

METODOLOGÍAS PARA LA INVESTIGACIÓN DE FALLAS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO



UNIVERSIDAD

ANDRÉS FELIPE MARTÍNEZ SALAZAR

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
BOGOTÁ D.C.

2023

METODOLOGÍAS PARA LA INVESTIGACIÓN DE FALLAS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO



PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA CIVIL, CON ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

ANDRÉS FELIPE MARTÍNEZ SALAZAR

NANCY TORRES CASTELLANOS, Ph. D.
DIRECTORA

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
BOGOTÁ D.C.

2023

El proyecto de grado de maestría titulado “Metodologías para la investigación de fallas en estructuras de concreto” presentado por Andrés Felipe Martínez Salazar, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural.

Ph. D. Nancy Torres Castellanos
Directora

I.C. Carlos Eduardo Ruiz Navarro
Jurado

I.C. Juan José Betancourt Tafur
Jurado

Bogotá, D.C. Septiembre 2023

Dedicatoria

A mi padre, quien ha sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo para alcanzar esta meta, sus palabras de aliento llenas de amor, ternura, motivación y sabiduría han sido mi fortaleza en los momentos de desánimo y duda. Su confianza en mis habilidades y su constante respaldo han sido el motor que me ha impulsado a superar los desafíos y a perseverar en los momentos más difíciles. El presente trabajo de grado lleva impregnado su cariño, dedicación y entrega incondicional que son un ejemplo de amor puro el cual quiero honrar en estas líneas.

A mi madre, quien ha sido el pilar fundamental de apoyo en los momentos más difíciles, brindándome sus palabras reconfortantes y su compañía llena de cariño. Su tiempo dedicado a escucharme y sus abrazos silenciosos fueron cruciales para enfrentar los desafíos que surgieron durante la realización de este trabajo. Su invaluable presencia en los momentos de debilidad fue la fuente de inspiración que me impulsó a seguir adelante. Su constante compañía ha sido mi mayor consuelo y motivación para alcanzar esta meta, convirtiéndose en alguien irremplazable en mi corazón.

A mi hermano por encontrar siempre las palabras precisas para arrancar de mí una sonrisa en los momentos difíciles del desarrollo de este proyecto. Por ser ese amigo admirable, incondicional e invaluable con el que Dios me ha bendecido. Su empatía, paciencia y comprensión, junto con su compañía inequívoca, han sido fundamentales para superar las dificultades del camino. Su presencia y consejos han sido clave del éxito en este trabajo.

Dedico con profundo cariño este trabajo a ustedes, quienes han sido testigos del esfuerzo aquí plasmado.

Agradecimientos

A Dios por su guía, bendiciones, presencia y su sabiduría que han sido fundamentales en cada etapa de este proceso.

A la Doctora Nancy Torres por su invaluable guía y motivación durante todo el desarrollo de mi trabajo de grado. Su conocimiento experto, dedicación y apoyo incondicional han sido fundamentales para alcanzar este logro académico.

A mi padre por su invalorable apoyo, motivación, respaldo, aliento y sabiduría esenciales para alcanzar este logro.

A mi madre, su dedicación y apoyo incondicional han sido el motor que me impulsó a dar lo mejor de mí en este proyecto.

Resumen

La durabilidad de las estructuras se ha convertido en uno de los temas más importantes a tratar cuando se habla de edificaciones de concreto, esto sumado a la falta de divulgación de información referente a las fallas y dificultades que han llevado a un difícil tratamiento del conocimiento sobre las metodologías empleadas para su investigación en conjunto con la identificación de fallas y su prevención.

Se presenta seguidamente una revisión al estado general de las fallas que se han presentado en algunas obras civiles en donde se pretende dar a conocer las dificultades típicas de edificaciones en concreto en conjunto con sus causas y consecuencias partiendo por la exposición básica de diferenciación entre la ingeniería forense y la evaluación patológica y su papel dentro de un proceso de investigación de falla en estructuras de concreto.

El desarrollo del presente documento se enfoca en la investigación de fallas de estructuras de concreto con lo cual se parte por el análisis de posibles errores desde edades tempranas de la edificación como lo son las fases de diseño y concepción de la estructura, se transcurre seguidamente por edades de desarrollo como la construcción y supervisión hasta llegar a etapas de operación y mantenimiento de la edificación. Se enfatiza en las dificultades generales que pueden predominar cada una de las etapas anteriormente descritas, así como las consecuencias destacando las tipologías de falla a nivel catastrófico o funcional.

