de alivio, aliviando la presión interna del hielo;
- ✚ Durabilidad del árido —los agregados con alta capacidad de absorción o que contienen minerales propensos a las fracturas térmicas incrementan el daño por expansión.

Dyer destaca que la capacidad del hormigón para resistir el frío depende de tres elementos fundame En el caso de la abrasión superficial, el deterioro ocurre debido a la fricción o al impacto de partículas sólidas en movimiento, tales como vehículos, granos o agua que contiene sedimentos, que afectan la superficie del concreto. Esta pérdida progresiva de material altera tanto la textura como la protección de la superficie, facilitando la penetración de agentes nocivos. De acuerdo con Dyer (2014) y Helene (2003), la capacidad de resistencia a la abrasión está directamente vinculada

a la dureza de los agregados, a la resistencia a la compresión del concreto y a la densidad de su superficie. Los pavimentos en entornos industriales, los canales de transporte de agua y los suelos de talleres son particularmente susceptibles a este tipo de deterioro. Para mitigar estos efectos, se recomienda emplear concretos de alta resistencia, acabados endurecidos que contengan cuarzo o corindón, tratamientos superficiales aplicando selladores epóxicos o silanos, además de implementar un mantenimiento preventivo que minimice la exposición al hielo y al tráfico abrasivo (Concrete Durability, n.d.; Helene & Pereira, 2003).

3.3.3.2. Desgaste por erosión o cavitación.

El deterioro por erosión o cavitación representa una forma relevante de degradación física del concreto, particularmente en infraestructuras hidráulicas como presas, vertederos, canales, túneles y tuberías de alta velocidad. Según Dyer (2014), la erosión hidráulica se origina por el continuo contacto de partículas sólidas en suspensión, tales como arena, limo o grava, que son arrastradas por el agua en movimiento. Estas partículas impactan la superficie del concreto, ocasionando la remoción de finas capas de pasta de cemento y agregados, un fenómeno denominado picadura o pitting. Con el paso del tiempo, este proceso compromete la integridad de la sección resistente y expone el refuerzo de acero (Concrete Durability, n.d.).

Por otro lado, la cavitación ocurre cuando el flujo de agua alcanza velocidades tan elevadas que provoca alteraciones locales de presión, lo que resulta en la formación y el colapso de burbujas de vapor. El colapso de estas burbujas da lugar a micro-explosiones que pueden generar presiones de hasta 700 MPa en la superficie del concreto, provocando erosión localizada, microcráteres y desprendimientos. Las secciones más susceptibles son las curvas, compuertas, uniones y transiciones hidráulicas donde se generan turbulencias o cambios en la velocidad (Concrete Durability, n.d.).

Dyer (2014) señala que el deterioro ocasionado por erosión o cavitación depende de aspectos como la velocidad del flujo, la dureza de las partículas, la resistencia y textura del concreto, así como la existencia de imperfecciones en la superficie. Se considera que velocidades superiores a 12–15 m/s pueden provocar cavitación si la superficie no es completamente lisa. Las estrategias preventivas incluyen el empleo de concretos de alta densidad y baja porosidad, agregados duros como granito o basalto, cementos con bajo contenido de C_3A , y la implementación de recubrimientos protectores de poliuretano, epóxico o acero inoxidable en áreas críticas. También se recomiendan tratamientos de pulido hidráulico para suavizar rugosidades, así como el monitoreo regular de la velocidad del flujo (*Concrete Durability*, n.d.).

Los escritores subrayan que la cavitación trasciende su naturaleza como fenómeno físico; también constituye un desafío en el ámbito del diseño hidráulico. En consecuencia, es fundamental abordar este asunto desde la perspectiva de la geometría de la estructura, evitando cambios bruscos en las secciones o en las direcciones del flujo. Del mismo modo, es crucial llevar a cabo un mantenimiento periódico y reparar cualquier grieta de manera oportuna para prevenir un deterioro persistente (*Concrete Durability*, n.d.).

3.3.3.3. *Fatiga y vibraciones.*

El fenómeno de la fatiga en el concreto se vincula con la reiterada exposición a cargas cíclicas o dinámicas. Aunque estas cargas sean inferiores a la carga máxima que el material puede manejar, provocan la formación de microfisuras que se acumulan en la matriz de cemento y en la interfase entre el agregado y la pasta. Con cada ciclo, estas microfisuras se extienden gradualmente, provocando una reducción en la rigidez y resistencia del material. Dyer (2014) caracteriza este fenómeno como una “acumulación de daño subcrítico” que, tras miles o incluso millones de ciclos, puede resultar en la fractura del elemento (*Concrete Durability*, n.d.).

El comportamiento a la fatiga del concreto está determinado por diversos factores, tales como la amplitud y frecuencia de las cargas, la resistencia inicial del concreto, el nivel de confinamiento y la existencia de armaduras que facilitan la redistribución de los esfuerzos. En estructuras como pavimentos, puentes y torres, o en aquellas expuestas a vibraciones, la fatiga se presenta comúnmente como fisuras longitudinales o transversales en las zonas de flexión recurrente. Además, las vibraciones continuas, ya sean provocadas por maquinaria pesada, tráfico intenso o sismos frecuentes, pueden resultar en la pérdida de agregados finos, así como en una disminución de la adherencia con el acero y en resonancias locales en elementos delgados (*Concrete Durability*, n.d.).

Las investigaciones de Dyer (2014) y Helene (2003) indican que la vida útil a fatiga del concreto puede ser representada a través de una relación empírica (*Concrete Durability*, n.d.; Helene & Pereira, 2003).

$$\sigma_{max}/f_c = A - B \log(N)$$

Ecuación 4 Vida útil del concreto

La tensión máxima de cada ciclo se identifica como σ_{max} , mientras que f_c se refiere a la resistencia a la compresión del material. El total de ciclos hasta la aparición de la falla está representado por N , y A y B son parámetros que se determinan mediante ensayos experimentales.

Para optimizar la resistencia frente a la fatiga y las vibraciones, se recomienda:

- ✚ Emplear concretos de alta resistencia y con una relación agua/cemento baja,
- ✚ Asegurar una correcta compactación y confinamiento,
- ✚ Restringir las cargas cíclicas a un 60 % o menos de f_c ,
- ✚ Y en condiciones particulares, evaluar la posibilidad de utilizar hormigones reforzados con fibras o sistemas de amortiguación para estructuras.

En el caso de edificaciones sometidas a influencias dinámicas relevantes, como puentes o bases de turbinas, es fundamental realizar un análisis modal-espectral y considerar los efectos acumulativos de las vibraciones en la evaluación de la durabilidad y la integridad estructural (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.4 Daños mecánicos: sobrecargas, impactos, retracción y asentamientos diferenciales.

El daño mecánico en el hormigón armado se refiere a los procesos de degradación que ocurren por la acción directa de esfuerzos excesivos o repetitivos que superan la capacidad de resistencia o deformación del material. Según Dyer (2014), estos mecanismos se diferencian de los ataques químicos o físicos porque implican la transferencia de energía mecánica —ya sea estática, dinámica o cíclica— que puede provocar fisuras, pérdida de adherencia, deformaciones plásticas o fallas locales en los elementos estructurales (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.4.1 Sobrecargas y fatiga

Las sobrecargas ocurren cuando las fuerzas aplicadas, que pueden ser permanentes, temporales, accidentales o sísmicas, exceden las combinaciones de cargas para las cuales el componente fue diseñado. De acuerdo con Dyer (2014), este tipo de perjuicio genera una fisuración progresiva en el hormigón y microfisuras internas que pueden permanecer selladas durante ciertas fases del ciclo de carga. No obstante, con el transcurso del tiempo y debido a las repetidas aplicaciones, estas fisuras tienen el potencial de evolucionar hacia daños permanentes, lo que resulta en una disminución de la rigidez. La fatiga del concreto se presenta ante cargas cíclicas o vibraciones repetitivas, una situación habitual en estructuras como puentes, pavimentos o cimientos que están sometidos a tráfico o a uso de maquinaria. Las consecuencias de esta fatiga incluyen una reducción del módulo elástico, la formación de fisuras en dirección de tracción y una merma en el límite de resistencia tanto a flexión como a corte. Aunque el hormigón posee un cierto

nivel de capacidad de amortiguamiento interno, la continua aplicación de esfuerzos puede propiciar la acumulación de daños a nivel microscópico, lo que puede conducir eventualmente a un colapso por fatiga (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.4.2 Impactos y cargas dinámicas

Los efectos y las fuerzas impactantes, tales como explosiones, caídas de objetos, terremotos o el tráfico intenso, representan una fuente significativa de deterioro mecánico. En tales circunstancias, el concreto se ve expuesto a tensiones elevadas que ocurren de manera instantánea y por un tiempo breve, lo que puede resultar en un comportamiento frágil si no se cuenta con la suficiente capacidad para absorber energía o un adecuado confinamiento. Dyer señala que estos impactos pueden ocasionar la formación de conos de fractura, desprendimientos superficiales, pulverización localizada y una disminución en la adherencia del acero de refuerzo. En estructuras delgadas, estas acciones producen vibraciones resonantes que acentúan las fisuras preexistentes, mientras que en componentes más pesados pueden dar lugar a microfisuras internas que son difíciles de identificar. La rapidez de la carga influye directamente en la naturaleza del daño: una carga estática que se aplica de manera lenta tiende a provocar fisuras controladas, mientras que un impacto brusco puede conducir a una fractura explosiva del concreto. Por lo tanto, los diseños actuales, fundamentados en normas como ACI 318 o Eurocódigo 2, incorporan factores dinámicos de incremento de carga y la utilización de concretos de alta tenacidad o refuerzos fibrosos para mitigar estos efectos (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.4.3 Retracción: origen y efectos estructurales

La retracción es uno de los problemas más comunes que enfrenta el hormigón, y se puede clasificar en varias categorías: plástica, por secado, autógena y térmica (*Concrete Durability*, n.d.).

La retracción plástica ocurre en las primeras horas después de verter el hormigón, cuando la evaporación del agua en la superficie es mayor que la exudación; esto puede causar fisuras en la superficie de losas y pavimentos.

La retracción por secado se presenta en el concreto que ya ha endurecido, debido a la pérdida gradual de humedad, lo que genera tensiones de tracción y fisuras que pueden aparecer en forma de líneas paralelas o en un patrón de mapa (crazing).

La retracción autógena se produce por el consumo interno de agua durante el proceso de hidratación, especialmente en hormigones con una baja relación agua/cemento (< 0.40), y puede dar lugar a fisuras internas que no son visibles.

Por último, la retracción térmica se origina por los cambios de temperatura durante el fraguado o por variaciones en el ambiente, lo que puede resultar en fisuras longitudinales o diagonales. Todas estas formas de retracción son daños mecánicos que se desarrollan con el tiempo, ya que generan microdeformaciones acumuladas que alteran el equilibrio interno del concreto, lo que puede llevar a problemas como el despegue entre la pasta y el agregado, pérdida de estanqueidad y una disminución en la rigidez general del elemento (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.4.4 Asientos diferenciales

Los asentamientos diferenciales, así como los movimientos irregulares en la base, representan una de las causas más significativas de deterioro en las estructuras. Esto ocurre porque generan tensiones que no son compatibles con el diseño inicial. Cuando una sección de la estructura se desplaza verticalmente en relación a otra, pueden surgir fisuras en forma diagonal en las paredes, desalineaciones en vigas y columnas, e incluso, en situaciones extremas, un colapso parcial debido a torsión o pandeo. El hormigón, considerado un material quebradizo con una capacidad de deformación restringida, no puede adaptarse fácilmente a estos desplazamientos. Dyer (2014) indica que los asentamientos pueden originarse por factores geotécnicos, tales como

el recalce de suelos blandos, la consolidación desigual o la licuación, así como por causas estructurales, como deformaciones no previstas en componentes portantes o juntas rígidas defectuosas. Una estrategia para minimizar estos inconvenientes es gestionar los gradientes de rigidez del terreno y asegurar que las cargas se distribuyan de manera equilibrada a través de cimientos o losas adecuadamente dimensionadas. Además, implementar juntas de expansión, refuerzos continuos y realizar un monitoreo de las deformaciones puede contribuir a mitigar los efectos diferenciales en los elementos de hormigón armado (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.5. Efectos del ambiente marino y la contaminación atmosférica.

El concreto reforzado es un material de gran resistencia, no obstante, sufre un deterioro acelerado cuando está expuesto a entornos marinos y urbanos contaminados. En estas circunstancias, los procesos químicos, físicos y electroquímicos afectan tanto la matriz del cemento como el acero de refuerzo. Los mecanismos de degradación en estos ambientes están principalmente asociados con la penetración de cloruros, la carbonatación y la acción de contaminantes ácidos presentes en la atmósfera (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.5.1 Efectos del ambiente marino.

El concreto en zonas costeras enfrenta condiciones de alta humedad relativa, aerosoles salinos y una presencia continua de cloruros (Cl^-) provenientes del agua de mar. Estos iones pueden ser transportados hacia el acero de refuerzo a través de procesos como la difusión, la absorción capilar o el flujo convectivo que ocurren en los poros del concreto. De acuerdo con Dyer (2014), el rango crítico de cloruros que puede desencadenar la corrosión del acero oscila entre 0.2% y 0.4% en relación con la masa de cemento, lo cual depende tanto del pH del concreto como de la calidad del recubrimiento aplicado (*Concrete Durability*, n.d.).

Tan pronto como los cloruros atraviesan la capa pasiva que protege el acero, se inicia un proceso de corrosión electroquímica. Esto da lugar a la formación de óxidos y a una expansión

interna que provoca grietas longitudinales, desprendimiento del recubrimiento y pérdida del área del acero. El texto menciona tres áreas de exposición marina, cada una caracterizada por distintos grados de agresividad:

- ✚ Zona sumergida: aquí, la penetración de cloruros es más gradual debido a la constante saturación, aunque los gradientes de concentración pueden facilitar la migración iónica.
- ✚ Zona de salpicaduras: esta es la zona más crítica, ya que las condiciones cambian frecuentemente entre húmedas y secas, lo que permite la entrada de oxígeno y favorece la formación de celdas galvánicas.
- ✚ Zona de rocío: en esta área, el aerosol marino transporta sales que se cristalizan en la superficie del concreto; estas sales se disuelven con la humedad ambiental, lo que da lugar a múltiples ataques sucesivos.

El agua de mar contiene iones de sulfato (SO_4^{2-}) y magnesio (Mg^{2+}), lo que puede provocar un ataque por sulfatos y la descalcificación del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Esto debilita la estructura del cemento, disminuyendo su resistencia mecánica. El ataque por sulfato de magnesio es especialmente perjudicial, ya que no solo genera etringita expansiva, sino que también convierte los hidratos de silicato de calcio (CSH) en brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) y silicatos que no contribuyen al cemento, lo que resulta en una pérdida de cohesión y en la descomposición de la superficie (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.5.2 Contaminación atmosférica y su impacto.

En contextos urbanos e industriales, el concreto se expone a diversos contaminantes atmosféricos, como el dióxido de carbono (CO_2), los óxidos de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos agentes químicos interactúan con los componentes alcalinos del concreto, provocando ataques ácidos y procesos de carbonatación (*Concrete Durability*, n.d.).

El CO₂ presente en el aire se infiltra a través de los poros del concreto y reacciona con el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) para formar carbonato de calcio (CaCO₃). Este proceso, denominado carbonatación, disminuye el pH del concreto desde un rango de 12-13 hasta aproximadamente 9, lo que causa la erosión de la capa pasiva del acero y hace que el refuerzo sea vulnerable a la oxidación (*Concrete Durability*, n.d.).

Los contaminantes ácidos, como el dióxido de azufre, reaccionan con la humedad ambiental para producir ácido sulfúrico (H₂SO₄) o ácido sulfuroso (H₂SO₃), que se combinan con la pasta cementosa formando sulfatos de calcio (yeso) y etringita. Esta reacción provoca expansión y contribuye al agrietamiento y desprendimiento en la superficie del material.

Dyer señala que las partículas contaminantes suspendidas, generadas por la combustión de combustibles fósiles, actúan como núcleos de condensación para el CO₂ y SO₂. Esto incrementa la acidez local en el agua de lluvia o rocío, acelerando así los procesos de carbonatación y lixiviación (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.5.3 Interacción sinérgica entre ambiente marino y contaminación

Cuando se establece una estructura en una zona costera urbana, se intensifica el efecto de ambos factores. Los cloruros presentes en el ambiente marino y los ácidos del aire interactúan: los cloruros disminuyen la alcalinidad y favorecen la corrosión, mientras que los ácidos reducen el pH superficial del concreto, lo que acelera la degradación de la capa pasiva (*Concrete Durability*, n.d.).

Según Dyer esta combinación de efectos genera una sinergia de deterioro que es especialmente agresiva en infraestructuras portuarias, puentes cercanos al mar y edificaciones ubicadas en áreas con alta contaminación. Por ello, el mantenimiento de estas estructuras debe incluir la aplicación de recubrimientos protectores hidrofóbicos o polímeros epóxicos, así como el

uso de cementos resistentes a sulfatos y proporciones bajas de agua/cemento (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.5.4 Medidas preventivas

El autor propone varios métodos para asegurar la longevidad de las estructuras ante estas condiciones: (a) incrementar el espesor del recubrimiento de acero (≥ 50 mm en zonas marinas). Emplear cemento con aditivos puzolánicos, como escoria, humo de sílice y cenizas volantes, para disminuir la permeabilidad. Instalar aditivos que inhiban la corrosión, como nitrito de calcio, o utilizar aceros galvanizados o inoxidable. Aplicar recubrimientos impermeables o selladores a base de silano en la superficie. Además, es importante llevar a cabo un monitoreo regular del potencial de corrosión y realizar un mantenimiento programado conforme a las recomendaciones de la Concrete Society y la norma BS 7543:2003 relacionada con la durabilidad (*Concrete Durability*, n.d.).

2.3.6. Modelos de predicción de vida útil (referencia: ACI 201.1R y ACI 562).

La evaluación de la durabilidad de una estructura de concreto reforzado se basa en el tiempo durante el cual los componentes funcionan correctamente antes de requerir mantenimiento o reparación. la inspección visual y la caracterización del deterioro, mientras que el segundo se ocupa de la gestión de rehabilitación y la extensión de la vida útil. (ACI Committee 562, 2019; American Concrete Institute, 2008).

2.3.6.1 Enfoque de la ACI 201.1R-08

vida útil inicia con una inspección visual minuciosa, cuyo propósito es determinar el estado de las superficies, identificar signos de deterioro y considerar las influencias ambientales que afectan la duración del servicio (American Concrete Institute, 2008). Los procedimientos a implementar comprenden:

- ✚ Observaciones sobre patologías visibles, tales como grietas, eflorescencias, descamación y corrosión observable en el acero.
- ✚ Evaluación de la gravedad y evolución de cada tipo de daño.
- ✚ Correlación con factores de exposición: humedad, cloruros, sulfatos, carbonatación y congelación.

La comprensión de la frecuencia del deterioro y de los mecanismos involucrados facilita la estimación de la tasa de degradación y, en consecuencia, permite proyectar el tiempo restante de servicio. A partir de inspecciones repetidas y pruebas no destructivas (como ultrasonido, esclerometría y potencial de corrosión), sean empleados para calcular el índice de condición del concreto (CI), el cual funciona como un parámetro fundamental en los modelos empíricos destinados a prever la vida útil del elemento. (American Concrete Institute, 2008).

2.3.6.2 Enfoque de la ACI 562-19

El código ACI 562-19 define un marco para la evaluación y rehabilitación que asegura la continuidad operativa de las estructuras existentes (ACI Committee 562, 2019). Sus principios esenciales incluyen:

- ✚ Vida útil restante (RSL) mediante inspecciones, análisis de materiales y modelos que evalúan la penetración de agentes corrosivos como cloruros o CO₂
- ✚ Evaluación del rendimiento futuro, o que implica comparar la tasa de deterioro observada con los límites de servicio y resistencia estipulados en ACI 318.
- ✚ Para el modelado, se recomienda utilizar modelos basados en difusión , como los derivados de las leyes de Fick , modelos de carbonatación progresiva o modelos de probabilidad de corrosión , dependiendo del nivel de exposición .

- ✚ Curvas de rendimiento, donde el estándar sugiere que se estime la vida útil proyectada (t_{serv}) como:

$$T_{serv} = T_{ini} + T_{prop}$$

Ecuación 5 Curvas de rendimiento

Donde T_{ini} representa el intervalo de tiempo hasta el inicio de la corrosión, y T_{prop} indica el período de propagación requerido para alcanzar un estado límite de servicio o resistencia. la gestión del ciclo de vida, como el costo de reparación, la sostenibilidad, la seguridad y la supervisión continua. Se establece que cada intervención debe documentar el nuevo horizonte de durabilidad prevista, especificando las condiciones de mantenimiento requeridas para garantizar su cumplimiento (ACI Committee 562, 2019).

2.3.6.3 Relacion entre ambas normas.

ACI 201.1R-08 establece la base necesaria para el diagnóstico y la inspección, que alimenta los modelos de vida útil. Por su parte, ACI 562-19 se apoya en esta información para anticipar y gestionar la duración del servicio a través de metodologías analíticas y criterios de reparación. Ambos documentos conforman un ciclo integral de gestión técnica del concreto:

- ✚ Evaluación (ACI 201.1R)
- ✚ Diagnóstico y modelado (ACI 562)
- ✚ Reparación y validación de la extensión de la vida útil.

2.3.7. Estrategias de durabilidad propuestas por Helene (2003): diagnóstico preventivo, reparación oportuna y mantenimiento planificado.