De la misma forma se aborda de manera detallada la particularidad de los tipos de fallas en estructuras de concreto con el fin de otorgar conocimientos básicos para un equipo investigador sobre la clasificación de causas específicas de falla de origen físico, químico, mecánico y biológico abordadas desde un punto de vista objetivo; se especifica cada una de estas acciones en conjunto con los mecanismos que las originan y que desencadenan afectaciones futuras de riesgo para la estructura.

Finalmente, habiendo determinado las causas generales y específicas de falla de una estructura de concreto se proporciona un panorama general de alternativas de técnicas de evaluación del deterioro de una estructura con el fin de cuantificar daños y por ende proponer soluciones viables basadas en los principios de la ingeniería estructural (economía, funcionalidad, seguridad, sostenibilidad ambiental y estética de las estructuras), esto con el fin de determinar el grado de intervención de la estructura siguiendo las etapas del análisis y evaluación para posteriormente proyectar labores de reparación, rehabilitación o repotenciación.

Se presenta de esta forma un documento explicativo de las metodologías de investigación de fallas en estructuras de concreto sabiendo que cada proyecto deberá contar con la particularidad de un estudio detallado y orientado concretamente a determinar el pronóstico y posteriormente el grado de intervención de la estructura considerando la particularidad de la ejecución y funcionamiento de cada uno de los posibles escenarios de una obra civil, por tanto será complejo hablar de una única metodología general de investigación de fallas válida para la evaluación de todas las estructuras.

Índice general

Capítulo I

| | |
|---------------------------|-----------|
| Introducción | 19 |
|---------------------------|-----------|

Capítulo II

| | |
|----------------------------|-----------|
| Marco teórico | 21 |
|----------------------------|-----------|

| | |
|--|----|
| 2.1 Análisis cualitativos..... | 23 |
| 2.1.1 <i>Diagramas de afinidad</i> | 24 |
| 2.1.2 <i>Diagramas de flujo</i> | 26 |
| 2.1.3 <i>Listas de chequeo o verificación</i> | 27 |
| 2.1.4 <i>Mapas mentales</i> | 29 |
| 2.2 Análisis semi-cualitativos..... | 31 |
| 2.2.1 <i>Árbol de análisis de falla (Fault Tree Analysis - FTA)</i> | 31 |
| 2.2.2 <i>Diagramas de causa y efecto</i> | 36 |
| 2.2.3 <i>Análisis de efectos y modos de falla (Failure Modes and Effects Analysis - AMEF)</i> | 39 |
| 2.2.4 <i>Graficas de bañera</i> | 39 |
| 2.2.5 <i>Gráfico de barras de Pareto</i> | 40 |
| 2.3 Análisis cuantitativos o físicos | 40 |

Capítulo III

| | |
|-----------------------|-----------|
| Objetivos..... | 43 |
|-----------------------|-----------|

| | |
|---------------------------------|----|
| 3.1 Objetivo general | 43 |
| 3.2 Objetivos específicos | 43 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| Capítulo IV | 44 |
|--------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| Evaluación patológica e ingeniería forense | 44 |
|---|-----------|

| | |
|--------------------------------------|----|
| 4.1 Accidentes | 47 |
| 4.2 Crímenes..... | 49 |
| 4.3 Eventos catastróficos | 49 |
| 4.4 Degradación de los bienes | 50 |
| 4.5 Distintos tipos de errores | 51 |

Capítulo V

| | |
|--|-----------|
| Investigación de fallas | 53 |
| 5.01 Cargas vivas..... | 53 |
| 5.02 Cargas muertas | 54 |
| 5.03 Cargas ambientales | 54 |
| 5.1 Métodos de diseño de estructuras en concreto | 56 |
| 5.1.1 Método de diseño de los esfuerzos admisibles de trabajo (ASD)..... | 56 |
| 5.1.2 Método de diseño de la resistencia última (LRFD)..... | 56 |
| 5.1.3 Método de diseño de los estados límites..... | 57 |
| 5.1.4 Método de diseño por desempeño | 57 |
| 5.2 Tipos de fallas..... | 58 |
| 5.2.1 Fallas catastróficas | 59 |
| 5.2.1.1 Fluencia excesiva: | 59 |
| 5.2.1.2 Fractura:..... | 61 |
| 5.2.1.3 Pandeo: | 63 |
| 5.2.1.4 Fatiga: | 64 |
| 5.2.1.5 Estabilidad: | 65 |
| 5.2.2 Fallas funcionales | 67 |
| 5.2.2.1 Agrietamientos | 67 |
| 5.2.2.2 Vibraciones excesivas..... | 68 |
| 5.2.2.3 Deflexiones excesivas..... | 69 |
| 5.2.2.4 Filtraciones | 71 |
| 5.2.2.5 Decoloraciones | 72 |
| 5.2.2.6 Delaminaciones | 73 |

| | |
|---|----|
| 5.2.2.7 Desprendimientos | 73 |
| 5.2.2.8 Alabeo de superficies..... | 74 |
| 5.3 Estudio de fallas..... | 75 |
| 5.4 Informe patológico | 77 |
| 5.4.1 Introducción:..... | 77 |
| 5.4.2 Alcance y metodología:..... | 77 |
| 5.4.3 Descripción de la estructura: | 77 |
| 5.4.4 Observaciones y evaluaciones:..... | 78 |
| 5.4.5 Análisis y conclusiones: | 78 |
| 5.4.6 Recomendaciones:..... | 78 |
| 5.4.7 Anexos:..... | 78 |

Capítulo VI

Causas de falla y deterioro de estructuras de concreto.....80

| | |
|--|-----|
| 6.1 Causas generales de falla..... | 81 |
| 6.1.1 Diseños | 81 |
| 6.1.2 Construcción..... | 87 |
| 6.1.3 Materiales..... | 91 |
| 6.1.4 Mantenimiento y operación..... | 94 |
| 6.2. Causas específicas de falla | 97 |
| 6.2.1 Físicas..... | 97 |
| 6.2.1.1 Cambios temperatura..... | 97 |
| 6.2.1.2 Cambios de humedad..... | 104 |
| 6.2.1.3 Asentamiento plástico | 107 |
| 6.2.1.4 Contracción plástica | 108 |
| 6.2.1.5 Movimientos durante la construcción | 110 |
| 6.2.1.6 Heladas tempranas..... | 110 |
| 6.2.2 Químicas..... | 111 |
| 6.2.2.1 Reacciones álcali-agregado (AAR – Alkali Aggregate Reactions)..... | 112 |
| 6.2.2.2 Ataque por ácidos | 120 |

| | |
|---|-----|
| 6.2.2.3 Carbonatación..... | 122 |
| 6.2.2.4 Ataque por sulfatos..... | 126 |
| 6.2.2.5 Lixiviación por aguas blandas..... | 130 |
| 6.2.2.6 Corrosión del acero de refuerzo..... | 131 |
| 6.2.3 <i>Mecánicas</i> | 138 |
| 6.2.3.1 Deficiencias estructurales:..... | 140 |
| 6.2.3.2 Vibraciones excesivas..... | 170 |
| 6.2.3.3 Abrasión..... | 170 |
| 6.2.4 <i>Biológicas</i> | 173 |
| 6.2.4.1 Bio-deterioro del concreto..... | 175 |
| 6.2.4.2 Bio-degradación de hidrocarburos..... | 177 |
| 6.2.4.3 Bio-corrosión de los metales..... | 177 |

Capítulo VII

Técnicas de evaluación de estructuras.....179

| | |
|--|-----|
| 7.1 Metodología para la evaluación de estructuras..... | 179 |
| 7.2 Técnicas de evaluación sobre el concreto..... | 184 |
| 7.3 Técnicas de evaluación sobre el acero de refuerzo..... | 189 |
| 7.4 Técnicas no destructivas..... | 191 |
| 7.5 Técnicas semi destructivas..... | 191 |
| 7.6 Técnicas destructivas..... | 192 |
| 7.8 Técnicas para el monitoreo estructural..... | 193 |
| 7.8.1 <i>Sensores de deformación</i> | 195 |
| 7.8.2 <i>Sensores de vibración</i> | 196 |
| 7.8.3 <i>Sensores de tensión y compresión</i> | 196 |
| 7.8.4 <i>Sensores de temperatura</i> | 196 |
| 7.8.5 <i>Sensores de humedad</i> | 197 |
| 7.8.6 <i>Sensores de corrosión</i> | 198 |
| 7.8.7 <i>Sensores de nivel de líquidos</i> | 200 |
| 7.8.8 <i>Sensores de aceleración sísmica</i> | 201 |