En el Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón y en las Conferencias de la AIE (2004), el Profesor Paulo Helene (2003) sostiene que la durabilidad de las estructuras debe considerarse como un proceso esencial y continuo, que está intrínsecamente ligado a la construcción desde la fase de planificación hasta el final de su vida útil. Su enfoque presenta tres

pilares clave: diagnóstico preventivo, reparación oportuna y mantenimiento planificado, los cuales constituyen el ciclo técnico relacionado con la durabilidad estructural (Helene & Pereira, 2003).

Helene define el diagnóstico preventivo como un proceso sistemático de evaluación y pronóstico del estado estructural, diseñado para identificar cambios patológicos de manera temprana, antes de que estos puedan amenazar la seguridad o comprometer el funcionamiento eficiente de las instalaciones. Este enfoque se compone de tres etapas interrelacionadas (Helene & Pereira, 2003).

- ✚ Inspección: Se llevarán a cabo observaciones, auscultaciones y pruebas no destructivas para identificar grietas, corrosión, delaminaciones, pérdida de recubrimiento u otros tipos de daños en la estructura.
- ✚ Diagnóstico: Consiste en determinar la causa raíz del daño, que puede ser física, química, mecánica o ambiental.
- ✚ Pronóstico: En esta fase se estima la tasa de deterioro y el tiempo remanente antes de alcanzar un estado crítico.

Según Helene (2003), el diagnóstico preventivo funciona como una forma de profilaxis estructural; permite anticipar fallos, disminuir costos asociados con reparaciones y prolongar la vida útil de las obras. Para facilitar la detección temprana de patologías, es fundamental utilizar técnicas como el mapeo de lesiones, el análisis de carbonatación y cloruros, así como el monitoreo del potencial de corrosión (Helene & Pereira, 2003).

(Helene & Pereira, 2003), sostiene que una reparación estructural no debe limitarse a corregir el daño existente, sino que debe ser un enfoque terapéutico meticulosamente planificado, destinado a restaurar la capacidad de carga y proteger el sistema contra futuros agentes de deterioro. Tal como ella lo define, rehabilitar implica “reparar + reforzar + proteger”, abarcando tanto aspectos curativos como preventivos. El proceso de reparación adecuada incluye:

- ✚ Selección de la técnica adecuada: Esto depende del tipo de daño presente e involucra métodos como inyección de grietas, aplicación de morteros poliméricos, reemplazo de concreto deteriorado, protección catódica y realcalinización electroquímica.
- ✚ Compatibilidad de materiales: Es esencial que los materiales utilizados posean propiedades físicas y químicas compatibles con el sustrato original, tales como coeficiente térmico, módulo elástico y permeabilidad.
- ✚ Control de calidad en el rendimiento: Todas las intervenciones deben someterse a pruebas rigurosas que evalúen la adhesión, resistencia y permeabilidad residual.

El Manual REHABILITAR subraya que la reparación debe realizarse antes de que el daño progrese a una fase activa de propagación, ya que esto puede incrementar exponencialmente los costos asociados a la intervención. Los estándares para los procedimientos aplicables a diversos tipos de daños se detallan en los Capítulos 6 al 9 (Helene & Pereira, 2003).

“Rehabilitar significa restituir el desempeño estructural mediante la integración de las acciones de reparación, refuerzo y protección” (Helene & Pereira, 2003). La tercera estrategia consiste en implementar un plan de mantenimiento periódico basado en el monitoreo continuo del desempeño estructural. Helene sostiene que la durabilidad no depende únicamente de la calidad de los materiales o del diseño, sino de la gestión del uso y conservación a lo largo de la vida de la estructura (Helene & Pereira, 2003).

El mantenimiento planificado se organiza en tres niveles:

- ✚ Preventivo: inspecciones programadas, limpieza, sellado de juntas y aplicación de recubrimientos protectores.
- ✚ Predictivo: uso de sensores o mediciones periódicas (potencial de corrosión, resistividad, deformaciones) para anticipar fallas.
- ✚ Correctivo: reparación localizada cuando los indicadores muestran deterioro activo.

Helene (2003) resalta que el mantenimiento debe incorporarse desde la fase de diseño, definiendo una vida útil nominal y una estrategia de inspección acorde con la agresividad ambiental (por ejemplo, zonas costeras o industriales). Además, recomienda que cada estructura cuente con un manual de mantenimiento, donde se establezcan los procedimientos, frecuencias y responsabilidades de conservación (Helene & Pereira, 2003).

2.4 Metodologías de diagnóstico estructural.

El dictamen estructural es un enfoque detallado y especializado que permite identificar, analizar y evaluar la condición actual de un edificio, con el objetivo de determinar las razones del deterioro, evaluar su estabilidad y utilidad, y proponer reparaciones adecuadas o mejoras. Este proceso se realiza en tres etapas clave: reconocimiento, prueba y lectura.

En la etapa de reconocimiento, se comienza con una revisión visual o un examen inicial, que consiste en verificar la información previa del edificio, documentar los daños visibles como grietas, roturas, óxido o deformidades, y crear un registro gráfico y fotográfico que ayude a formular hipótesis sobre los motivos del deterioro; posteriormente, se lleva a cabo una inspección técnica más detallada que incluye mediciones, evaluación de grietas y la realización de pruebas tanto en el lugar como en el laboratorio (Basset Salom, 2023).

Las pruebas estructurales amplían la observación mediante datos cuantificables sobre las propiedades del hormigón, utilizando técnicas como ultrasonido, esclerometría, paquimetría, corrosimetría, pruebas de carbonatación o extracción de núcleos, con el propósito de evaluar la resistencia, uniformidad y grado de daño del material. Luego, en la fase de lectura, se analizan y fusionan los resultados del reconocimiento y la prueba para determinar las causas de los daños, su evolución y la capacidad de resistencia restante de la estructura, utilizando, si es necesario, modelos de cálculo que representen su funcionamiento real (Basset Salom, 2023).

Finalmente, el proceso concluye con la elaboración de un informe técnico que resume los antecedentes, las pruebas realizadas, los resultados, las causas identificadas y las recomendaciones de intervención, estableciendo de este modo un sistema de evaluación integral que combina observación, experimentación y análisis para garantizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de las edificaciones existentes (Basset Salom, 2023).

2.4.1 Concepto y etapas del diagnóstico estructural (inspección, ensayo, interpretación).

El dictamen estructural es un enfoque detallado y especializado que permite identificar, analizar y evaluar la condición actual de un edificio, con el objetivo de determinar las razones del deterioro, evaluar su estabilidad y utilidad, y proponer reparaciones adecuadas o mejoras. Este proceso se realiza en tres etapas clave: reconocimiento, prueba y lectura (ACI Committee 364, 2019; American Concrete Institute, 2008).

En la etapa de reconocimiento, se comienza con una revisión visual o un examen inicial, que consiste en verificar la información previa del edificio, documentar los daños visibles como grietas, roturas, óxido o deformidades, y crear un registro gráfico y fotográfico que ayude a formular hipótesis sobre los motivos del deterioro; posteriormente, se lleva a cabo una inspección técnica más detallada que incluye mediciones, evaluación de grietas y la realización de pruebas tanto en el lugar como en el laboratorio (ACI Committee 364, 2019; American Concrete Institute, 2008).

Las pruebas estructurales amplían la observación mediante datos cuantificables sobre las propiedades del hormigón, utilizando técnicas como ultrasonido, esclerometría, paquimetría, corrosimetría, pruebas de carbonatación o extracción de núcleos, con el propósito de evaluar la resistencia, uniformidad y grado de daño del material. Luego, en la fase de lectura, se analizan y fusionan los resultados del reconocimiento y la prueba para determinar las causas de los daños, su evolución y la capacidad de resistencia restante de la estructura, utilizando, si es necesario,

modelos de cálculo que representen su funcionamiento real (ACI Committee 364, 2019; American Concrete Institute, 2008).

Finalmente, el proceso concluye con la elaboración de un informe técnico que resume los antecedentes, las pruebas realizadas, los resultados, las causas identificadas y las recomendaciones de intervención, estableciendo de este modo un sistema de evaluación integral que combina observación, experimentación y análisis para garantizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de las edificaciones existentes (ACI Committee 364, 2019; American Concrete Institute, 2008).

2.4.2. Metodología ACI 201.1R: levantamiento de información, descripción de daños y determinación de causas.

Según el ACI (2008), cualquier evaluación debe comenzar con una buena recopilación de datos: revisar los antecedentes del proyecto, la antigüedad de la estructura, su historial de mantenimiento, las condiciones del entorno y las cargas a las que ha estado expuesta, además de los planos disponibles. También se debe hacer una observación cuidadosa de los elementos estructurales visibles, anotando en bocetos, fotografías y registros los daños que se encuentren, sin olvidar las condiciones ambientales y de uso en el momento de la evaluación. Lo ideal, según la guía, es realizar estas revisiones periódicamente para comprobar el comportamiento del hormigón y detectar cualquier señal de deterioro a tiempo, lo que permitirá planificar reparaciones antes de que sea demasiado tarde (American Concrete Institute, 2008).

En el segundo capítulo de la norma se detalla cómo se deben describir los daños, definiendo y categorizando los distintos tipos de fallos y problemas que pueden surgir en las estructuras de hormigón. Utilizando un lenguaje técnico y acompañándolo de imágenes ilustrativas, la norma señala defectos como grietas largas, diagonales, en forma de mapa, microfisuras, desprendimientos, eflorescencias, cambios de color, ampollas y daños generados por corrosión o reacciones químicas. Para cada tipo de daño, se proporcionan pautas sobre su forma, tamaño, gravedad y posibles causas, con el objetivo de que todos documentemos los hallazgos de manera

uniforme. El ACI 201. 1R enfatiza que la descripción debe basarse en observaciones directas, evitando interpretaciones subjetivas y utilizando un lenguaje técnico que permita comparar los resultados entre diferentes profesionales o revisiones (American Concrete Institute, 2008).

A continuación, la metodología se enfoca en identificar las causas, analizando los factores ambientales, físicos y de construcción que podrían haber contribuido a los daños observados. El inspector debe asociar lo que se evidencia en la superficie con aspectos como la exposición a elementos dañinos, cambios de temperatura, fallos en el diseño o cargas excesivas, utilizando sus conocimientos técnicos para formular hipótesis razonables. La norma sugiere complementar esta fase con pruebas no destructivas o destructivas, como la medición de grietas, esclerometría, ultrasonido, extracciones de muestras o análisis químicos, si las observaciones no son suficientes para determinar la gravedad del daño (American Concrete Institute, 2008).

Para finalizar, la guía establece que toda revisión debe concluir con un informe técnico bien estructurado, que contenga la información del edificio, una descripción detallada de los daños observados, clasificados por gravedad y tamaño, las posibles causas, recomendaciones para pruebas adicionales y sugerencias para el mantenimiento o las reparaciones. Este informe es un registro oficial del estado de la estructura y sirve como base para monitorearla en el futuro, compararla y tomar decisiones al respecto (American Concrete Institute, 2008).

2.4.2.1 Inspección visual y clasificación de lesiones IMÁGENES

De acuerdo con el documento TCS-17 (OIEA, 2002), la revisión visual es el primer paso importante en cualquier evaluación de la estructura. Ayuda a analizar la condición del hormigón y a identificar señales de problemas antes de realizar pruebas con herramientas. Es esencial seguir un proceso específico que incluya cada componente de la estructura como vigas, columnas, losas, cimientos y paredes y documentar los daños observados mediante fotos, dibujos o diagramas de fisuras. También se recomienda anotar las condiciones del entorno, la ubicación de los daños y las

posibles causas, ya que esta revisión ayuda a determinar qué pruebas realizar y en qué lugares (American Concrete Institute, 2008).

En esta fase, los daños deben categorizarse según su origen: por tensión (fisuras, deformaciones), por reacciones químicas (manchas, oxidación, carbonatación) o por factores físicos (desgaste, golpes). Además, se debe asignar un grado de severidad bajo, medio o alto en función de cómo y cuánto afecta el daño. Esta clasificación facilita la priorización de riesgos para la estructura y ayuda a decidir si son necesarios más estudios o reparaciones preventivas (American Concrete Institute, 2008).

2.4.3. Ensayos No Destructivos (END) según ACI 228.2R:

2.4.3.1 Esclerometría (rebote superficial)

La técnica del esclerómetro, o prueba del martillo de rebote, se fundamenta en la dureza del hormigón en su superficie y en su resistencia al aplastamiento. Según el ACI 228. 2R, el objetivo es observar cómo rebota un objeto de metal al impactar contra el hormigón, impulsado por un resorte ajustado. El resultado, conocido como número de rebote (R), se emplea para estimar la resistencia de este material a la compresión (ACI Committee 228, 2013).

De acuerdo con el informe, este método es útil para verificar la uniformidad del hormigón en el sitio, identificar áreas que no se han secado adecuadamente o que están separándose, y para comparar la fuerza de elementos similares. Sin embargo, el ACI 228. 2R señala que el rebote puede variar debido a la humedad externa, el tipo de agregado, la presencia de carbonatación y la textura del hormigón. Por ello, es necesario calibrar los resultados con pruebas de compresión realizadas en muestras del mismo sitio. Su ventaja es que es un proceso rápido, económico y sencillo, aunque no es tan efectivo para determinar la resistencia precisa si no se puede comparar con pruebas realizadas en el mismo lugar (ACI Committee 228, 2013).

2.4.3.2 Ultrasonido (velocidad de propagación)

El método ultrasónico descrito en el ACI 228. 2R implica medir la velocidad de las ondas de compresión (ondas P) en el concreto. Se presume que una mayor velocidad indica un material más denso y homogéneo. Para llevar a cabo esta medición, se utilizan dispositivos (transductores) que se colocan en la superficie: uno emite la señal y el otro la capta, y se evalúa el tiempo que tarda la onda en recorrer esa distancia (ACI Committee 228, 2013).

De acuerdo con el informe, este procedimiento permite identificar si el material es consistente, si presenta grietas, vacíos o áreas débiles, y también se puede estimar cuán elástico es el material. El ACI 228. 2R especifica que la medición se puede realizar de frente, en ángulo o lateralmente, según el acceso al material. Sin embargo, la norma advierte que la humedad y la temperatura pueden afectar los resultados, y que los dispositivos deben estar firmemente adheridos a la superficie del concreto. Usar este método junto con la esclerometría mejora el cálculo de la resistencia del hormigón, algo que el comité 228 recomienda para las evaluaciones en el lugar de construcción (ACI Committee 228, 2013).

2.4.3.3 Pachometría (detección de armaduras).

La prueba de pachometría, también conocida como la prueba de Covermeter, se clasifica dentro de las técnicas magnéticas y eléctricas que se describen en la sección 3. 5 del ACI 228. 2R. Este método tiene como objetivo localizar la ubicación y la profundidad de las varillas de acero de refuerzo, medir el grosor del recubrimiento de concreto y, con dispositivos más avanzados, estimar el diámetro de las varillas (ACI Committee 228, 2013).

Su principio se basa en cómo varía el campo electromagnético cuando una sonda inductiva se aproxima a un metal ferromagnético, en este caso el acero. Según el ACI 228. 2R, los sensores, después de ser calibrados, registran cambios en la permeabilidad magnética en su entorno, lo que genera una lectura que ayuda a identificar la presencia del refuerzo. Este método es no invasivo y

resulta muy útil para planificar perforaciones o pruebas destructivas, evitando daños en las armaduras. No obstante, el documento señala que su exactitud disminuye si el recubrimiento excede los 100 mm, si las varillas están muy cerca unas de otras o si el concreto está demasiado húmedo o es muy conductor de electricidad (ACI Committee 228, 2013).

2.4.3.4 Potencial de corrosión (mapa de corrosión)

El procedimiento para medir el potencial en media celda se detalla en el manual ACI 228. 2R. Este documento incluye diferentes técnicas eléctricas. Se emplea este método para verificar si el acero de refuerzo está sufriendo corrosión. Esto se refiere al acero que está encerrado en el concreto (ACI Committee 228, 2013).

La idea principal es evaluar una diferencia de voltaje. Esta diferencia se determina entre el acero de refuerzo y un electrodo que actúa como referencia. Se utiliza un electrodo de cobre con sulfato de cobre, o uno de plata combinado con cloruro de plata. Este electrodo se coloca sobre la superficie del hormigón. Los resultados obtenidos se comparan con límites establecidos. Estos límites están definidos en normas como la ASTM C876. Si la lectura de voltaje es inferior a -350 mV, la probabilidad de corrosión activa supera el noventa por ciento. Si es superior a -200 mV, la probabilidad es mínima (ACI Committee 228, 2013).

El ACI 228. 2R recomienda representar estos resultados en un mapa de voltajes. Esto facilita la identificación de las áreas donde el acero es más reactivo eléctricamente. Este ensayo no indica la velocidad a la que ocurre la corrosión. Sin embargo, ayuda a localizar los lugares de riesgo. De esta manera, se pueden planificar mejor las inspecciones o las estrategias de protección. El documento enfatiza la importancia de controlar la temperatura y la humedad. También es crucial la resistencia del concreto durante la recopilación de datos. Estos factores influyen en la precisión de los resultados obtenidos (ACI Committee 228, 2013).

2.4.4. Ensayos destructivos y semi-destructivos

Obtención de testigos: en esencia, esto consiste en extraer cilindros de concreto utilizando taladros con puntas de diamante. Estos cilindros se envían al laboratorio para evaluar su resistencia a la compresión, densidad, homogeneidad y posibles defectos internos como huecos o fisuras. El manual indica que los testigos deben ser tomados de áreas estratégicas, evitando debilitar en exceso la estructura, y sellando los agujeros con un mortero especial de epoxi (ACI Committee 228, 2013).

Tests de compresión: son las pruebas más confiables para determinar la verdadera fortaleza del concreto una vez que ha fraguado. Se realizan con los cilindros obtenidos o con muestras y permiten comparar los resultados con métodos más veloces, como el esclerómetro o las pruebas de ultrasonido (ACI Committee 228, 2013).

Análisis químicos de carbonatación y cloruros: el documento TCS-17 detalla el uso de fenolftaleína al 1 % para comprobar la profundidad de la carbonatación; las zonas sin color indican que el concreto ha perdido su protección alcalina, lo que puede llevar a su corrosión. También se menciona la medición de cloruros utilizando productos químicos o un potenciómetro para evaluar la agresividad del ambiente. Estos análisis son esenciales cuando las pruebas rápidas no son suficientes para comprender el estado del material en su interior o para verificar si el concreto armado podrá soportar bien condiciones cercanas al mar o en ambientes con alta contaminación industrial (ACI Committee 228, 2013).

2.4.5. Instrumentación moderna: termografía infrarroja, radar de penetración GPR y drones

La termografía infrarroja, que no afecta la estructura del material, muestra diferencias de temperatura en la superficie del concreto mediante cámaras térmicas. Con esta técnica, es posible observar desprendimientos, cavidades, zonas húmedas o problemas de adherencia en

recubrimientos. Su eficacia cambia con el clima, siendo más efectiva en condiciones cálidas y secas (ACI Committee 228, 2013).

El radar de penetración terrestre (GPR) utiliza ondas electromagnéticas rápidas para generar imágenes del interior del concreto, identificando varillas, tuberías, vacíos y fisuras internas sin realizar contacto. Es muy útil para inspeccionar grandes áreas, aunque su precisión puede verse afectada en materiales húmedos o con alta cantidad de acero. Además, el manual menciona el uso de tecnologías complementarias, como sensores de vibración, ultrasonido digital y escáneres en 3D. En la actualidad, el uso de drones equipados con cámaras térmicas o sensores GPR facilita la inspección de áreas altas o difíciles de alcanzar, reduciendo riesgos y ampliando el alcance del análisis estructural (ACI Committee 228, 2013).

2.4.6. Modelado estructural en programas de análisis.

Aunque el documento TCS-17 no menciona un software específico, subraya la importancia de que los datos obtenidos de pruebas y mediciones se asocien a un modelo, ya sea numérico o analítico, que represente la estructura. Esto es esencial para comprender el comportamiento total del edificio bajo cargas. En este modelo, es fundamental incluir las propiedades reales de los materiales, tal y como se establecieron en las pruebas, y reflejar con precisión las condiciones de soporte y geométricas observada (ACI Committee 228, 2013).

El uso de herramientas de análisis estructural, como Robot Structural Analysis, se ajusta a esta necesidad, ya que permite simular el estado de tensión, las deformaciones y la resistencia que aún posee la estructura. Siguiendo las recomendaciones del TCS-17, desarrollar un modelo estructural facilita la conexión entre los resultados empíricos y lo que se esperaba según la teoría, lo cual es crucial para formular planes efectivos de reparación, refuerzo o supervisión continua (ACI Committee 228, 2013).

2.4.7 Elaboración del informe diagnóstico basado en ACI 562 (evaluación y criterios de aceptación).

El ACI 562-21 establece normas importantes. Estas están destinadas a inspeccionar, reparar y mejorar el concreto antiguo. Se trata del primer conjunto de reglas oficial y global. Su enfoque es cómo gestionar estructuras que presentan daños. Este documento proporciona pautas esenciales para los profesionales. Deben seguir estas pautas al inspeccionar, calcular y reparar el concreto. El objetivo es garantizar la seguridad de las personas. También se busca prolongar la vida útil y asegurar que la construcción funcione adecuadamente (ACI Committee 562, 2019).

El código indica que la inspección debe comenzar. Es necesario evaluar el estado de la estructura. Esto implica observar, realizar pruebas y revisar la historia del lugar. También es importante entender qué tipo de daño hay y su severidad (ACI 562-21, Ch. 6). En esta sección, el ingeniero determina hasta dónde llega la inspección. Debe conocer las características del material. Esto influye en su resistencia, durabilidad y forma general. Se evalúan aspectos como la pérdida de acero por óxido. También se revisa el grado de fisuración del concreto. Así como el daño por cal, fuego o sustancias químicas. Y las condiciones bajo las cuales se utiliza la estructura (ACI Committee 562, 2019).

La valuación estructural se detalla en el capítulo seis. Este aborda la investigación, el cálculo y la evaluación de componentes clave. Se determina si el daño es significativo o menor. Si hay riesgos, el ACI 562 exige tomar medidas inmediatas. Se pueden instalar soportes o restringir el uso (ACI Committee 562, 2019). Si el daño es leve, hay que analizar si se requiere mayor resistencia. O si solo son necesarios arreglos superficiales. Es necesario determinar si se modifica su capacidad estructural. Respecto a las normas de aceptación, el código señala algo importante. Una estructura reparada debe ser igual o superior. Debe adherirse a los estándares de diseño para nuevas construcciones (ACI Committee 562, 2019). Se verifican la resistencia, la flexibilidad y el funcionamiento. Se utilizan cálculos o pruebas de carga (ACI Committee 562, 2019). Además, el

texto establece cargas y modos de fallo. Define cifras esenciales para la evaluación de construcciones antiguas. Esto incluye el diseño de las reparaciones (ACI Committee 562, 2019).

2.5. Principios y técnicas de reparación estructural

Tipos de intervención: correctiva, preventiva, de refuerzo.

Los trabajos de reparación de estructuras de concreto se clasifican en tres categorías. Estas son: los correctivos, los preventivos y los de refuerzo. La elección de uno depende del motivo y el tiempo en que se lleva a cabo. Esta perspectiva ayuda a planificar cómo restaurar la funcionalidad de la construcción. También contribuye a que se mantenga en buen estado y sea segura a largo plazo (Ajay, 2021).

La reparación correctiva se aplica cuando la estructura ya presenta defectos. Es posible observar fisuras, desprendimiento de materiales o corrosión en el metal interno. A veces, la capa externa se descompone. El objetivo principal es rehabilitar el área afectada. Se intenta restaurar la resistencia y el uso que poseía anteriormente. Para ello, se emplean técnicas como llenar las grietas con resinas. O se coloca nuevo concreto en secciones dañadas. También se elimina la oxidación del metal. Se utilizan mezclas especiales de cemento o resina. Si el daño es severo, se refuerzan las secciones con más concreto o acero. Esto ayuda a recuperar la estabilidad y la cohesión. Esta intervención se asemeja a un tratamiento, ya que se dirige directamente al problema existente (Ajay, 2021).

Por otro lado, la reparación preventiva se enfoca en el futuro. Su objetivo es evitar que el daño empiece o progrese. Busca asegurar que la estructura se mantenga en buen estado y funcione de manera constante. Esto se consigue sellando superficies y protegiendo el entorno. Adicionalmente, se realiza un mantenimiento regular. Algunas técnicas comunes de prevención incluyen aplicar capas que impidan la penetración de humedad o aire dañino. Se utilizan sustancias químicas para combatir la corrosión. Se tapan pequeñas grietas. En ocasiones, se aplica

electricidad para reparar el concreto deteriorado por agentes externos. Inspeccionar frecuentemente y observar cuidadosamente la estructura ayuda a detectar fallas de manera anticipada. Esto previene daños mayores en el futuro. Tales medidas protegen el concreto y el metal de agresiones externas. Así, la construcción se prolonga sin requerir reparaciones significativas (Ajay, 2021).

Finalmente, la reparación de refuerzo se implementa cuando la estructura ya no puede soportar la carga. O cuando se anticipa que tendrá que soportar más peso o adaptarse a nuevas normativas. Este tipo de reparación tiene como finalidad incrementar la resistencia y la rigidez del sistema. Para ello, el Manual sobre Reparación y Rehabilitación de Edificios RCC sugiere soluciones específicas según el tipo de elemento afectado:

- ✚ En las columnas, se incrementa la sección mediante recubrimiento con concreto, acero o materiales compuestos, mejorando así el confinamiento y la resistencia axial.
- ✚ En las vigas, se fortalece la capacidad de flexión o corte con placas metálicas adheridas, cintas de fibra de carbono o sistemas de postensado externo.
- ✚ En las losas, se añaden sobrelosas o refuerzos en la parte inferior para elevar la capacidad de momento positivo o negativo.
- ✚ En las cimentaciones, se utilizan inyecciones, pilotes adicionales o reconstrucción parcial cuando se observan hundimientos o pérdida de capacidad portante.

Estas intervenciones requieren un análisis estructural exhaustivo para garantizar que los nuevos materiales sean compatibles con los existentes y que las cargas se redistribuyan adecuadamente. A diferencia de las demás, la intervención de refuerzo es activa, ya que altera o mejora el comportamiento estructural de la obra y extiende considerablemente su vida útil (Ajay, 2021).

2.5.1 Criterios ACI 562: compatibilidad de materiales, durabilidad y seguimiento pos-reparación.

La combinación de materiales es fundamental en ACI 562. El reglamento establece que los componentes utilizados en la reparación deben tener características de fuerza, química y física similares al cemento original. Esto garantiza que la unión sea sólida. Es esencial que el trabajo estructural sea uniforme y sin áreas de alta tensión. Además, se debe requerir que el módulo de elasticidad y la expansión térmica estén cerca del concreto de base. Esto previene la formación de fisuras por calor o peso. También es crucial tener una buena adherencia en el medio. Esto se logra mediante una limpieza adecuada del área y pruebas previas. Si hay óxido o un fuerte ataque químico, es importante verificar la compatibilidad del material nuevo. Se deben emplear materiales que resistan sales, sulfatos o un ambiente adverso. Se pueden utilizar mezclas con plásticos o resinas. A veces, se incorporan fibras (FRP) para aumentar la resistencia de un elemento. Así, el ACI 562 no solo se enfoca en la fuerza de la reparación, sino también en asegurar que el sistema funcione de manera uniforme (ACI Committee 562, 2019).

A continuación, la resistencia a largo plazo es crucial. En la sección de resistencia del ACI 562-21, se indica que todo debe soportar el deterioro durante un periodo prolongado. Esto incluye la necesidad de examinar el recubrimiento del metal. También se debe prestar atención a las fisuras y a la permeabilidad del agua. Es importante proteger el metal del óxido con recubrimientos apropiados. El código recomienda la aplicación de capas externas. Estas capas actúan como sellos contra sales, agua o gases dañinos. La durabilidad no depende solo del material nuevo, sino también del plan, la calidad de la ejecución y la ubicación. Por lo tanto, cada reparación debe considerar su durabilidad. Esto está relacionado con el tipo de daño esperado y las necesidades del componente. Este enfoque integral garantiza que las reparaciones no sean solo temporales. Son medidas que se sostienen en el tiempo y prolongan la vida útil de la estructura (ACI Committee 562, 2019).

Luego, la revisión y el mantenimiento tras el arreglo constituyen el tercer aspecto clave del ACI 562. En la sección diez, relacionada con la garantía de calidad, el código exige la implementación de un plan de control de calidad. Este plan debe abarcar tanto la construcción como el periodo posterior a la finalización del trabajo. Este procedimiento implica realizar visitas frecuentes. Además, incluye examinar la adhesión de los materiales y la resistencia de estos. Es importante documentar todo relacionado con la reparación. Esto abarca cómo se llevó a cabo el arreglo y los hallazgos realizados. El ACI aconseja monitorear la estructura constantemente. Es esencial observar aspectos como el posible riesgo de corrosión. También se debe verificar la humedad de la superficie y la aparición de nuevas grietas. Esto es especialmente relevante para edificaciones cercanas al mar o en plantas industriales. Este control técnico garantiza que la reparación siga siendo efectiva. De este modo, se asegura que el sistema reparado sea confiable durante mucho tiempo (ACI Committee 562, 2019).

2.5.2 Etapas del proceso de reparación (limpieza, aplicación, curado, control)

La etapa inicial, conocida como limpieza o preparación de la superficie, es considerada por el ACI como fundamental para el éxito de la reparación. De acuerdo con la Sección 3 que trata sobre la eliminación de concreto y la preparación de la superficie, es necesario remover el concreto dañado antes de agregar nuevo material. Se debe alcanzar una base sólida. Esta base tiene que estar libre de impurezas. Esto significa eliminar polvo, grasa, óxido, aceite, cualquier material suelto y la capa superficial débil. Para llevar a cabo esta tarea, se utilizan máquinas o agua a presión. Si se encuentra óxido, es importante limpiar bien las varillas de metal. Debe haber metal limpio, sin corrosión ni óxido. El objetivo de esta parte es conseguir una superficie rugosa. De esta manera, el nuevo material se adherirá correctamente. El ACI indica que la superficie debe tener un perfil dentro de la categoría ICRI CSP 6 a 9. Esto puede variar según el producto que se utilice. Además, la superficie debe estar húmeda, pero sentirse seca al tacto (SSD). Esto debe hacerse

antes de aplicar productos de cemento. Es necesario evitar el exceso de agua. El agua libre puede debilitar la unión (*Guide to Concrete Repair*, 2014).

La segunda etapa consiste en aplicar el material de reparación. El ACI lo detalla en las Secciones 4 y 5 del documento 546R-14. En este paso, se seleccionan los materiales adecuados. Esto depende del tipo y la extensión del daño. También influye el lugar donde se ubicará la pieza y su estructura. Se pueden emplear métodos como inyección de grietas o parches con morteros especiales. Asimismo, es posible utilizar concreto lanzado o verter concreto convencional. Es crucial aplicar una capa de unión. Esto se realiza si el nuevo material difiere del concreto existente. Esto facilita la transmisión de fuerzas. En reparaciones de mayor envergadura, el ACI destaca la importancia de asegurar una buena adherencia entre el nuevo y el viejo concreto. Esto se logra mediante el uso de varillas adicionales, pernos o refuerzos adheridos. La aplicación debe hacerse en capas controladas. Se deben compactar bien. Esto elimina espacios vacíos. Así se asegura que se adhiera completamente a la base (*Guide to Concrete Repair*, 2014).

La tercera etapa es el proceso de curado. Esta fase es fundamental. Permite que el material adquiera resistencia. También crea la conexión y la durabilidad del producto aplicado. Según el ACI 546R-14, el curado debe iniciarse inmediatamente después de la colocación del material. Esto ayuda a prevenir un secado excesivamente rápido. Se pueden utilizar líquidos especiales para este fin. También se emplean telas húmedas o agua pulverizada. Esto depende de las condiciones climáticas. Si se están utilizando polímeros o resinas, es importante seguir las instrucciones del fabricante. Esto incluye tiempo, temperatura y exposición. Un curado inadecuado puede resultar en grietas. Esto ocurre debido al secado rápido. También puede debilitar la adherencia o la resistencia. Esto afecta gravemente la calidad final de la instalación. Por lo tanto, es fundamental controlar el agua y el calor. Esto es especialmente relevante en climas calurosos o con alta ventilación (*Guide to Concrete Repair*, 2014).

La cuarta etapa es el control final. Esta es la fase conclusiva. Se debe consultar el Capítulo 5.6 sobre este tema. Esta parte verifica si todo se realizó correctamente. Es necesario examinar cada paso detenidamente. Se realiza una inspección visual. También se evalúan la adherencia y la resistencia a la compresión. Se mide la permeabilidad al agua. Es esencial asegurar el grosor aplicado. Asimismo, se revisa el apretado y la forma final. Todo debe ajustarse a lo indicado en el plan. El ACI 546R-14 resalta un punto importante. La reparación no concluye al aplicar el producto. Debe llevarse a cabo un seguimiento posterior. Es necesario programar visitas para supervisar el progreso. Esto evalúa su durabilidad a lo largo del tiempo. Dicho control puede incluir la revisión de grietas. También implican visitas anuales. Se pueden realizar pruebas de oxidación. O se inspeccionan las capas de protección instaladas (*Guide to Concrete Repair*, 2014).

2.5.3. Métodos de reparación según Helene (2003)

Paulo Helene (2003) clasifica las formas de reparar el concreto reforzado. Esta clasificación se realiza teniendo en cuenta la naturaleza y la severidad del daño. También se considera el tipo de material que necesita ser reparado y el propósito estructural de la tarea. Las técnicas más comunes y ampliamente reconocidas a nivel internacional son: aplicar resinas epóxicas, utilizar pastas con polímeros, remover el concreto dañado y colocar nuevas capas de protección. Todas estas técnicas buscan restaurar la unión, prolongar la durabilidad y mantener la resistencia del elemento estructural (Helene & Pereira, 2003).

Aplicar resinas epóxicas

Este método se utiliza para sellar y unir elementos que tienen grietas, haciendo que vuelvan a ser una estructura única. Esto vuelve a juntar las partes del concreto que se separaron (Helene & Pereira, 2003).

De acuerdo con el EM 1110-2-2002, la técnica consiste en inyectar resinas epóxicas líquidas en las grietas. Esto se realiza con una presión controlada. Se inicia desde la parte inferior

y se avanza hacia arriba hasta que se completa el espacio. Estas resinas son muy resistentes. Se adhieren bien y permiten que pase muy poco líquido. Esto ayuda a "unir" la fractura y a restaurar la integridad del elemento. Se recomienda emplear esta técnica únicamente en grietas que estén fijas. Las grietas que se mueven podrían reabrirse si no se eliminan las causas de su movimiento (Helene & Pereira, 2003).

El ACI y Helene coinciden en que el éxito de la reparación depende de limpiar adecuadamente la grieta. También es importante regular la presión al introducir la resina y controlar la temperatura durante el proceso de secado (Helene & Pereira, 2003).

Utilizar pastas con polímeros

Las pastas que contienen polímeros (PMM) son adecuadas para reparar áreas pequeñas. Esto sucede en casos de piezas dañadas, capas que están sueltas o falta de la capa superior. Según un manual de reparación de edificios de concreto, la adición de compuestos como SBR o PAE mejora las propiedades de la pasta. Esto permite que la mezcla se adhiera mejor. También proporciona mayor elasticidad, reduce la filtración de agua y aumenta la resistencia a la acidez (Helene & Pereira, 2003).

Estos materiales poseen una malla de polímero. Esta estructura llena los pequeños poros del concreto. De esta manera, se reduce la permeabilidad y se dificulta la entrada de cloruros. Se aplican en capas delgadas. Primero, es necesario limpiar y humedecer la base. Sirven tanto como material de reparación como barrera contra agentes dañinos (Helene & Pereira, 2003).

Sustitución del cemento deteriorado

Cuando el deterioro es significativo o compromete la resistencia de la estructura, se reemplaza una parte o la totalidad del cemento en mal estado. El manual del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. recomienda este procedimiento en áreas que superan 0,1 m². También es

válido si la profundidad excede los 150 mm. Esto es necesario si el cemento no logra adherirse correctamente o si está muy sucio (Helene & Pereira, 2003).

El nuevo cemento debe ser comparable al antiguo en términos de dureza y contracción. Para asegurar una buena unión entre ambos, se aplica una capa de adhesivo fuerte. Esta puede ser de resina epóxica o de cemento, antes de incorporar el nuevo material. Este método se utiliza en vigas, columnas y suelos que están muy deteriorados. En ocasiones, se añade refuerzo adicional o una capa extra para restaurar la resistencia del elemento (Helene & Pereira, 2003).

Reinstalación de las capas protectoras

El propósito de reinstalar las capas es proteger adecuadamente el metal de refuerzo, tanto física como químicamente. Esto es afirmado en el manual sobre Reparaciones y Mejora de Edificios de Hormigón. Las tareas incluyen limpiar el metal oxidado y tratarlo. Después, se aplican mezclas de cemento con polímeros. Alternativamente, se pueden usar capas que impidan la penetración de agua, de 2 a 4 mm de espesor (Helene & Pereira, 2003).

Estas capas actúan como una barrera contra el agua, las sales y el aire. Reducen la velocidad de corrosión y prolongan la vida del refuerzo. Se utilizan con frecuencia capas de resina, acrílicas o de caucho tratado. Se aplican en dos o más capas sobre una superficie que esté limpia y seca (Helene & Pereira, 2003).

2.6. Refuerzo estructural

2.6.1 Concepto y objetivos del refuerzo estructural.

La mejora de estructuras implica un trabajo técnico. Su objetivo es restaurar o aumentar la resistencia y la solidez. Esto se refiere a vigas y columnas de concreto. Presentan defectos debido al paso del tiempo. O a problemas en el diseño. También por una construcción inadecuada. O por condiciones climáticas adversas. El objetivo no solo es garantizar la seguridad. También se busca prolongar su durabilidad. Empleamos buenas técnicas. Utilizamos materiales que se integran

adecuadamente con lo que ya existe. La mejora tiene como fin hacer el concreto más resistente al flexionarse o cortarse. Se pretende que soporte más peso. También se busca reducir la aparición de grietas. Se supervisan los movimientos. Se asegura el acero en su interior. Esto es esencial en caso de sismos. O si hay cargas que varían constantemente (Hollaway & Leeming, 1999).

Incorporar un buen refuerzo mejora la construcción. La prepara para nuevos usos. O para soportar cargas mayores. No es necesario desechar o reemplazar las partes fundamentales. Por lo tanto, es un método efectivo y beneficioso. Aumenta la vida útil del concreto ya existente (Hollaway & Leeming, 1999).

2.6.2 Criterios de evaluación.

Es fundamental examinar la estructura cuidadosamente antes de decidir la forma de fortalecerla. Es importante determinar la magnitud de los daños. Asimismo, es necesario entender las razones detrás de dichos daños. Este análisis debe revisar adecuadamente los planos de construcción. Se examinan registros antiguos del proyecto. Se realizan inspecciones minuciosas y pruebas en laboratorios. Se emplean modelos para comprobar la resistencia del material (Hollaway & Leeming, 1999).

El propósito de analizar todos estos aspectos es evidente. La mejora debe basarse en informaciones confiables. Es esencial evaluar la resistencia del hormigón. También es necesario verificar el nivel de corrosión del metal. Además, se debe analizar la unión entre ambos elementos. Se estudian las fuerzas que afectan las diferentes partes de la construcción (Hollaway & Leeming, 1999).

La pauta principal es que el nuevo refuerzo funcione correctamente junto al hormigón existente. Esto se refiere a sus propiedades y cómo se comportan internamente. Es crucial evitar fuerzas externas que puedan generar nuevas fisuras. También hay que mantener una buena adherencia entre los materiales. Es primordial que todo tenga una larga durabilidad. El refuerzo

debe aumentar la resistencia de la estructura. También debe proteger mejor contra factores perjudiciales como la humedad, la contaminación o la sal (Hollaway & Leeming, 1999).

2.6.3 Métodos convencionales de refuerzo

Las antiguas maneras de mejorar se han utilizado en el pasado. Se aplican para reparar construcciones de hormigón y metal. Utilizan materiales tradicionales como el acero y el mismo hormigón. Algunas de las técnicas más conocidas son cubrir con hormigón o mortero, hacer que las partes sean más gruesas y añadir elementos de metal (Hollaway & Leeming, 1999).

Cubrir consiste en agrandar el lado de la pieza. Se coloca una nueva capa de hormigón o mortero. Se incorpora metal adicional. Este metal se integra con el refuerzo que ya tiene el elemento. Esto aumenta su resistencia para soportar peso. Mejora su capacidad para resistir la flexión. También ajusta mejor el acero. Es muy útil para columnas y vigas. Aumentar el grosor de las partes se utiliza para incrementar el espesor de placas o vigas. Esto permite que soporten más peso o flexión. Se realiza aplicando una capa adicional de hormigón o mortero que se adhiere a la parte antigua. Es importante preparar bien la superficie. Se colocan elementos que distribuyan las fuerzas de manera efectiva (Hollaway & Leeming, 1999).

Mejorar con componentes metálicos implica utilizar placas, ángulos o tiras de acero. Estas se fijan o se adhieren al hormigón con resinas. Este método proporciona mayor resistencia de manera rápida. Es útil para reparaciones que requieren rapidez. Sin embargo, se debe tener cuidado con el óxido y asegurar uniones adecuadas. Las técnicas tradicionales ofrecen estabilidad y buen soporte. Su principal inconveniente es que incrementan el peso de la pieza. Además, aumentan el tamaño total del elemento que se está reparando (Hollaway & Leeming, 1999).

2.6.4 Métodos modernos de refuerzo

Las nuevas estructuras representan un cambio significativo en la manera en que se realizan las construcciones. Utilizan materiales que son tanto resistentes como livianos. Esto incrementa la resistencia sin alterar la forma o el peso (Hollaway & Leeming, 1999).

Un material que se usa mucho es el FRP. Consiste en aplicar telas o paneles de fibra. Estas fibras pueden ser de vidrio o carbono. Se adhieren al concreto utilizando un adhesivo especial. Este método aumenta la resistencia a la flexión y la ruptura. Además, es duradero y fácil de instalar. Los paneles de FRP funcionan como una capa resistente. Absorben fuerzas adicionales y distribuyen las cargas a las áreas dañadas (Hollaway & Leeming, 1999).

Otra técnica reciente es el postensado externo. Se colocan cables en la parte exterior de la estructura. Se aplica tensión a estos cables. Esto refuerza la estructura. Reduce las pequeñas fisuras y permite que las tensiones internas se ajusten con el tiempo (Hollaway & Leeming, 1999).

Por último, existen mezclas de cemento extremadamente robustas, conocidas como UHPC. Estas son muy fuertes y densas. Tienen buena capacidad de adherencia. Permiten crear refuerzos delgados que tienen gran durabilidad. Además, presentan muy pocos poros. Esto ayuda a proteger contra daños. Son muy eficaces al transferir fuerzas entre los diferentes materiales. En conjunto, estas innovaciones son más efectivas. Son más sencillas, ligeras y tienen una mayor durabilidad que las anteriores. Su aplicación depende del lugar y del modo en que se conecten las partes (Hollaway & Leeming, 1999).