Capítulo VIII

| | |
|--|------------|
| Aplicación de metodologías de investigación de fallas | 203 |
| 8.1 Descripción del problema | 205 |
| 8.2 Desarrollo de la metodología..... | 205 |
| 8.2.1 <i>Ubicación</i> | 208 |
| 8.2.2 <i>Tipo de suelo</i> | 208 |
| 8.2.3 <i>Parámetros sísmicos</i> | 209 |
| 8.2.4 <i>Inspección visual (patologías)</i> | 209 |
| 8.2.5 <i>Sistema estructural</i> | 212 |
| 8.2.6 <i>Levantamiento geométrico</i> | 212 |
| 8.2.7 <i>Elaboración de planos</i> | 214 |
| 8.2.8 <i>Estimación de cargas</i> | 214 |
| 8.2.9 <i>Pruebas físicas no destructivas</i> | 214 |
| 8.2.10 <i>Determinación de irregularidades</i> | 215 |

Capítulo IX

| | |
|---|------------|
| Caso de estudio: colapso del puente Los Grillos..... | 218 |
|---|------------|

Capítulo X

| | |
|--|------------|
| Contribución, conclusiones y recomendaciones..... | 233 |
| Referencias | 236 |

Índice de ilustraciones

| | |
|--|----|
| Ilustración 1 Técnicas analíticas para la identificación de fallas..... | 23 |
| Ilustración 2 Diagrama de afinidad para identificación de fallas | 25 |
| Ilustración 3 Lista de chequeo para evaluación de estructuras AIS | 28 |
| Ilustración 4 Mapa mental de posibles causas de falla en puentes..... | 30 |
| Ilustración 5 Fractura en acabados de piso..... | 32 |
| Ilustración 6 Convenciones básicas para la elaboración de un árbol de análisis de fallas ... | 34 |
| Ilustración 7 Árbol de análisis de falla para caso de fractura de acabados de piso tipo baldosa cerámica..... | 35 |
| Ilustración 8 Diagrama de causa efecto para caso de fractura de acabados de piso tipo baldosa cerámica..... | 37 |
| Ilustración 9 Diagrama de causa efecto para evaluación de proceso de instalación de acabados de piso tipo baldosa | 38 |
| Ilustración 10 Esquema general de curva de bañera..... | 40 |
| Ilustración 11 Secuencia de imágenes del momento de la explosión en el puerto de Beirut. | 48 |
| Ilustración 12 Destrucción del puerto de Beirut a causa de la devastadora explosión..... | 48 |
| Ilustración 13 World Trade Center atentado del 11 septiembre de 2001. | 49 |
| Ilustración 14 Catástrofe nuclear en central de Fukushima I 11 marzo de 2011..... | 50 |
| Ilustración 15 Descubrimiento de pilotes soporte de pila principal en puentes | 51 |
| Ilustración 16 Falla de la torre 6 del edificio Space 12 de octubre de 2013, Medellín, Colombia. | 52 |
| Ilustración 17 Clasificación de algunos tipos de fallas en las estructuras | 59 |
| Ilustración 18 Falla a flexión en viga principal de puente..... | 60 |
| Ilustración 19 Comparativa gráfica entre grieta y fisura | 61 |
| Ilustración 20 Falla por fractura en viguetas de entrepiso..... | 62 |
| Ilustración 21 Pandeo en columna de concreto reforzado..... | 63 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Ilustración 22 | Falla por fatiga en puente de tres luces. | 64 |
| Ilustración 23 | Fallas por estabilidad externa de estructuras | 65 |
| Ilustración 24 | Falla por volcamiento de edificación. | 66 |
| Ilustración 25 | Agrietamiento por cambios de temperatura. | 67 |
| Ilustración 26 | Modelo dinámico idealizado de acción y control de vibraciones en estructura de concreto..... | 69 |
| Ilustración 27 | Falla por deflexión excesiva en losa de entrepiso de concreto..... | 70 |
| Ilustración 28 | Falla por filtraciones en tanque aéreo..... | 71 |
| Ilustración 29 | Decoloraciones y manchas en elemento de concreto. | 72 |
| Ilustración 30 | Falla por delaminación en piso de concreto. | 73 |
| Ilustración 31 | Falla por desprendimiento de la superficie de concreto. | 74 |
| Ilustración 32 | Falla por alabeo y cambio de volumen en losas de concreto. | 75 |
| Ilustración 33 | Causas de falla y deterioro de estructuras de concreto..... | 81 |
| Ilustración 34 | Cargas concentradas durante construcción de proyecto..... | 88 |