2.6.5 Modelado y simulación del refuerzo

Modelar y simular son aspectos fundamentales. Se utilizan frecuentemente al crear y evaluar una estructura resistente. Mediante software de análisis y técnicas de puntos finales, se puede observar cómo se comporta la construcción real. También se pueden analizar los impactos de los cambios que se desean implementar (Hollaway & Leeming, 1999).

El modelo de la construcción ayuda a identificar debilidades en la resistencia. Permite determinar los niveles de seguridad. Se examina cómo se conectan la nueva estructura con la antigua. Es posible observar el resultado antes y después de las modificaciones. Esto verifica que las propuestas cumplan con los requisitos de resistencia, flexibilidad y uso adecuado (Hollaway & Leeming, 1999).

Las pruebas numéricas revelan otras alternativas de soporte. Esto se realiza sin dañar la construcción. Así se utilizan los recursos de manera más eficiente y se ahorra tiempo. Por ello, el uso del modelo es esencial. Garantiza que las soluciones propuestas son efectivas y justifican su costo (Hollaway & Leeming, 1999).

2.6.6 Aplicación práctica del refuerzo estructural

La fuerza de soporte debe considerarse como un conjunto integral. Esto combina la investigación, la estrategia, la implementación y la evaluación. Cada etapa tiene un impacto significativo en el resultado del apoyo. En realidad, aplicar las técnicas de soporte requiere bastante atención. Es crucial establecer una buena base. Luego, es necesario colocar el material de manera adecuada. También es fundamental verificar cómo se unen todos los elementos (Hollaway & Leeming, 1999).

El procedimiento consiste en limpiar la superficie. Es importante eliminar cualquier cosa suelta o sucia. Después, se coloca y se garantiza el soporte. Finalmente, se evalúa cómo funciona dentro de su estructura. La duración no solo depende de los materiales utilizados. La manera en que se lleva a cabo el trabajo es muy importante. Las condiciones del entorno también juegan un papel crucial (Hollaway & Leeming, 1999).

Un soporte sólido, bien diseñado y implementado puede fortalecer la estructura. Puede restaurar su forma original. Esto proporciona seguridad, una mejor utilización y una mayor

durabilidad. No es necesario derribar o reemplazar toda la edificación (Hollaway & Leeming, 1999).

2.7. Normativas técnicas comparadas.

Al realizar una comparación entre las normativas de Ecuador y las internacionales, este análisis pone de manifiesto tanto las similitudes como las divergencias en los principios que rigen el diseño, diagnóstico y rehabilitación del concreto reforzado. Estos principios están en consonancia con los estándares referentes a la resistencia estructural y la durabilidad. En particular, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-HM) establece directrices esenciales para el diseño local, fundamentadas en las pautas del Instituto Americano del Concreto (ACI) y las normas ASTM, adaptadas a las condiciones sísmicas y climáticas propias de Ecuador. Las normas ACI 201.1R, ACI 228.2R y ACI 562 constituyen el marco de referencia más exhaustivo para la evaluación, ensayo y reparación de estructuras de concreto en funcionamiento.

2.7.1 Revisión de normativa ecuatoriana (NEC, INEN)

El NEC-SE-HM, 2015 — Estructuras de Hormigón Reforzado — constituye uno de los documentos técnicos emitidos por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (De & Construcción, n.d.). Su cumplimiento es obligatorio para todos los diseños estructurales en el país y se fundamenta en los principios del diseño por resistencia y el comportamiento sísmico establecidos en el ACI 318-14. Esta normativa abarca los siguientes aspectos clave:

Criterios de diseño estructural:

Adopta un enfoque basado en estados límite (tanto último como de servicio). Establece factores de reducción de resistencia (ϕ) y factores de carga (γ), alineándose con las directrices del ACI. Implementa principios que buscan asegurar la ductilidad estructural y observa la regla de "columna fuerte – viga débil" para prevenir fallos frágiles (ACI Committee 318-14, 2014).

Durabilidad del concreto:

Define las condiciones de exposición a las que estará sometido el concreto (como ambientes húmedos, marinos, sulfatados e industriales) así como la relación máxima agua/cemento (a/c), la resistencia mínima requerida f'_c y el grosor del recubrimiento para el acero de refuerzo. Incluye requisitos para los materiales que se basan en normas ASTM e INEN (ACI Committee 318-14, 2014).

Control de calidad e implementación:

Las especificaciones incluyen criterios que garantizan que el concreto tenga un adecuado funcionamiento, soporte tensiones y sea evaluado mediante pruebas de resistencia, trabajabilidad y densidad. Se exige un registro detallado y seguimiento del uso de materiales conforme a las normativas INEN 152 (Cementos), INEN 872 (Agregados) e INEN 1855 (Concreto premezclado). En caso de inconsistencias o falta de normas locales, el NEC remite directamente a las regulaciones ASTM o ACI (ACI Committee 318-14, 2014).

En síntesis, el NEC-SE-HM no solo actúa como una norma nacional que actualiza las directrices del ACI para abordar la problemática sísmica ecuatoriana, sino que también se complementa con el NEC-SE-DS (Diseño Sismorresistente) y la normativa sobre materiales INEN (De & Construcción, n.d.).

2.7.2. Normas internacionales del American Concrete Institute (ACI)

Las normas ACI representan el estándar internacional para el diseño, evaluación e intervención de estructuras de concreto. Los fundamentos para el diagnóstico, prueba y rehabilitación de edificaciones existentes se encuentran en tres documentos clave:

ACI 201.1R-08 - Guía para la Evaluación del Estado del Concreto en Servicio

Este documento establece un enfoque estandarizado para realizar observaciones que sirven como punto de partida en la evaluación estructural (American Concrete Institute, 2008). Los objetivos principales de ACI 201.1R incluyen:

- ✚ Identificación y clasificación: Reconocer y clasificar características patológicas detectables (como grietas, corrosión, eflorescencia o desprendimiento del recubrimiento).
- ✚ Documentación: Mantener registros visuales, fotografías, fichas técnicas y descripciones estandarizadas sobre las condiciones observadas.
- ✚ Análisis del daño: Evaluar la magnitud e historia de los daños tomando en cuenta ubicación, orientación, apertura y posibles causas.

La guía sugiere llevar a cabo inspecciones visuales periódicas dependiendo del tipo de estructura y sus condiciones ambientales. También promueve el uso de índices de condición estructural que faciliten la descripción general del estado del concreto, lo cual es crucial para implementar programas efectivos de mantenimiento preventivo y predicción de vida útil (American Concrete Institute, 2008). En resumen, ACI 201.1R actúa como una fase inicial en la evaluación; el siguiente paso implica realizar pruebas no destructivas según ACI 228.2R antes de proceder con la rehabilitación conforme a ACI 562.

ACI 228.2R-13 - Métodos No Destructivos para Evaluar Concreto en Estructuras

El documento ACI 228.2R proporciona directrices técnicas y un compendio sobre métodos NDT aplicados a la evaluación del concreto, centrándose en principios fundamentales, equipos necesarios, procedimientos y limitaciones asociadas con las principales técnicas no destructivas (NDT). Estas metodologías permiten evaluar las condiciones internas sin dañar la estructura existente (ACI Committee 228, 2013).

Entre los métodos más utilizados se encuentran:

- ✚ Técnicas basadas en ondas: Incluyen ultrasonido, impacto-eco y vibración superficial para medir uniformidad y detectar grietas.

- ✚ Métodos eléctricos/magnéticos: Como resistividad eléctrica y potencial de media celda para evaluar la corrosión del acero.
- ✚ Métodos relacionados con fluidos: Determinación de permeabilidad y difusión de cloruros vinculada a durabilidad.
- ✚ GPR y termografía infrarroja: Utilizados para localizar refuerzos o identificar áreas deterioradas dentro del concreto.

Este estándar también ofrece orientaciones sobre cómo interpretar resultados e integrar hallazgos con pruebas intrusivas (como extracción de núcleos). En términos de rehabilitación, ACI 228.2R permite un diagnóstico preciso que es esencial para verificar la capacidad residual según lo estipulado por ACI 562.

ACI 562-19 - Código sobre Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Estructuras

Concretas Existentes

ACI 562-19 representa el primer código global específico para estructuras existentes de concreto reforzado. Su objetivo es proporcionar criterios claros tanto para el diseño como para la ejecución utilizando materiales reparadores que aseguren seguridad, compatibilidad y durabilidad (ACI Committee 562, 2019).

Sus contribuciones clave abarcan:

Evaluación estructural integral: Es imperativo combinar inspección visual (según ACI 201.1R) con pruebas no destructivas (según ACI 228.2R). Se detallan procesos destinados a estimar la vida útil restante mediante modelos que consideran difusión de cloruros, carbonatación o propagación corrosiva.

Diseño reparador: Se establecen criterios similares a los definidos por ACI 318 en cuanto a seguridad y resistencia; además se introducen requisitos relacionados con compatibilidad

material (incluyendo módulo elástico y coeficiente térmico). Un plan post-reparación debe ser documentado como parte esencial del manejo integral durante todo su ciclo vital.

Gestión preventiva: Se subraya la necesidad continua de inspeccionar edificaciones reparadas e invita a implementar índices que midan deterioro junto con un cronograma regular de inspecciones para prevenir daños recurrentes.

En síntesis, aunque ACI 562 regula intervenciones necesarias en estructuras afectadas por daños, también promueve una cultura orientada hacia una rehabilitación sostenible respaldada por principios técnicos sólidos (ACI Committee 562, 2019).

2.7.3 Buenas prácticas de ingeniería en rehabilitación estructural.

Los protocolos NEC-SE-HM y los estándares ACI han sido integrados para ofrecer un sistema coherente de buenas prácticas de ingeniería, destinado a orientar el diagnóstico y la rehabilitación postconstrucción de la integridad estructural. Estos lineamientos pueden resumirse en los siguientes principios:

Diagnóstico Integral:

El fundamento de cualquier proceso de rehabilitación radica en que no debe iniciarse con la identificación del problema, sino con la necesidad de realizar un diagnóstico. La secuencia recomendada es la siguiente:

Inspección Visual (ACI 201.1R) → Pruebas NDT (ACI 228.2R) → Evaluación Estructural (ACI 562). Este enfoque permite al ingeniero discernir si el daño es superficial, funcional o estructural.

Compatibilidad y Durabilidad de los Materiales:

Una vez realizada la reparación, el material empleado debe cumplir con las propiedades mecánicas y químicas especificadas para el concreto en ACI 562, así como con los requisitos de durabilidad establecidos en el capítulo 9 del NEC-SE-HM.

✚ Diseño Basado en el Desempeño:

Es crucial demostrar que la estructura reparada alcanzará los estándares necesarios de seguridad y ductilidad equivalentes a los de una nueva construcción, conforme a lo estipulado por ACI 318 y NEC-SE-DS.

✚ Control de Calidad y Documentación:

Cada etapa del diagnóstico, así como las pruebas y trabajos de reparación, deben ser registrados en informes técnicos que contengan hojas de control, mapas de daños, fotografías y resultados obtenidos durante las pruebas.

✚ Mantenimiento Planificado:

De acuerdo con la metodología propuesta por Helene (2003) y los estándares establecidos por ACI 562, cualquier intervención requerirá implementar un programa periódico de mantenimiento para asegurar la sostenibilidad a largo plazo del trabajo realizado.

CAPITULO III

3.1 Marco metodológico

3.1.1 Enfoque de la investigación

El presente estudio emplea un enfoque metodológico mixto que combina tanto técnicas cuantitativas como cualitativas, destacando un análisis técnico cuantitativo de gran relevancia. El componente cualitativo se centra en la descripción y clasificación de las patologías identificadas mediante inspecciones visuales, así como en su origen. Por otro lado, el aspecto cuantitativo abarca los resultados numéricos obtenidos a través de métodos de simulación estructural y ensayos no destructivos (NDT), dirigidos a evaluar el grado de deterioro y la capacidad de carga residual. Esta investigación se desarrolla dentro del contexto de un proyecto práctico, con el objetivo de ofrecer una propuesta técnica concreta para el diagnóstico y refuerzo estructural, orientada a mejorar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de una vivienda construida con hormigón armado existente.

3.1.2 Tipo y diseño de investigación

El enfoque de la investigación es descriptivo y aplicado, fundamentado en el ámbito práctico (no experimental). Se clasifica como no experimental porque no se manipulan las variables estructurales ni los materiales de construcción; en cambio, se analizan las características estructurales y los procesos constructivos en su contexto actual. Su naturaleza descriptiva radica en que se registran, documentan y caracterizan los tipos de daños y patologías que pueden surgir a partir de elementos estructurales, tales como grietas, corrosión, desprendimiento y humedad. Este estudio tiene un propósito práctico, ya que sus hallazgos contribuirán a la elaboración de una propuesta de intervención alineada con las normativas vigentes (ACI 201.1R, ACI 228.2R, ACI 562, ASTM C805 y NEC-SE-HM). Además, está basado en observaciones directas y pruebas realizadas en el campo relacionado con la vivienda objeto del estudio. El diseño metodológico es secuencial y se organiza en cuatro fases distintas: documental, de campo, análisis y propuesta; lo

que facilita un seguimiento lógico respecto a la recopilación de información antes de definir soluciones técnicas comprobables.

3.1.3 Modalidad de investigación

El presente estudio se fundamenta en dos enfoques que se complementan entre sí:

3.1.3.1 Modalidad de campo

Esta fase abarca la observación directa, inspecciones visuales, fotografía, recopilación de datos estructurales y realización de pruebas no destructivas. Su objetivo es identificar las patologías presentes y determinar las condiciones reales del edificio.

3.1.3.2 Modalidad documental.

Consiste en la revisión de literatura especializada junto con normas internacionales y nacionales (como ACI, ASTM, NEC e INEN), así como manuales técnicos relevantes (por ejemplo, los de Helene y Calavera Ruiz). Esto proporciona un respaldo al marco teórico utilizado para los procedimientos de prueba, criterios evaluativos y métodos aplicables a la reparación y refuerzo estructural.

La combinación efectiva de ambas modalidades garantiza que el diagnóstico estructural esté sustentado tanto por evidencia empírica como por principios científicos reconocidos dentro del ámbito normativo.

3.1.4 Métodos de investigación

El desarrollo de la investigación se fundamenta en diversos métodos científicos:

- ✚ Método inductivo-deductivo: Este enfoque inicia con la observación de eventos particulares (como grietas, corrosión, desprendimientos y deterioro superficial) para inferir causas generales del daño estructural. Posteriormente, estos hallazgos son contrastados con los criterios establecidos por las normas técnicas.

- ✚ Método analítico: Consiste en descomponer el problema en sus componentes estructurales individuales (vigas y columnas) a fin de examinar detalladamente los mecanismos específicos que provocan el deterioro y su interacción con cargas y materiales.
- ✚ Método experimental-observacional: Implica realizar pruebas directas y mediciones sin alterar la estructura existente; este método permite obtener datos objetivos que respaldan un diagnóstico técnico preciso.

Al integrar estas metodologías, se logra un análisis profundo que ofrece una comprensión holística sobre el estado estructural del edificio, lo cual respalda técnicamente las recomendaciones para intervenciones necesarias.

3.1.5 Población y muestra

La investigación se enfoca en un caso representativo es una vivienda unifamiliar con aproximadamente 30 años, ubicada en el sector Juan Montalvo, al norte de Guayaquil, y presentan evidencias claras de deterioro estructural. Este caso representativo ha sufrido ampliaciones irregulares sin la debida supervisión técnica y presenta múltiples problemas visibles como grietas en las paredes, desprendimiento del revestimiento, corrosión de los refuerzos metálicos y humedad ascendente. La unidad analizada abarca los elementos estructurales portantes de la casa (columnas, vigas, losas y muros), a los cuales se les realizarán pruebas diagnósticas junto con observación directa.

3.1.6 Técnicas e instrumentos de recolección de información.

Técnicas empleadas:

Inspección visual directa: Se llevará a cabo un recorrido sistemático por la estructura, con el fin de identificar distintos tipos de daños (como fisuras, corrosión, desprendimientos y

humedad) que serán clasificados según su origen y severidad, siguiendo las directrices establecidas en el ACI 201.1R.

Registro fotográfico: Este proceso documentará detalladamente cada lesión observada, incluyendo su ubicación y evolución.

Pruebas no destructivas (NDT):

- ✚ Esclerometría (ASTM C805): Utilizada para evaluar la uniformidad y resistencia superficial del concreto.
- ✚ Instrumentos utilizados:
- ✚ Cámara digital junto con formularios específicos para inspecciones.
- ✚ Esclerómetro
- ✚ Cinta métrica
- ✚ Software técnico: AutoCAD se utilizará para elaborar planos; Robot Structural Analysis será empleado para modelado estructural; además se usarán hojas de cálculo destinadas al procesamiento eficiente de resultados.

3.2 Procedimiento metodológico

La presente investigación se desarrollará mediante un enfoque metodológico fundamentado en la normativa técnica vigente, con el propósito de evaluar las condiciones estructurales de una vivienda situada en la Cooperativa Juan Montalvo. En primer lugar, se llevará a cabo una inspección visual detallada de la vivienda, con el objetivo de registrar el estado actual de los elementos estructurales. Esta etapa permitirá identificar las patologías y defectos que sean evidentes en dichos componentes.

Posteriormente, se ejecutará un ensayo de esclerometría, el cual representa un método de evaluación no destructivo que permite determinar la resistencia superficial del concreto, además de valorar el estado de los elementos estructurales presentes en la edificación. A continuación, se

procederá con un análisis estático de la estructura utilizando el software Robot Structural Analysis, considerando las cargas que afectan la edificación en combinación con las disposiciones establecidas por la normativa.




Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se delinearé una propuesta referencial de intervención estructural. Dicha propuesta incluirá un presupuesto estimado orientado a mejorar tanto el comportamiento estructural como la seguridad de la vivienda evaluada.

3.3 Inspección visual ACI 221 1R

3.3.1 Planificación previa y revisión de antecedentes

Antes de la visita técnica, se reúne la información disponible sobre la vivienda. Esto incluye la ubicación, el uso actual, las modificaciones realizadas, la antigüedad aproximada, los daños que han reportado los ocupantes y las condiciones del entorno, como la humedad.

3.3.2 Preparación de instrumentos.

-  Camara
-  Cinta métrica / flexómetro
-  Formato de ficha de inspección y croquis de planta

3.3.3 Reconocimiento general del inmueble y del entorno

La inspección exterior se realiza primero para identificar cualquier condición que pueda contribuir al deterioro.

Inicia la inspección realizando un recorrido perimetral externo de la vivienda, evaluando el estado general de las fachadas, los zócalos y las uniones con el terreno. Durante esta etapa, se identifican posibles indicios de asentamientos diferenciales, humedad por capilaridad, infiltraciones, fisuras en los muros o desprendimientos del revestimiento de concreto, considerando siempre la interacción entre la edificación y su entorno inmediato.

3.3.4 Inspección visual interior de la vivienda

Seguidamente se procede a inspeccionar la vivienda, examinando de manera sistemática los elementos estructurales presentes en una casa de un solo nivel:

- ✚ Columnas
- ✚ Vigas de amarre de hormigón armado
- ✚ Paredes no estructurales

3.3.5 Identificación y caracterización de lesiones

Se registran todos los daños visibles especificando con exactitud su ubicación, naturaleza, dirección y dimensiones. Las fisuras se detallan según su patrón (vertical, paralelo al eje de la tubería, horizontal o relacionado con la gravedad) y se clasifican de manera preliminar en términos de severidad (leve, moderada o severa), tomando en cuenta su continuidad, recurrencia y posible impacto estructural.

3.3.6 Registro fotográfico y mapeo de daños


Se realiza un registro fotográfico estructurado y referenciado, complementado con croquis en planta que indican las lesiones identificadas en columnas, vigas y paredes. Este mapeo permite identificar patrones de daño y concentraciones de lesiones dentro de la vivienda.


3.4 Ensayo de esclerometría ACI 228.2R

El ensayo de esclerometría tiene como objetivo determinar de forma indirecta la resistencia superficial del hormigón, permitiendo así evaluar la homogeneidad del concreto empleado en los elementos de un piso de vivienda sin causar daños a dichos elementos. Este procedimiento se realiza como un método preliminar y no destructivo, siguiendo las directrices del American Concrete Institute (ACI) 228.2R.

3.4.1 Selección de elementos a evaluar

El ensayo se lleva a cabo únicamente en los elementos estructurales de hormigón armado accesibles en la vivienda, los cuales son:

 Columnas

 Vigas de amarre

No se incluyen en la prueba las paredes no estructurales, dado que no forman parte del sistema portante principal.

3.4.2 Preparación de la superficie de ensayo

La superficie de concreto se prepara siguiendo las directrices establecidas en la ACI 228.2R antes de realizar la medición. Primero, se limpia el área para eliminar polvo, pintura antigua, mortero en mal estado y posibles contaminantes. Es importante seleccionar zonas planas, secas y representativas del elemento en evaluación. No deben tomarse muestras en áreas con grietas visibles, bordes, esquinas ni en partes donde el recubrimiento esté desprendido. En caso de que la superficie sea rugosa, se realiza un pulido ligero para garantizar un buen contacto del esclerómetro.

3.4.3 Calibración del esclerómetro

Previo al inicio del ensayo, se realiza una verificación del martillo de rebote utilizando su yunque de calibración. Esta comprobación se basa en asegurarse de que los valores registrados estén dentro del rango aceptable especificado por el fabricante y la norma ACI 228.2R. Este procedimiento garantiza que los resultados obtenidos en el campo sean confiables.

3.4.4 Procedimiento de medición en campo

En cada elemento estructural seleccionado, se define un área de ensayo donde se realizan, como mínimo, 10 impactos válidos, asegurándose de que estos estén suficientemente distanciados entre sí para evitar interferencias en las lecturas consecutivas.

El esclerómetro se posiciona de forma perpendicular y uniforme sobre la superficie del concreto, y el índice de rebote resultante de cada medición es registrado adecuadamente. En caso de que la dirección de la prueba no sea horizontal, se incorporan las correcciones de posición sugeridas según las recomendaciones establecidas en el ACI 228.2R.

3.4.5 Registro y tratamiento de resultados

Los valores de rebote registrados en las fichas de campo incluyen:

- ✚ El elemento evaluado (como columnas o vigas de concreto).
- ✚ La ubicación exacta del punto de prueba.
- ✚ La dirección del impacto.
- ✚ Los valores individuales de rebote.

De acuerdo con la norma ACI 228.2R, las lecturas que presentan diferencias significativas respecto al conjunto de datos son descartadas. Posteriormente, se calcula un valor promedio representativo para cada área evaluada.

3.5 Metodología de Evaluación Sísmica mediante el Método Estático Equivalente de acuerdo con la Nec-2015 y ASCE 7-16

Se aplicó el método estático equivalente para la evaluación sísmica del edificio, siguiendo las disposiciones del NEC-2015 y el ASCE 7-16, con el objetivo de determinar el cortante basal y su distribución a lo largo de la altura de la estructura. Posteriormente, se verificó el desempeño general mediante un modelado estructural.

3.5.1 Levantamiento geométrico y elaboración de planos en AutoCAD

Como primer paso, se desarrolló la geometría de la estructura tomando como referencia el esquema arquitectónico y el sistema estructural seleccionado. Esta información se utilizó para crear, en AutoCAD, los planos base que incluyen ejes, dimensiones generales, ubicación de columnas, vigas de amarre/dinteles y elementos de confinamiento. Todo esto con el objetivo de

asegurar la coherencia geométrica y facilitar el modelado posterior. En esta etapa se definieron las luces, alturas, alineaciones y la continuidad estructural.

3.5.2 Exportación e implementación del modelo en Robot Structural Analysis

Después de completar el diseño estructural, se trasladó la geometría al entorno de Autodesk Robot Structural Analysis, donde se desarrolló el modelo analítico basado en la definición de nodos y elementos como vigas y columnas, garantizando la alineación con los ejes y niveles previamente definidos. En esta fase se asignaron:

Definición de las líneas estructurales con los ejes globales alineados a X, Y y Z, utilizadas tradicionalmente para garantizar la correcta orientación del modelo y asegurar que las cargas se apliquen adecuadamente en las direcciones principales.

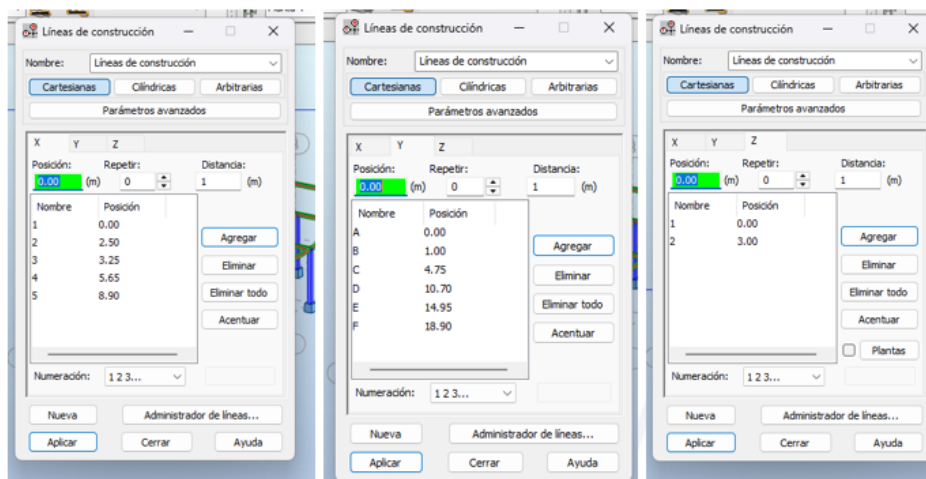


Ilustración 12 Aplicación de cuadrillas

Asignación de los materiales, considerando que las propiedades mecánicas del hormigón y del acero se encuentran especificadas por las normativas vigentes.

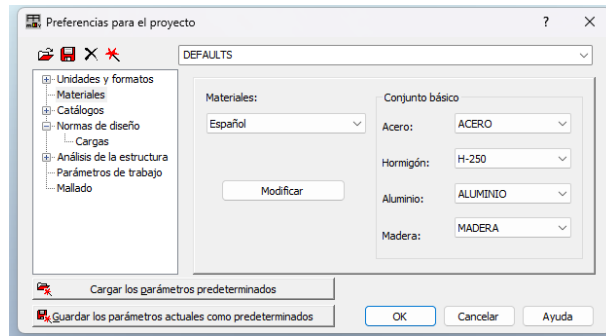


Ilustración 13 Asignación de materiales

Definición previa de las secciones correspondientes a los elementos estructurales, tales como vigas, columnas y demás componentes resistentes, en concordancia con el sistema estructural previamente establecido.

Columnas

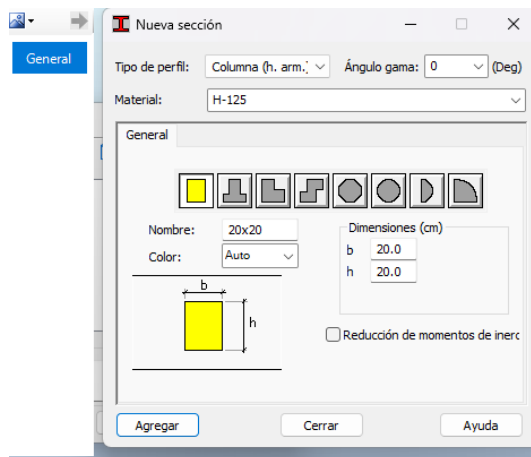


Ilustración 14 Definición de sección – columnas

Vigas

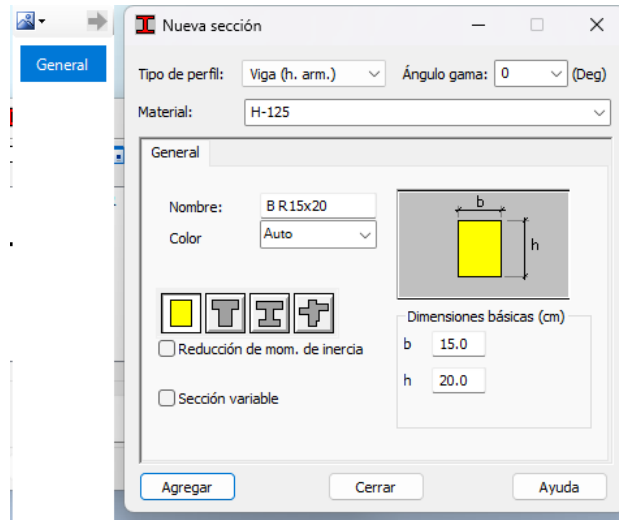


Ilustración 15 Definición de sección – vigas

Determinación de los apoyos y las restricciones, con el propósito de simbolizar la interacción entre la estructura y el terreno, así como el comportamiento esperado del suelo.

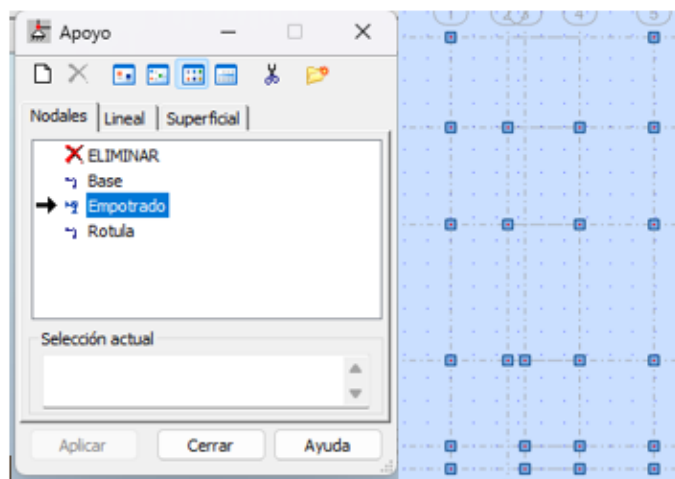


Ilustración 16 Empotramiento

Especificación de los diafragmas y las posibles desalineaciones, con el fin de garantizar que los elementos estructurales trabajen de manera conjunta al ser sometidos a cargas laterales.

Establecimiento de los estándares necesarios para el análisis y diseño estructural dentro de las herramientas de software, bajo el cumplimiento de los requerimientos de NEC-2015 y ASCE 7-16.

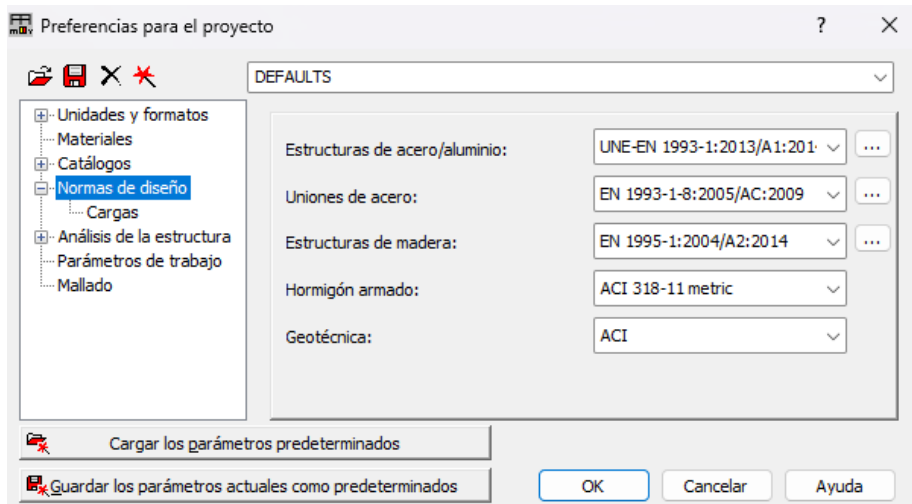


Ilustración 17 Aplicaciones de cargas

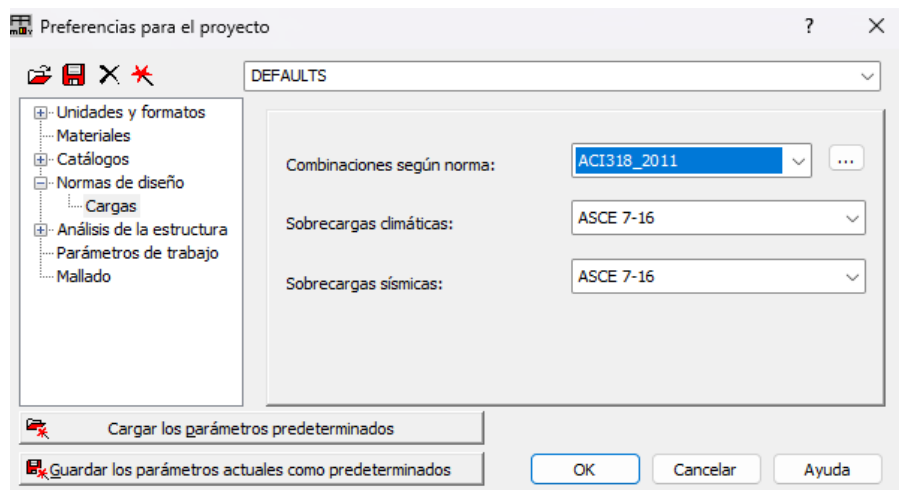


Ilustración 18 Aplicaciones de cargas 2

Verificación del modelo bidimensional para que represente adecuadamente el comportamiento de la vivienda bajo cargas gravitacionales y sísmicas.

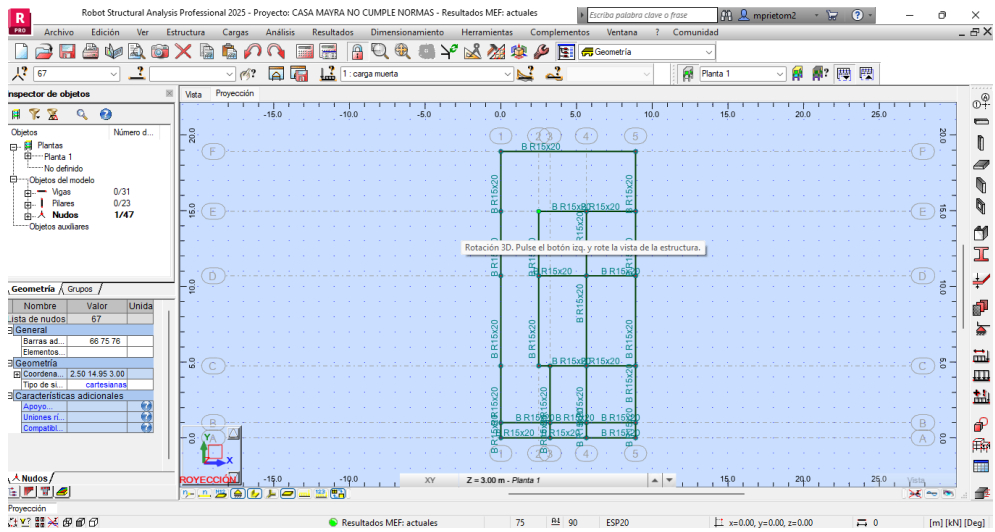


Ilustración 19 Modelo bidimensional

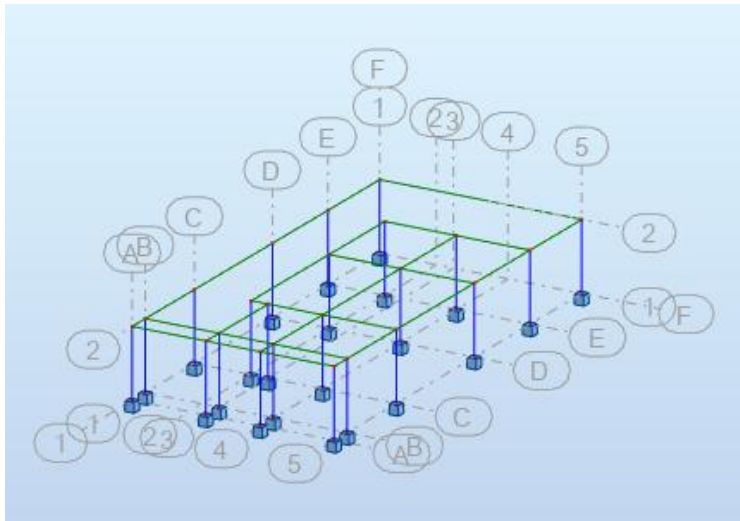


Ilustración 20 Vista 3D

3.5.3 Definición de cargas gravitacionales

Se calculó el peso propio de la estructura, el cual fue considerado automáticamente por el software a partir de las propiedades inherentes a los materiales y las características geométricas de las secciones estructurales previamente definidas. Posteriormente, se incorporaron las cargas muertas (D) correspondientes a los elementos no estructurales y otros componentes permanentes del sistema de cubierta.

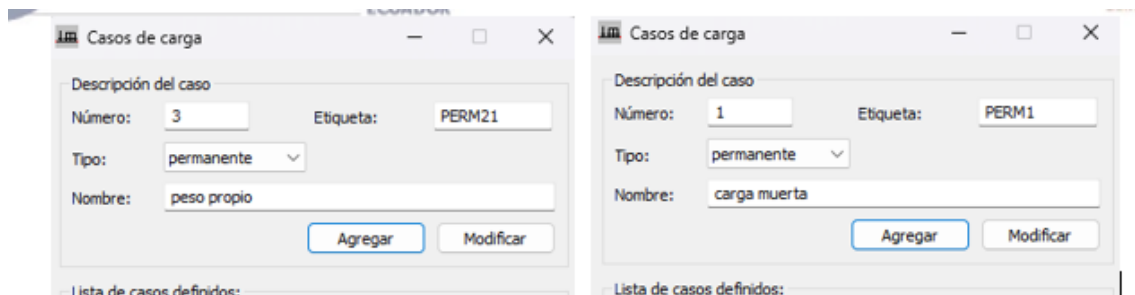


Ilustración 21 Aplicaciones de casos de carga muerta.

La carga viva (L) asociada al uso de la edificación fue establecida para esta sección, que cuenta con cubierta, adoptándose un valor específico de 1.0 kN/m². Conforme a las disposiciones normativas establecidas en el NEC-2015 y el ASCE 7-16, se consideró el porcentaje de carga viva que contribuye al peso sísmico, en función del tipo de uso asignado a la edificación.

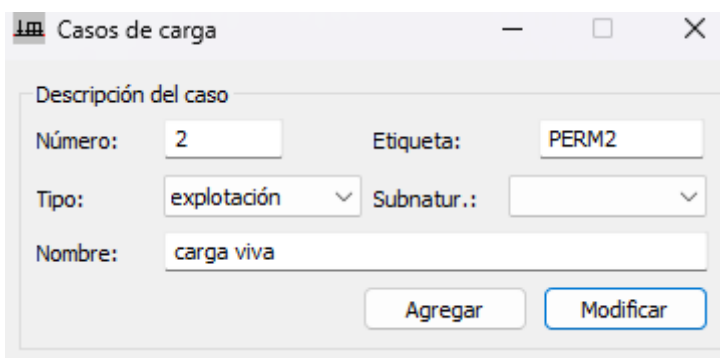


Ilustración 22 Aplicación de carga viva

A partir de la combinación del peso propio, las cargas muertas y la fracción correspondiente de la carga viva, se calculó el peso sísmico efectivo W . Dicho valor fue empleado subsecuentemente para determinar la fuerza cortante basal mediante la aplicación del método estático equivalente.

Caso/Planta	Nombre	Masa (kg)
1/ 1	Planta 1	30856.82
2/ 1	Planta 1	30856.82
3/ 1	Planta 1	30856.82

Ilustración 23 Peso de la vivienda

3.5.4 Determinación de parámetros sísmicos según la NEC-2015 – ASCE 7-16

Dado que la ubicación del proyecto es Guayaquil tipo de suelo D, se obtuvieron los parámetros necesarios relacionados con el espectro y las demandas sísmicas según lo requerido por las normativas. Para ello, se identificaron:

Zona sísmica = 0.40 - ALTO

Tabla 1 Zona sísmica

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Tabla 2 Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4					

Tabla 3 Fd: Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamiento para diseño en roca

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Tabla 4 Fs.: Comportamiento no lineal de los suelos

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Tabla 5 I: Coeficiente de importancia

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coeficiente I
Edificaciones esenciales	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

n: Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0.1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado.

✚ $\eta = 1.80$: Provincias de la Costa (excepto Esmeraldas).

✚ $\eta = 2.48$: Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos

✚ $\eta = 2.60$: Provincias del Oriente

Configuración en elevación y configuración en planta

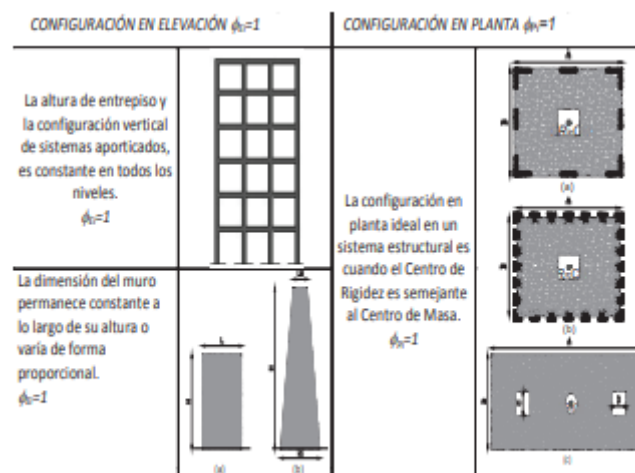


Tabla 11 : Configuraciones estructurales recomendadas

Ilustración 24 Configuración en elevación y configuración en planta

Factor R

Sistemas Estructurales de Ductilidad Limitada	R
Pórticos resistentes a momento	
Hormigón Armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM , limitados a viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 metros.	3
Hormigón Armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM con armadura electrosoldada de alta resistencia	2.5
Estructuras de acero conformado en frío, aluminio, madera, limitados a 2 pisos.	2.5

Ilustración 25 Factor R

S_s = Aceleración espectral a período corto = 0.75

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

Ilustración 26 S_s = Aceleración espectral a período corto

S_1 = Aceleración espectral a período largo = 0.5

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at 1-s Period					
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2 ^a	2.0 ^a	1.9 ^a	1.8 ^a	1.7 ^a
E	4.2	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

Ilustración 27 S_1 = Aceleración espectral a período largo

3.5.5 Cálculo del cortante basal mediante el método estático equivalente

A partir de los parámetros sísmicos proporcionados, se determinó el cortante basal V , que corresponde a la fuerza sísmica total en la base que la estructura debe soportar. En términos generales, la NEC-2015 es coherente con la ASCE 7-16 en los siguientes aspectos:

- ✚ Se calcula un coeficiente sísmico basado en el espectro de respuesta, el período aproximado de vibración y los factores R e I .
- ✚ Se determina el peso sísmico efectivo (W).
- ✚ A partir de estos datos, se obtiene el valor del cortante basal utilizando la fórmula correspondiente.

$$V = \frac{I S_a(T_a)}{R \phi_p \phi_e} W$$

Ecuación 6 Cortante Basal

Dónde

- ✚ $S_a(T_a)$ Espectro de diseño en aceleración;
- ✚ ϕ_P y ϕ_E Coeficientes de configuración en planta y elevación
- ✚ I Coeficiente de importancia; se determina en la sección
- ✚ W Carga sísmica reactiva

Capítulo IV

4.1 Resultados obtenidos

4.1.1 Resultados obtenidos de la inspección visual

FICHA DE INSPECCIÓN ESTRUCTURAL (ACI 201.1R - NEC-SE-HM)

Tabla 6 FICHA DE INSPECCIÓN 1

FECHA: 2/11/2025		INSPECTOR: Francisco Alexander Davila Galan Mayra Alejandra Prieto Maldonado	
UBICACIÓN	Cooperativa Juan Montalvo	TIPO DE ESTRUCTURA	Hormigón armado
ELEMENTO INSPECCIONADO	Muro interior con recubrimiento/enlucido	CONDICIÓN GENERAL	Humedad evidente
TIPO DE DAÑO	Manchas por humedad	SEVERIDAD	Afecta un área amplia del paño, pero no se observan desprendimientos
DIMENSIONES DEL DAÑO	Aproximadamente 70–90% del paño presenta manchado por humedad	CAUSA PROBABLE	Humedad por falta de impermeabilización
NORMATIVA APLICADA	ACI 201.1R / ACI 562 / NEC-SE-HM		



Ilustración 28 Humedad

Tabla 7 FICHA DE INSPECCIÓN 2

FECHA:	2/11/2025	INSPECTOR:	Francisco Alexander Davila Galan Mayra Alejandra Prieto Maldonado
UBICACIÓN:	Cooperativa Juan Montalvo	TIPO DE ESTRUCTURA:	Hormigón armado
ELEMENTO INSPECCIONADO:	Columna de hormigón armado con elemento metálico empotrado (viga/perfil de acero)	CONDICIÓN GENERAL:	La columna presenta deterioro superficial, humedad persistente, manchas verdosas
TIPO DE DAÑO:	Deterioro superficial del concreto por humedad	SEVERIDAD:	El daño afecta un elemento estructural (columna) comprometiendo la durabilidad y pudiendo generar pérdida de sección del acero y reducción de la capacidad resistencia
DIMENSIONES DEL DAÑO:	Área aproximada afectada: 0.20 m ² a 0.40 m ² , con mayor deterioro puntual en el interfaz concreto-acero.	CAUSA PROBABLE:	Ingreso de humedad Empotramiento o anclaje no diseñado estructuralmente
NORMATIVA APLICADA:	ACI 201.1R / ACI 562 / NEC-SE-HM		



Ilustración 29 Corrosión

Tabla 8 FICHA DE INSPECCIÓN 3

FECHA:	2/11/2025	INSPECTOR:	Francisco Alexander Davila Galan Mayra Alejandra Prieto Maldonado
UBICACIÓN:	Cooperativa Juan Montalvo	TIPO DE ESTRUCTURA:	Hormigón armado
ELEMENTO INSPECCIONADO:	Muro de cerramiento con recubrimiento (enlucido) adyacente a columna de hormigón armado	CONDICIÓN GENERAL:	Regular
TIPO DE DAÑO:	Fisura inclinada en el recubrimiento superficial del muro (fisura no estructural)	SEVERIDAD:	Media
DIMENSIONES DEL DAÑO:	Fisura con una longitud aproximada de 0.80 m a 1.20 m y abertura menor a 1 mm, distribuida de forma continua sobre el paño del muro	CAUSA PROBABLE:	Asentamiento diferencial de la edificación.
NORMATIVA APLICADA:	ACI 201.1R / ACI 562 / NEC-SE-HM		



Ilustración 30 Fisura no estructural

4.1.2 Resultados obtenidos del ensayo de esclerometría

El ensayo de esclerometría se realizó con un ángulo de 0° (impacto horizontal), que es la condición sugerida para columnas y elementos verticales, lo que ayuda a reducir las correcciones por gravedad. Para cada elemento estructural, se llevaron a cabo impactos en diferentes puntos, calculando el promedio del índice de rebote y el IE ajustado. Esto nos permitió determinar la resistencia gráfica (kg/cm²).

Los resultados presentan variaciones entre los elementos, lo que es coherente con construcciones existentes donde intervienen factores como la calidad de la mezcla original, el curado, la segregación, el recubrimiento, la humedad y la posible carbonatación o corrosión. Se encontraron elementos con resistencia moderada (viguería), otros con resistencia aceptable (columnas 2 y 3), y un elemento con resistencia baja (columna 1). Adicionalmente, se presenta un caso clasificado como “CONCRETO POBRE”

Tabla 9 Ensayo de esclerometría - columnas

COLUMNAS			
Nº	1	2	3
Promedio	23	29.875	34.5
Resistencia	128.78 kg/cm ² (12.63 MPa)	223.46 kg/cm ² (21.91 MPa)	296.54 kg/cm ² (29.08 MPa)
Error	± 37.87 kg/cm ² (± 3.71 MPa)	± 49.82 kg/cm ² (± 4.89 MPa)	± 59.62 kg/cm ² (± 5.85 MPa)
Rango	90.91 a 166.66 kg/cm ² (8.92 a 16.34 MPa)	73.64 a 273.29 kg/cm ² (17.03 a 26.80 MPa)	236.93 a 356.16 kg/cm ² (23.23 a 34.93 MPa)
Resistencia final conservadora	90.91 kg/cm ² 8.92 MPa	173.64 kg/cm ² 17.03 MPa	236.93 kg/cm ² 23.23 MPa


Tabla 10 Ensayo de esclerometría - vigas

VIGA	
N°	1
Promedio	25.875
Resistencia	166.20 kg/cm ² (16.30 MPa)
Error	± 43.28 kg/cm ² (± 4.24 MPa)
Rango	122.92 a 209.48 kg/cm ² (12.05 a 20.54 MPa)
Resistencia final conservadora	122.92 kg/cm ² 12.05 MPa

Viga 2 (“CONCRETO POBRE”)

El análisis de esclerometría arrojó un índice de rebote promedio de 15,9; no obstante, este resultado incluye lecturas de cero, correspondientes a los impactos que no generaron un rebote del martillo (lecturas nulas), lo cual afecta negativamente la confiabilidad del valor promedio obtenido. De acuerdo con el procesamiento realizado en Excel y la clasificación establecida, la muestra ha sido catalogada como "HORMIGÓN MALO", ya que con estas condiciones de medición no es posible emplear un índice de esclerometría modificado (Ie modificado).

Graficas del ensayo

 Columna 1

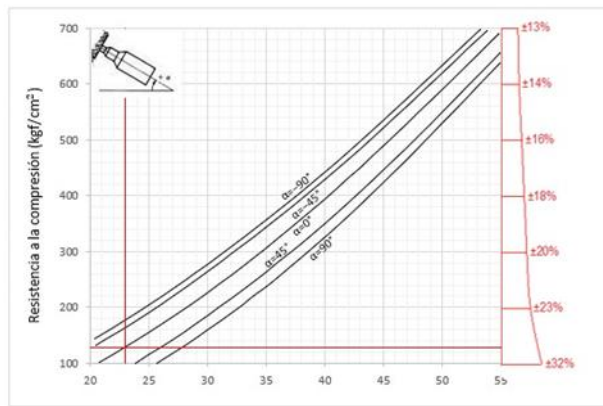


Ilustración 31 Ensayo de esclerometría columna 1

✚ Columna 2

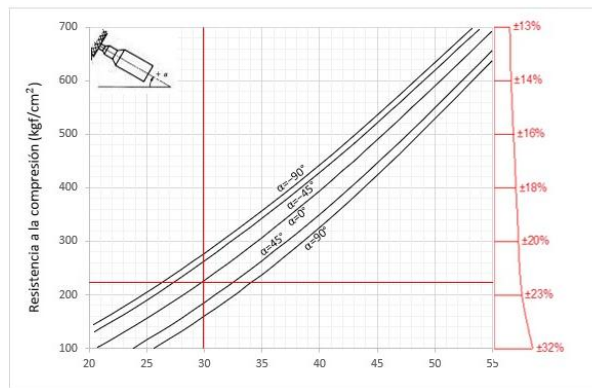


Ilustración 32 Ensayo de esclerometría columna 2

✚ Columna 3

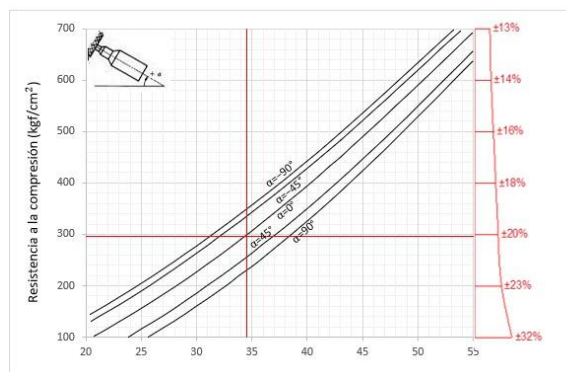


Ilustración 33 Ensayo de esclerometría columna 3

🚧 Viga 1

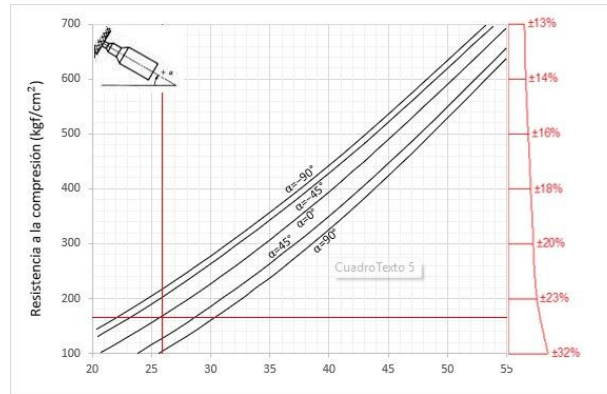


Ilustración 34 Ensayo de esclerometría viga

4.1.3 Resultados del análisis estructural Robot

Diseño basado en Fuerzas

$$W := 302.71 \text{ kN}$$

Peso de las estructuras:

Irregularidades y coeficientes de configuración estructural

Irregularidad de planta $\phi_p := 1$

Irregularidad de elevación $\phi_e := 1$

- 🚧 En Robot, se va a Análisis > Tipos de análisis > Conversión de carga a masa.
- 🚧 Se convierte la carga muerta a masa con coeficiente 1 (la norma indica que la carga sísmica se basa en carga muerta).

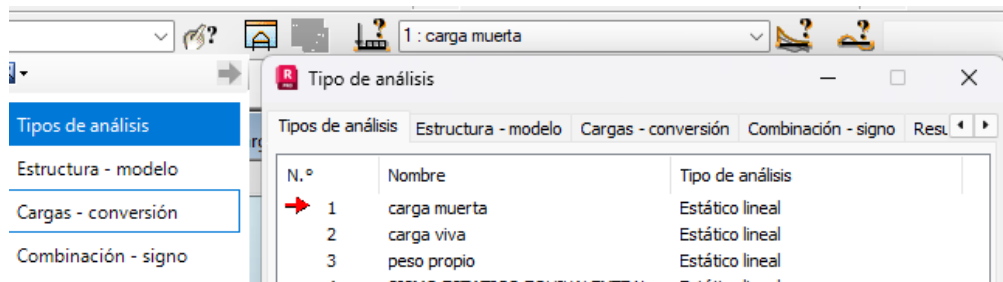


Ilustración 35 Conversión de cargas a masa

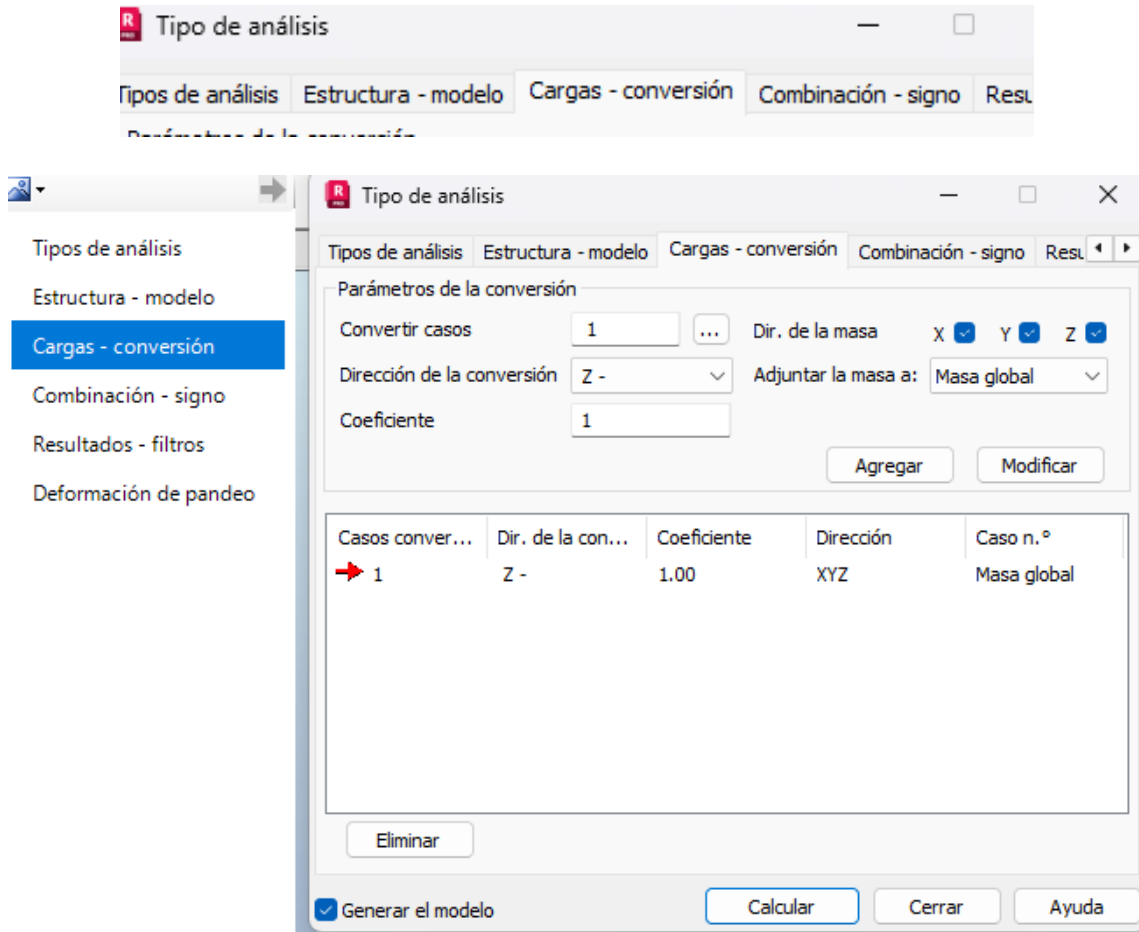


Ilustración 36 Cargas - Conversión

Cortante basal de diseño - NEC-SE-DS 6.3.2

$$\frac{\eta \cdot Z \cdot Fa}{R \cdot \phi_p \cdot \phi_e} \cdot \frac{W}{1000} = 87.18 \text{ N}$$

$$V := 87.19 \text{ kN}$$

$$\frac{V}{W} = 0.288$$

- ✚ Se calcula el cortante basal total (aproximadamente 87.15 kN).
- ✚ Se obtiene el coeficiente de corte basal (cortante/peso) = 0.288.
- ✚ Se va a la pestaña de cargas > cargas especiales > cargas fictias.

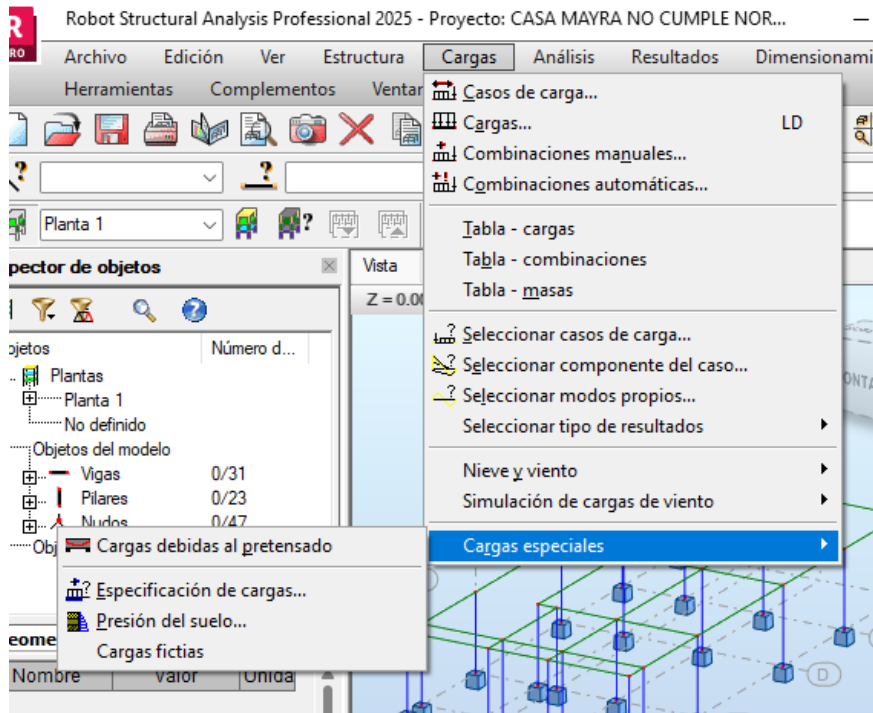


Ilustración 37 Cargas especiales

- ✚ Se escribe "Sismo estático equivalente NEC". Tanto para X y Y
- ✚ Se eligen las cargas muertas y peso propio para aplicar el coeficiente de conversión calculado (0.288).
- ✚ Se genera la carga sísmica equivalente

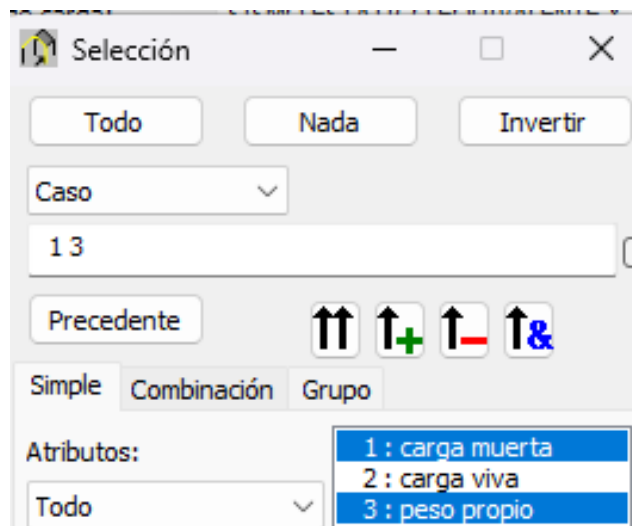


Ilustración 38 Carga sísmicas equivalente

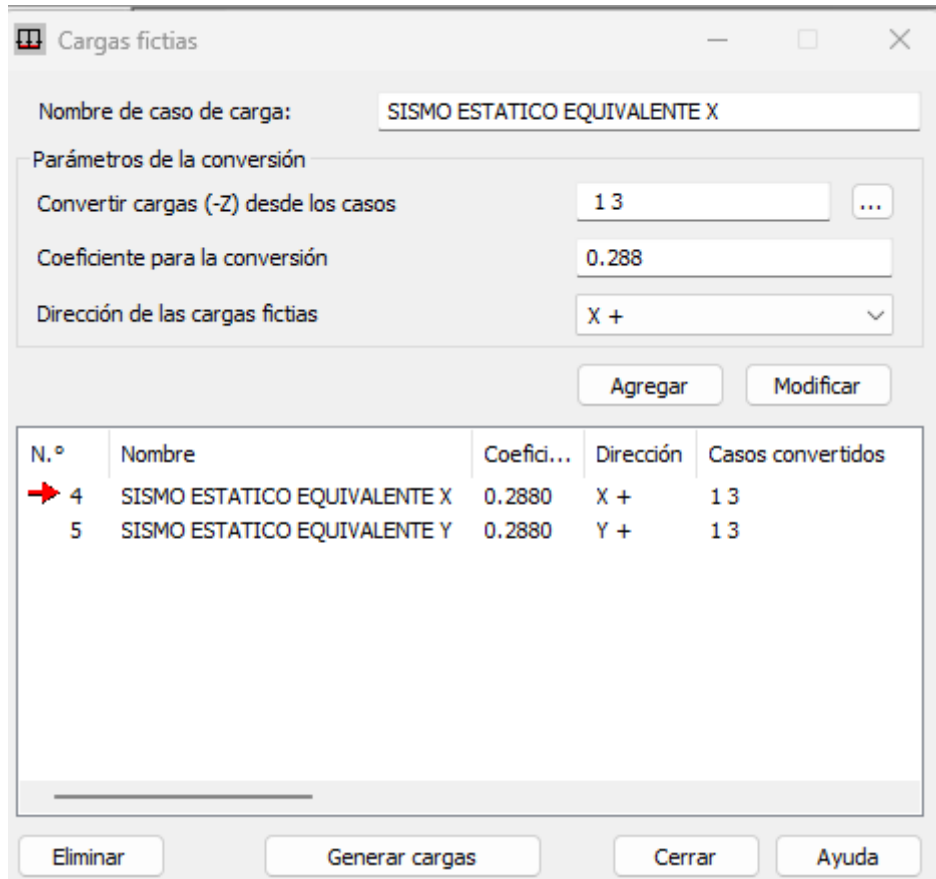


Ilustración 39 Sismo Estático equivalente X-Y

- ✚ Se recalcula el modelo con la carga sísmica.
- ✚ Se revisan las reacciones en la tabla de reacciones para el caso de sismo.
- ✚ Obtenemos el cortante basal

Caso 4	SISMO ESTATICO EQUIVALENTE X					
Suma final	-59.93	0.00	0.00	0.03	-98.59	0.78
Suma de reaccio	-59.93	0.00	0.00	-0.00	-150.55	481.54
Suma de esfuer	59.93	0.0	0.0	0.0	150.55	-481.54
Verificación	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00
Precisión:	4.63404e-14	1.04281e-28				

Ilustración 40 Cortante basal

- ✚ Se valida que el método y los valores son correctos para una primera estimación ya que la diferencia es 0.69%.

Crear un nuevo análisis sísmico automático

- ✚ En Robot Structural Analysis, ir a Tipos de análisis > Nuevo > Análisis sísmico.

- ✚ Seleccionar el método Fuerza lateral equivalente.
- ✚ En la configuración, elegir la normativa ASCE 7-16, que es la más cercana a la NEC 2015.
- ✚ Elegir el tipo de estructura (en el ejemplo, estructura de acero en ambas direcciones).

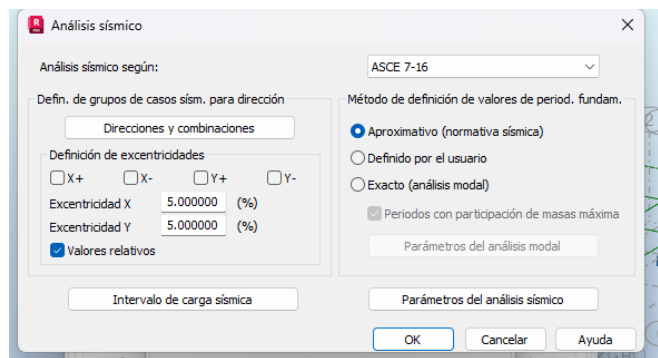
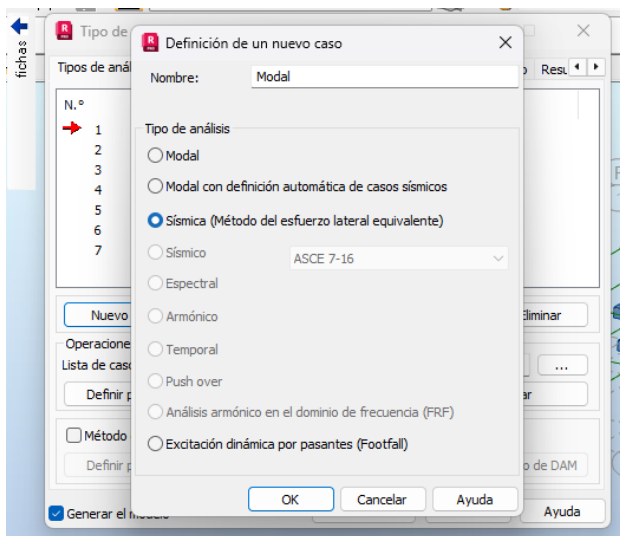


Ilustración 42 Análisis ASCE 7-16

Ilustración 41 Método del esfuerzo lateral equivalente

- ✚ Definir el período fundamental de la estructura:
- ✚ Puede ser definido por el usuario o aproximado mediante la expresión del código.
- ✚ Ingresar los valores de aceleración espectral S_s y S_1 para la ubicación específica en este caso es guayaquil
- ✚ Factor de importancia
- ✚ Factor de reducción de resistencia
- ✚ Coeficientes de configuración estructural

✚ En ambas direcciones X y Y

Ilustración 44 Valor S1

Ilustración 43 Valor Ss

✚ Ejecutar el cálculo.

✚ Revisar la tabla de reacciones para obtener el corte basal calculado automáticamente

Caso 6	ASCE 7-16 Dirección_X					
Suma final	-60.52	0.00	0.0	0.02	-114.11	0.93
Suma de reaccio	-60.52	0.00	0.0	-0.00	-181.56	478.33
Suma de esfuer	60.52	0.0	0.0	0.0	181.56	-478.33
Verificación	0.00	0.00	0.0	-0.00	0.00	-0.00
Precisión:	7.70540e-14	1.44582e-28				

Ilustración 45 Cortante Basal - ASCE 7-16

✚ Comparar el corte basal obtenido con el método manual y el automático.

✚ En el ejemplo, el método automático da un valor mayor (aprox. 60.52 kN) que el manual (87.15 kN).

✚ Esto se debe a que ASCE 7-16 genera un espectro menos exigente que la NEC 2015.

Ajustar valores de Ss y S1 para aproximar NEC 2015

- ✚ Calcular un factor de corrección para Ss y S1 basado en la relación entre los valores de la NEC y ASCE 7-16.

$$SDS = 0.6 \text{ (ESTE VALOR SALE EN ROBOT)}$$

$$\frac{n * Z * Fa}{SDS} = \frac{1.8 * 0.4 * 1.2}{0.6} = 1.44$$

$$Ss = 1.44 * 0.75 = 1.08$$

$$S1 = 1.44 * 0.5 = 0.7$$

Ilustración 47 Valor corregido S1

Ilustración 46 Valor corregido Ss

- ✚ Ejecutar nuevamente el cálculo con los valores corregidos.
- ✚ Verificar que el corte basal calculado ahora sea cercano al valor manual (aprox. 87.15 kN).
- ✚ Revisar los parámetros del espectro y el período fundamental para confirmar que están dentro de los rangos permitidos.

Caso 6	ASCE 7-16 Dirección_X					
Suma final	-77.56	0.00	-0.00	0.02	-146.25	1.19
Suma de reaccio	-77.56	0.00	-0.00	-0.00	-232.69	613.03
Suma de esfuer	77.56	0.0	0.0	0.0	232.69	-613.03
Verificación	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00
Precisión:	3.07388e-14	1.47913e-28				

Ilustración 48 Cortante Basal Corregido - ASCE 7-16

CAPITULO V

5.1 Análisis de los resultados

5.1.1 Análisis de la inspección Visual

Se llevó a cabo una revisión visual minuciosa de los componentes estructurales y no estructurales de la edificación situada en la Cooperativa Juan Montalvo. El propósito de esta revisión fue detectar manifestaciones patológicas visibles que sirvan para el diagnóstico.

La inspección reveló la presencia de diversas patologías, siendo las más comunes las relacionadas con la humedad, fisuras superficiales y desgaste localizado en los recubrimientos de los muros y elementos de hormigón armado. Se encontraron fisuras inclinadas y verticales en el recubrimiento de los muros de cerramiento, las cuales se clasificaron como daños no estructurales.

En cuanto a los elementos estructurales, especialmente las columnas, se observaron áreas con deterioro en la superficie del concreto, persistente humedad y conexiones metálicas empotradas que no fueron instaladas adecuadamente, además de evidencias de corrosión. Estos daños son de gravedad mayor debido a su impacto directo en la durabilidad de la estructura. Las observaciones realizadas en esta etapa inicial ayudaron a identificar áreas críticas donde se podrían llevar a cabo ensayos no destructivos y fundamentaron la necesidad de analizar la calidad mecánica del concreto presente.

5.1.2 Análisis del ensayo no destructivo (esclerometría)

Columna 1

✚ Índice de rebote promedio: $R \approx 23$

✚ Resistencia estimada: $\approx 128.8 \text{ kg/cm}^2$ (12.6 MPa)



Ilustración 49 Columna Central

La resistencia calculada para esta columna es considerablemente baja en comparación con los valores estándar de concreto utilizado en construcciones residenciales, que oscilan entre 18 y 21 MPa. Un bajo índice de rebote registrado evidencia una dureza superficial disminuida, lo que implica que se trata de un concreto con deficiencia en calidad mecánica, probablemente debido a una relación agua/cemento demasiado alto o a un mal proceso de curado durante su colocación.

Desde la perspectiva estructural, esta columna se considera un componente esencial, ya que su resistencia estimada se halla cerca del límite inferior permitido para estructuras de soporte. Por lo tanto, no sería prudente usar el valor promedio; en su lugar, es preferible aplicar un valor más conservador en el análisis estructural.

Columna 2

- ✚ Índice de rebote promedio: $R \approx 29.9$
- ✚ Resistencia estimada: $\approx 223.5 \text{ kg/cm}^2$ (21.9 MPa)



Ilustración 50 Columna Esquinera

Columna 3

- ✚ Índice de rebote promedio: $R \approx 34.5$
- ✚ Resistencia estimada: $\approx 296.5 \text{ kg/cm}^2$ (29.1 MPa)



Ilustración 51 Columna Lateral

Esta columna presenta el mejor desempeño mecánico entre los elementos evaluados. Los altos valores de índice de rebote reflejan una alta dureza superficial, lo cual se asocia a un concreto de buena calidad, con adecuada dosificación y curado.

La resistencia estimada es superior a la requerida para viviendas de un piso, lo que indica que este elemento no constituye una deficiencia estructural. Su comportamiento confirma la heterogeneidad del concreto en la edificación, ya que coexisten elementos de buena y baja calidad.

Vigas

Para evaluar la resistencia del concreto se aplicó la esclerometría en vigas, siguiendo la norma ACI 228. 2R / ASTM C805 y colocándola de forma horizontal (0°), obteniendo así los resultados siguientes:

Viga 1: Resistencia estimada f'_c aproximadamente 16.30 MPa, con un rango de variación según el método de 12.05 a 20.54 MPa (concreto de resistencia baja a moderada, para fines de análisis estructural se considera el valor más cauteloso);



Ilustración 52 Viga 1

Viga 2: Se registraron índices de rebote notablemente bajos (\bar{R} aproximadamente 15.9) sin correlaciones confiables con las curvas de referencia del equipo, lo que clasifica este concreto como de calidad deficiente, por lo tanto, no se le puede asignar un valor de resistencia, destacándose como el elemento más crítico de la evaluación.



Ilustración 53 Viga hormigón pobre

5.1.3 Análisis de la discrepancia entre el cortante basal calculado manualmente y el sismo estático equivalente obtenido en software.

Se calculó el cortante basal utilizando el método de estática equivalente, aplicando dos enfoques: uno manual y otro mediante un análisis con software especializado en estructuras. El valor del cortante basal obtenido de forma manual siguió las pautas establecidas por los estándares.

En el análisis manual, se determinó un cortante basal de $V = 87.19 \text{ kN}$, resultado que fue obtenido aplicando criterios cautelosos en la evaluación del peso sísmico efectivo y en los parámetros de diseño sísmico apropiados.

Por otra parte, el estudio de sismo estático equivalente efectuado en Robot Structural Analysis reveló cortantes basales cercanos a $\Sigma F_X \approx 59.93 \text{ kN}$ y $\Sigma F_Y \approx 59.93 \text{ kN}$ en las direcciones principales, incrementando este último valor hasta llegar a 77.56 kN cuando los criterios espectrales fueron más rígidos y se basaron en ASCE 7-16. Estos resultados son el resultado de sumar las reacciones en la base del modelo estructural, verificando de esta manera el equilibrio del sistema total.

La discrepancia entre el valor calculado manualmente (87.19 kN) y el obtenido a través del programa informático se puede atribuir a las distintas suposiciones empleadas en cada análisis. El cálculo manual se basa en un enfoque normativo que es más simplificado y cauteloso, mientras que el programa realiza una modelación estructural que depende de cómo se define la fuente de masa, la rigidez asignada y el período del modelo estructural. Además, el edificio en cuestión es una casa ya existente que no fue construida siguiendo

normas sismorresistentes, lo que también contribuye a generar incertidumbre sobre la representación real de la masa y la rigidez de esta.

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) y la normativa estadounidense (ASCE 7 / ACI 562), ambos métodos el cálculo manual del cortante basal y el análisis por sismo estático equivalente en el programa son aceptables para construcciones bajas y regulares, como la casa analizada. Es importante señalar que la normativa no requiere que los resultados sean idénticos en este caso, sino que lo que se busca es hacer un análisis consistente que cumpla con los criterios de seguridad.

CAPITULO VI

6.1 Plan de intervención estructural (ACI 562-19 y NEC – 2015)

Con base en la inspección visual, las pruebas esclerometrías y el análisis estructural, se elaboró un plan de intervención para restaurar la resistencia, la rigidez lateral y la capacidad de servicio. En función del nivel de riesgo, las intervenciones propuestas se priorizan según los principios de la norma ACI 562-19.

Intervenciones recomendadas que se realizan en base a actividades para reparar o mejorar el daño, controlar sus causas y prevenir su recurrencia.

Prioridad 1 (Inmediata): Patologías que ponen en peligro la seguridad (grietas graves, corrosión visible, desconchado, elementos estructurales con resistencia reducida o contención inadecuada).

Prioridad 2 (Correcta): Daños moderados que pueden agravarse (grietas por retracción, filtraciones, nidos de grava, cobertura inadecuada).

Prioridad 3 (Preventiva): Acciones para reducir la recurrencia (impermeabilización, drenaje, sellado, control de humedad, mantenimiento programado).

Estas prioridades también son consistentes con las normas NEC-2015 para reducir la vulnerabilidad sísmica: continuidad de los elementos estructurales, transferencia adecuada de cargas, control de irregularidades y mejora de los detalles cuando sea necesario.

6.2 Patología Identificadas

Durante la inspección visual, se identificaron las siguientes patologías principales:

- ✚ Corrosión del acero de refuerzo y del revestimiento.
- ✚ Nidos de grava (rayaduras) debido a la mala compactación del hormigón.
- ✚ Humedad, filtraciones y salinidad en los muros.
- ✚ Grietas no estructurales en elementos de mampostería.

6.3 Estrategias de intervención por patología

6.3.1 Corrosión del acero y desprendimiento del recubrimiento.

Esta patología se observa principalmente en columnas con un diámetro aproximado de 20 × 20 cm y una altura de 3,00 m, así como en vigas con un diámetro de 15 × 20 cm. La acción propuesta consiste en la retirada del hormigón dañado hasta alcanzar un material sano, la limpieza y el tratamiento del acero de refuerzo con agentes pasavantes anticorrosivos, y la restauración del revestimiento con mortero de reparación estructural. Esto debe garantizar que el proceso de curado y la protección superficial se apliquen correctamente.

El objetivo de este tratamiento es detener la corrosión, restaurar la protección del acero y aumentar la durabilidad del elemento estructural.

6.3.2 Nidos de grava y mala compactación del hormigón

Se han identificado ciertas zonas de árido expuesto donde falta la capa de pasta de cemento debido a una compactación insuficiente durante el vertido del hormigón. El plan de acción propuesto incluye la retirada local del material defectuoso, la limpieza a fondo de la zona afectada, la aplicación de una capa de adherencia y la reparación mediante mortero estructural o micro hormigón, seguida de un proceso de curado adecuado.

El objetivo de esta intervención es restaurar la superficie continua del elemento de hormigón, lo que contribuirá a prevenir la penetración de agua y la exposición a agentes agresivos.

6.3.3 Humedad, Filtraciones y eflorescencia

El problema de humedad se concentra en un muro de varios metros de alto y 0,73 metros de ancho y 3 metros de alto, debido a defectos de construcción en la caja de desagüe de la zona del garaje, que permite la entrada de agua al muro. También se ha identificado infiltración desde la cubierta, ya que la humedad en esta pared aumenta con la lluvia, formando manchas y provocando eflorescencias.

La intervención propuesta incluye la adecuación de la caja de desagüe, la eliminación de puntos de infiltración en la cubierta, el sellado de juntas o grietas, la limpieza de eflorescencias y la aplicación de un sistema de impermeabilización y protección superficial.

El objetivo de esta actuación es eliminar el origen de la humedad y evitar mayores daños a los elementos afectados.

6.3.4 Fisuras no estructurales en paredes

Se observaron fisuras muy finas en los muros de mampostería, relacionadas con fenómenos de retracción, variaciones térmicas y ligeros movimientos diferenciales, sin indicios de daño estructural. La intervención propuesta consiste en la limpieza y el corte superficial de las grietas, su sellado con morteros flexibles o selladores elastoméricos y un acabado superficial posterior.

Estas medidas evitan la entrada de humedad, mejoran el comportamiento funcional y mantienen la integridad de los acabados.

6.4 Fichas técnicas de intervención

Para cada patología identificada, se elaboran documentos técnicos que detallan las partes interesadas, el proceso de reparación, los materiales de referencia y el control de calidad requerido. Estos documentos sirven como guía técnica para la correcta ejecución de las intervenciones, según la filosofía de la norma ACI 562-19.

6.5 Presupuesto orientativo

PRESUPUESTO REFERENCIAL

RUBRO	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Reparación de las grietas de los muros de mampostería	ml	5.00	69.80	349.00
2	Reparación de humedad en muros	m ²	12.90	32.65	421.19
3	Reparación de recubrimiento de hormigón y de oxidación	ml	3.00	78.82	236.46
				SUBTOTAL	1.006.65
				IVA 15%	151.00
				TOTAL	1.157.65

6.6 Mantenimiento Preventivo

Además de las acciones correctivas, se propone un plan de mantenimiento preventivo que incluye inspecciones visuales periódicas, limpieza de techos y sistemas de drenaje, sellado oportuno de nuevas grietas y mantenimiento de los sistemas de impermeabilización. Esto tiene como objetivo prolongar la vida útil de la estructura y minimizar la recurrencia de estos problemas.

Se ha propuesto un plan de intervención estructural que aborda las deficiencias identificadas en la vivienda. Esto se lleva a cabo mediante técnicas de reparación conforme a las directrices de ACI 562-19 y los niveles de seguridad establecidos en NEC-2015. Además, la propuesta incluye una serie de acciones de mantenimiento preventivo que contribuyen a mejorar la durabilidad y el rendimiento del edificio.

CAPITULO VII

7.1 Conclusiones

Mediante la ejecución de este proyecto, se realizó un diagnóstico patológico exitoso de la estructura de hormigón armado de una vivienda unifamiliar ubicada en la zona de Juan Montalvo. Se emplearon inspecciones visuales, ensayos no destructivos y análisis estructural. Los resultados permitieron identificar las principales fuentes de daño estructural, relacionadas con problemas en la calidad del hormigón, la humedad y la oxidación en componentes estructurales críticos. El análisis sísmico estático, incluyendo el cálculo del esfuerzo cortante basal, permitió evaluar la respuesta general de la estructura a las fuerzas sísmicas. Finalmente, se diseñó un plan de acción técnica para mejorar el rendimiento estructural y la durabilidad de la vivienda, considerando los requisitos normativos y un enfoque preventivo.

La inspección se realizó a simple vista para observar patologías en los elementos de la estructurales de la vivienda, tanto estructurales como no estructurales. Esto permitió identificar y clasificar estos problemas. Se observaron pequeñas grietas, humedad crónica y desprendimiento de los revestimientos de las paredes, que se categorizaron como daños no estructurales. Sin embargo, se identificaron daños graves en las columnas, relacionados con el deterioro del hormigón y la oxidación de los elementos metálicos embebidos. El registro de los daños identificó áreas críticas que comprometían la durabilidad de la estructura. Este proceso proporcionó un punto de referencia para determinar las áreas de evaluación mediante ensayos no destructivos, así como para un posterior análisis estructural.

Las pruebas de esclerometría mostraron una variabilidad notable en la calidad del hormigón de la estructura, con resistencias estimadas que oscilaban entre niveles insuficientes e inaceptables en ciertas zonas y niveles aceptables en otras. En particular, se identificaron columnas y vigas con resistencias inferiores a las esperadas habitualmente para una vivienda residencial. Una viga

específica, considerada crítica desde el punto de vista estructural, presentaba hormigón de mala calidad. El modelado estructural de la vivienda mediante análisis ROBOT, combinado con una evaluación manual de las cargas basales, analizó el impacto de estas patologías en la rigidez y la resistencia global de la vivienda. Los resultados indican que las diferencias observadas entre ambos procedimientos de cálculo de fs son aceptables y se ajustan a la normativa, lo que valida el análisis para el caso de una vivienda existente de baja altura.

El diagnóstico de la patología, junto con los resultados del análisis estructural, permitió desarrollar un plan de intervención técnica que incluye acciones específicas para cada daño identificado. Este plan incluye guías técnicas de reparación, un presupuesto estimado y recomendaciones de mantenimiento preventivo. Cumple con las directrices de ACI 562-19 y NEC-2015, y se centra en la rehabilitación de los componentes estructurales más afectados y el control de los factores que aceleran el deterioro, en particular la humedad y evitar la corrosión. La implementación de estas medidas prolongará la vida útil de la construcción y mejorará su rendimiento estructural frente a cargas sísmicas y ambientales.

7.2 Recomendaciones

Es fundamental llevar a cabo el plan de intervención estructural propuesto, con especial atención a los elementos (como columnas, vigas, etc.) que presentan menor resistencia y mayor grado de deterioro (partes críticas), identificados mediante los resultados del esclerómetro. Todos los trabajos de reparación y refuerzo deben realizarse de acuerdo con las directrices de ACI 562-19 y NEC-2015.

Es fundamental eliminar y controlar los problemas de humedad dentro de la vivienda antes de iniciar cualquier intervención estructural. La humedad persistente acelera la degradación del

hormigón y promueve la corrosión del acero de refuerzo. Se recomienda encarecidamente mejorar los sistemas de drenaje, sellar grietas y aplicar soluciones impermeabilizantes.

Se recomienda limpiar y proteger el acero de refuerzo, especialmente en los elementos donde se haya identificado oxidación. Esto incluye la eliminación del hormigón dañado, la limpieza del acero y la restauración del revestimiento con mortero de reparación estructural. Estos pasos garantizan la durabilidad y el buen funcionamiento de los elementos reparados.

Para futuras intervenciones, ampliaciones o cambios de uso de la vivienda, se recomienda realizar un análisis estructural específico. Este análisis debe considerar los parámetros sísmicos actualizados y establecer un modelo que refleje con precisión el comportamiento real de la estructura. Esto debe realizarse bajo la supervisión de un ingeniero estructural certificado.

Bibliografía

ACI Committee 228. (2013). *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures First Printing June 2013 Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. www.concrete.org

ACI Committee 318-14. (2014). *ACI 318S-14*.

ACI Committee 364. (2019). *Guide for Assessment of Concrete Structures before Rehabilitation*. www.concrete.org

ACI Committee 562. (2019). *Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures (ACI 562-19) and Commentary An ACI Standard*. www.concrete.org

Ajay. (2021). *HANDBOOK ON REPAIR AND REHABILITATION OF RCC BUILDINGS*.

American Concrete Institute. (2008). *Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service First Printing*. <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-la->

construccion/legislacion-en-la-valuacion/aci-2011r-08-guia-para-realizar-una-inspeccion-visual-a-estructuras-de-concreto-en-servicio/79737402

ASTM International | *ASTM*. (n.d.). Retrieved November 19, 2025, from <https://www.astm.org/>

Basset Salom, L. (2023). *Basset - Proceso de diagnostico y tecnicas de inspeccion en estructuras de hormigon (1)*.

Concrete Durability. (n.d.).

De, N. E., & Construcción, L. A. (n.d.). *ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO*.

González-Moreno, H. R., Marín-Muñiz, J. L., López-Gonzalez, P. J., Moreno-Vazquez, O., Zamora-Castro, S. A., Monzón-Reyes, B. L., & Sangabriel-Lomeli, J. (2024a). Durability of Steel-Reinforced Concrete Structures Under Effect of Climatic Temporality and Aggressive Agents (CO₂, SO₂) in Boca del Rio, Veracruz. *Infrastructures 2024, Vol. 9, Page 207, 9(11)*, 207. <https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES9110207>

Guide to Concrete Repair. (2014). www.concrete.org

Helene, P., & Pereira, F. (2003). *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón reparación, refuerzo y protección*.

Hollaway, L. C., & Leeming, M. B. (1999). *Strengthening of reinforced concrete structures Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*.

Morais, J. M. P. de, Silva, A. M. da, Barboza, E. N., Silva, E. M. da, & Oliveira, B. B. de. (2020). Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado: uma revisão. *Research, Society and Development*, 9(7), e759974964–e759974964. <https://doi.org/10.33448/RSD-V9I7.4964>

Mousavi, S. S., Mousavi Ajarostaghi, S. S., & Bhojaraju, C. (2020). A critical review of the effect of concrete composition on rebar–concrete interface (RCI) bond strength: A case study of

nanoparticles. *SN Applied Sciences* 2020 2:5, 2(5), 1–23. <https://doi.org/10.1007/S42452-020-2681-8>

Onofre, A. F., Galvão, R. B., Torrecilhas, A. R., Schwantes-Cezario, N., Caviglione, G. T., Christoni, A. R. F., Vedovatte, R. M., & Pianucci, M. N. (2021). Application of the GUT technique in pathological manifestations in reinforced concrete structures and their corrections. *Research, Society and Development*, 10(8), e18510817271. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17271>

Padra Rafael. (2020). *492359654-Patologia-estructural*.

Romea, C. (n.d.). *El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario*. <https://doi.org/10.3926/oms.199>

Tomo Calavera José. (2005, May 1). *Patología de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado - José Calavera Tomo | PDF | Derecho | Hogar, jardinería y bricolaje*. <https://es.scribd.com/document/630018273/Patologia-de-Estructuras-de-Hormigon-Armado-y-Pretensado-Jose-Calavera-tomo>

8.2 Anexos

Tabla 11 FICHA TÉCNICA 01 - Corrosión del acero y desprendimientos del recubrimiento

Ítem	Descripción
Elemento afectado	Columnas de hormigón armado (20 × 20 cm, h ≈ 3,00 m) y vigas (15 × 20 cm)
Patología	Corrosión del acero de refuerzo y desprendimiento del recubrimiento
Causa probable	Presencia de humedad, recubrimiento insuficiente y falta de protección superficial
Objetivo de la intervención	Detener el proceso de corrosión, proteger la armadura y restituir el recubrimiento
Procedimiento	1) Delimitación y picado del concreto deteriorado hasta material sano. 2) Limpieza mecánica del acero (cepillado o arenado).

	<p>3) Aplicación de pasivado anticorrosivo.</p> <p>4) Aplicación de puente de adherencia.</p> <p>5) Reparación con mortero estructural de reparación.</p> <p>6) Curado adecuado y protección superficial.</p>
Materiales referenciales	Pasivador anticorrosivo, mortero estructural de reparación, puente de adherencia, recubrimiento impermeable
Control de calidad	Verificación de concreto sano, adecuada adherencia, espesor de recubrimiento y curado
Prioridad	Alta

Tabla 12 FICHA TÉCNICA 02- Cangrejas por mala compactación

Ítem	Descripción
Elemento afectado	Vigas y columnas de hormigón armado
Patología	Nidos de grava (cangrejas) y porosidad del concreto
Causa probable	Deficiente vibrado o compactación durante el vaciado del hormigón
Objetivo de la intervención	Restituir la continuidad del elemento y evitar ingreso de humedad
Procedimiento	<p>1) Demolición localizada del concreto defectuoso.</p> <p>2) Limpieza y humedecimiento de la superficie.</p> <p>3) Aplicación de puente de adherencia.</p> <p>4) Relleno con mortero estructural o microconcreto.</p> <p>5) Curado adecuado del material reparado.</p>
Materiales referenciales	Mortero estructural de reparación, microconcreto, puente de adherencia
Control de calidad	Eliminación total del material defectuoso, adecuada compactación del mortero, curado
Prioridad	Media – Alta

Tabla 13 FICHA TÉCNICA 03 - Humedad, Filtraciones y eflorescencia

Ítem	Descripción
Elemento afectado	Pared con área aproximada de 0,73 m × 3,00 m
Patología	Humedad, filtraciones y eflorescencias

Causa probable	Ingreso de agua por cubierta, juntas, fisuras o drenaje deficiente
Objetivo de la intervención	Eliminar la fuente de humedad y proteger los elementos
Procedimiento	1) Identificación de la fuente de filtración. 2) Corrección de drenajes, canaletas o juntas. 3) Limpieza de eflorescencias. 4) Sellado de fisuras y juntas. 5) Aplicación de sistema impermeabilizante.
Materiales referenciales	Sellantes elastoméricos, impermeabilizante, pintura protectora
Control de calidad	Verificación de estanqueidad y continuidad del sistema impermeable
Prioridad	Alta

Tabla 14 FICHA TÉCNICA 04 - Fisuras no estructurales en paredes

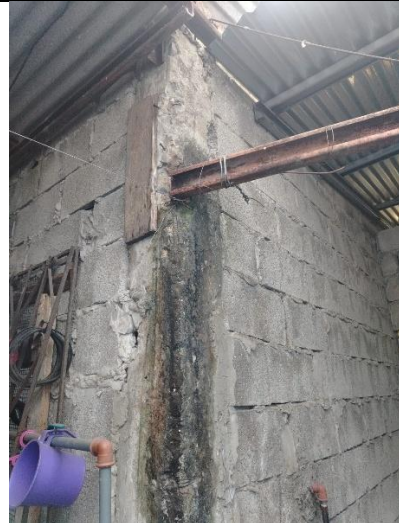
Ítem	Descripción
Elemento afectado	Paredes de mampostería
Patología	Fisuras finas no estructurales
Causa probable	Retracción del mortero, variaciones térmicas y movimientos diferenciales menores
Objetivo de la intervención	Evitar ingreso de humedad y deterioro de acabados
Procedimiento	1) Limpieza de la fisura. 2) Apertura superficial en forma de “V” (si aplica). 3) Sellado con mortero flexible o sellante elastomérico. 4) Acabado superficial y repintado.
Materiales referenciales	Mortero flexible, sellante elastomérico, pintura
Control de calidad	Verificación de sellado continuo y monitoreo posterior
Prioridad	Media

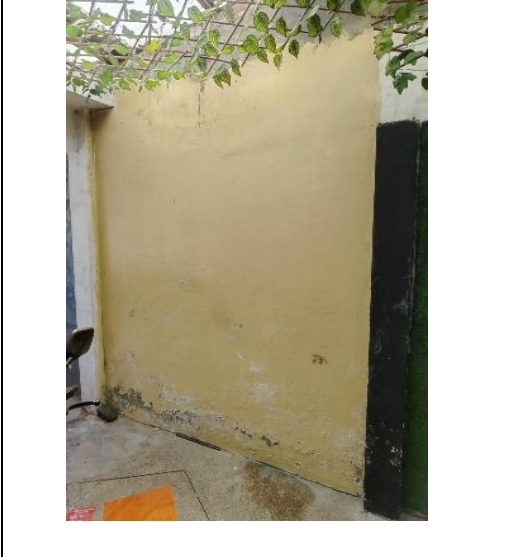
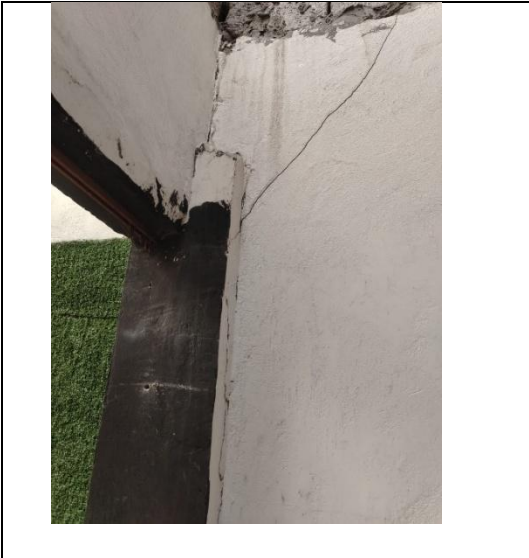
Evidencia

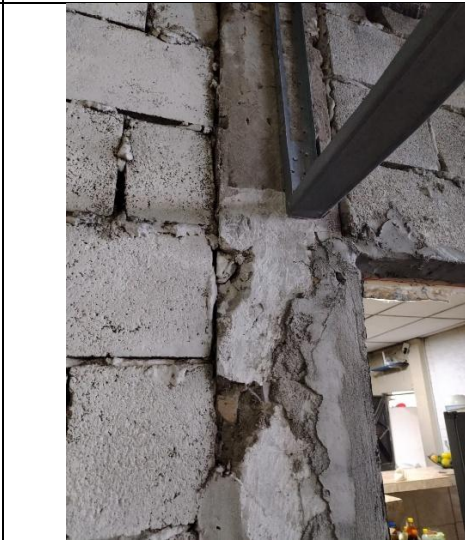
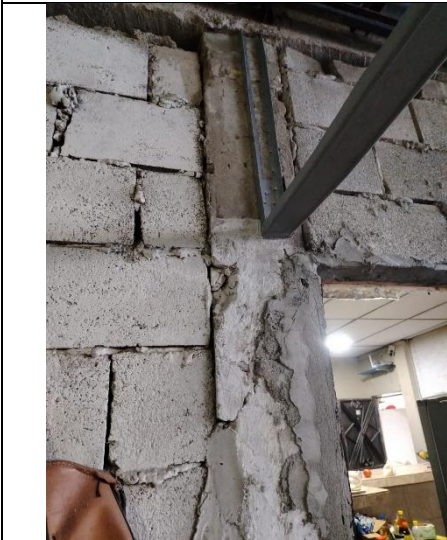
Entrevista al propietario



Registro fotográfico – Mapeo de daño







Mediciones con cinta metrica

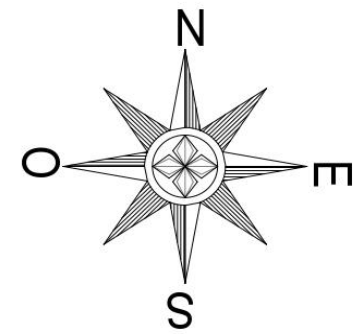
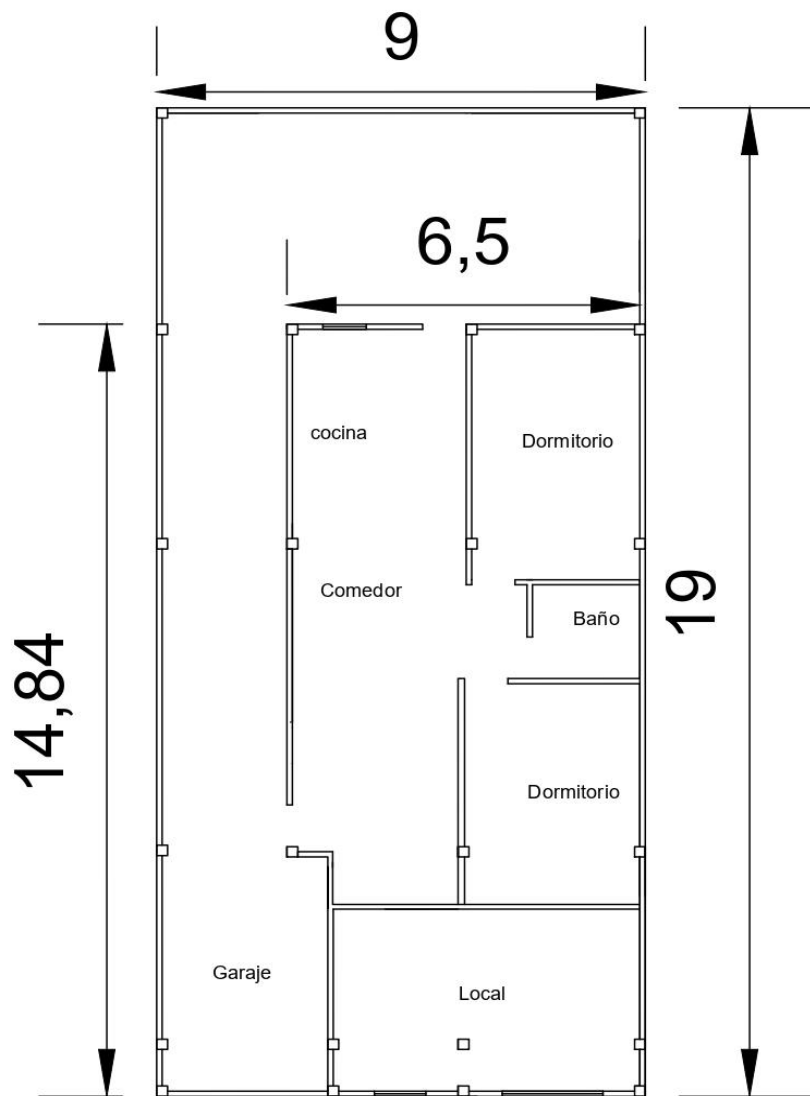




Ensayo de esclorometria







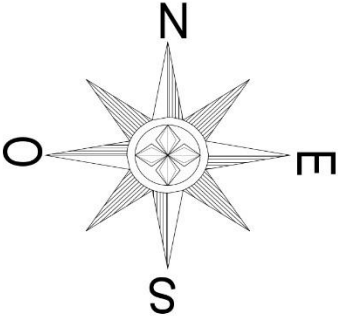
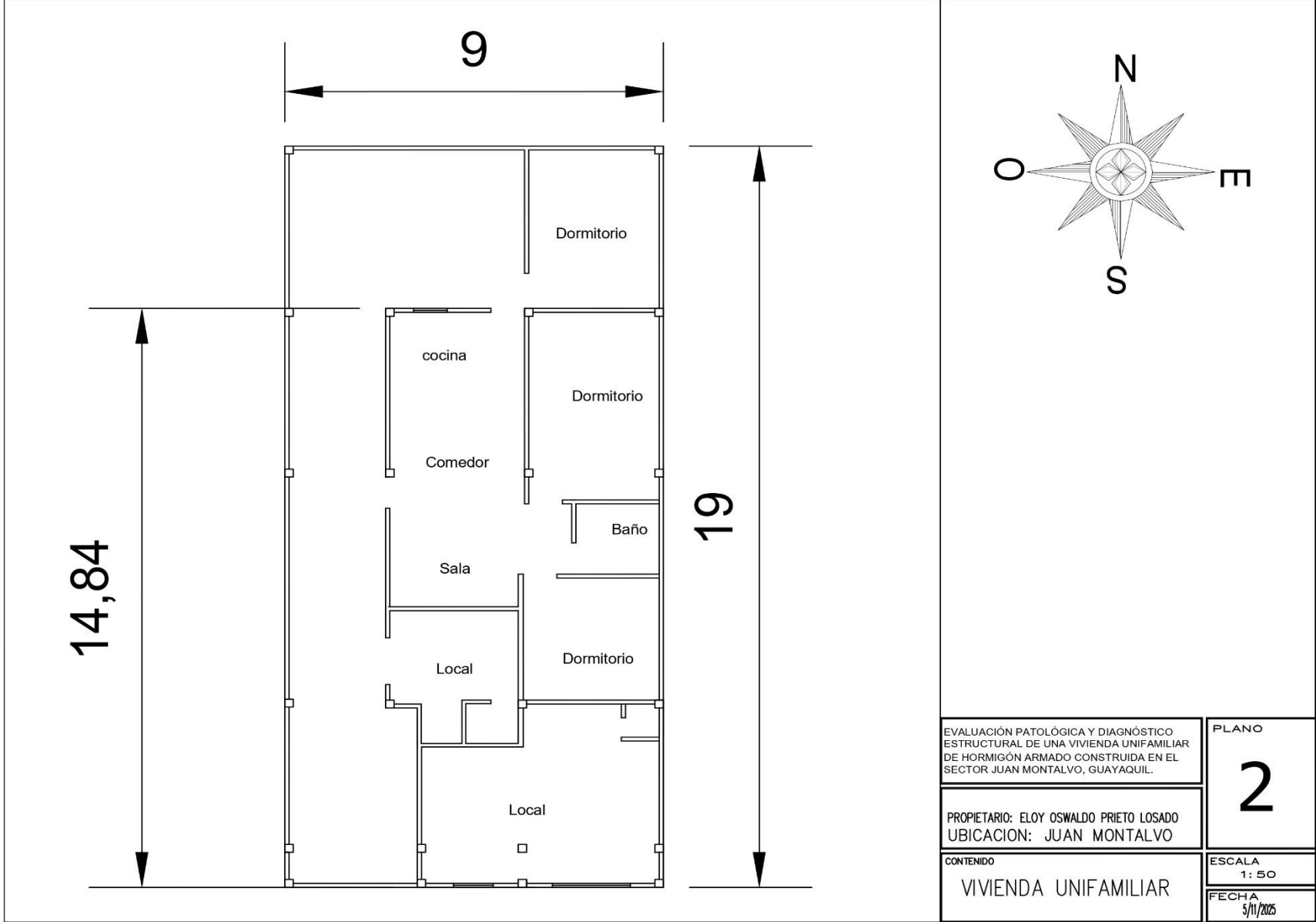
EVALUACIÓN PATOLÓGICA Y DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE HORMIGÓN ARMADO CONSTRUIDA EN EL SECTOR JUAN MONTALVO, GUAYAQUIL.

PLANO
1

PROPIETARIO: ELOY OSWALDO PRIETO LOSADO
UBICACION: JUAN MONTALVO

CONTENIDO
VIVIENDA UNIFAMILIAR

ESCALA
1: 50
FECHA
5/11/2025



EVALUACIÓN PATOLÓGICA Y DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE HORMIGÓN ARMADO CONSTRUIDA EN EL SECTOR JUAN MONTALVO, GUAYAQUIL.

PLANO
2

PROPIETARIO: ELOY OSWALDO PRIETO LOSADO
UBICACION: JUAN MONTALVO

CONTENIDO
VIVIENDA UNIFAMILIAR

ESCALA
1: 50
FECHA
5/11/2025

Tabla 15 Ensayo de esclerometría - columna 1

RESULTADO ESCLEROMETRIA	Angulo
	0°
PUNTOS	ELEMENTO ESTRUCTURAL
	Columna 1
1	21
2	20
3	28
4	19
5	24
6	18
7	19
8	25
9	20
10	27
PROMEDIO	23.00
IE CORREGIDO (xFC)	0.294
RESISTENCIA GRÁFICA (kg/cm2)	129
ERROR +/-	37.87

Tabla 16 Ensayo de esclerometría - columna 2

RESULTADO ESCLEROMETRIA	Angulo
	0°
PUNTOS	ELEMENTO ESTRUCTURAL
	Columna 2
1	28
2	30
3	30
4	31
5	32
6	28
7	24
8	23
9	29
10	31
PROMEDIO	29.88
IE CORREGIDO (xFC)	0.22
RESISTENCIA GRÁFICA (kg/cm2)	223

ERROR +/-	49.82
------------------	-------

Tabla 17 Ensayo de esclerometría - columna 3

RESULTADO ESCLEROMETRIA	Angulo
	0°
PUNTOS	ELEMENTO ESTRUCTURAL
	Columna 3
1	25
2	37
3	36
4	38
5	33
6	36
7	39
8	24
9	22
10	32
PROMEDIO	34.50
IE CORREGIDO (xFC)	0.20
RESISTENCIA GRÁFICA (kg/cm2)	297
ERROR +/-	59.62

Tabla 18 Ensayo de esclerometría - viga 1

RESULTADO ESCLEROMETRIA	Angulo
	0°
PUNTOS	ELEMENTO ESTRUCTURAL
	Viga 1
1	29
2	18
3	17
4	28
5	23
6	24
7	21
8	31
9	26
10	25
PROMEDIO	25.88
IE CORREGIDO (xFC)	0.26
RESISTENCIA GRÁFICA (kg/cm2)	166

ERROR +/-	43.28
------------------	-------

Tabla 19 Ensayo de esclerometría - viga 2

RESULTADO ESCLEROMETRIA	Angulo
	0°
PUNTOS	ELEMENTO ESTRUCTURAL
	Viga 2
1	20
2	0
3	20
4	16
5	22
6	0
7	21
8	25
9	18
10	17
PROMEDIO	15.90
IE CORREGIDO (xFC)	NO APLICA
RESISTENCIA GRÁFICA (kg/cm2)	CONCRETO POBRE
ERROR +/-	