| Ilustración 35 | Alabeo del concreto por variación en la temperatura..... | 99 |
| Ilustración 36 | Ataque por congelamiento de una losa de concreto | 101 |
| Ilustración 37 | Esquema general de rotura del concreto ante ataque por fuego | 102 |
| Ilustración 38 | Daños por incendio en elementos de concreto | 104 |
| Ilustración 39 | Fisuración por asentamiento plástico | 108 |
| Ilustración 40 | Fisuras de contracción plástica..... | 109 |
| Ilustración 41 | Esquema general de fisuras vistas en planta por retracción plástica | 109 |
| Ilustración 42 | Lavado de la pasta de cemento por ataque químico | 112 |
| Ilustración 43 | Reacción álcali-agregado en elemento de concreto..... | 113 |
| Ilustración 44 | Mecanismo de reacción álcali agregado..... | 114 |
| Ilustración 45 | Mapa de terrenos geológicos con presencia de agregados potencialmente reactivos en Colombia. | 115 |
| Ilustración 46 | Concreto sometido a ataque por ácidos | 120 |
| Ilustración 47 | Tubería de concreto atacada por una disolución ácida..... | 121 |
| Ilustración 48 | Corte en probetas para evaluar frente de carbonatación..... | 125 |
| Ilustración 49 | Medición de frente de carbonatación en probeta..... | 125 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 50 Esquema general de ataque por sulfatos..... | 128 |
| Ilustración 51 Deterioro acentuado en las aristas del elemento por ataque de sulfatos..... | 129 |
| Ilustración 52 Ataque y exposición de acero de refuerzo por aguas blandas. | 131 |
| Ilustración 53 Esquema general de celda electroquímica de corrosión..... | 135 |
| Ilustración 54 Esquema de afectación de la corrosión sobre la masa de concreto | 136 |
| Ilustración 55 Tipos de corrosión electroquímica | 137 |
| Ilustración 56 Medición con fisurómetro del ancho de una fisura. | 138 |
| Ilustración 57 Esquema general de esfuerzos internos sobre elementos | 141 |
| Ilustración 58 Distribución general de esfuerzos internos ante cargas externas. | 142 |
| Ilustración 59 Distribución general de fisuras por tracción pura. | 143 |
| Ilustración 60 Probeta de ensayo sometida a tracción pura..... | 143 |
| Ilustración 61 Desarrollo de fisuras por flexión | 144 |
| Ilustración 62 Esquema general fisuras por flexión | 145 |
| Ilustración 63 Falla a flexión (fisuras perpendiculares a la dirección del acero longitudinal) | 146 |
| Ilustración 64 Esquema general falla por adherencia..... | 147 |
| Ilustración 65 Transmisión de fuerzas entre corrugas de acero de refuerzo y concreto..... | 147 |
| Ilustración 66 Falla longitudinal por adherencia del acero de refuerzo | 148 |
| Ilustración 67 Desarrollo de fisuras por corte | 148 |
| Ilustración 68 Falla de viga por cortante en proximidades al apoyo | 149 |
| Ilustración 69 Fisuras por corte en proximidad de apoyo de viga simplemente apoyada.. | 149 |
| Ilustración 70 Acción conjunta de fisuras por cortante y flexión..... | 150 |
| Ilustración 71 Esquema general de falla a torsión primaria | 151 |
| Ilustración 72 Distribución general de esfuerzos de corte y torsores y equivalencia de armadura para diseño de elementos a momento torsor. | 152 |
| Ilustración 73 Falla por torsión en pila..... | 153 |
| Ilustración 74 Esquema general de falla por punzonamiento..... | 154 |
| Ilustración 75 Punzonamiento de columna en placa | 154 |
| Ilustración 76 Esquema general de falla por cizalladura en sección compuesta de concreto | 155 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 77 Principales fallas por compresión..... | 156 |
| Ilustración 78 Falla por compresión en columna de concreto reforzado..... | 157 |
| Ilustración 79 Fisuración esperada por asentamiento de columna central | 158 |
| Ilustración 80 Falla por asentamiento diferencial en estructura de un piso..... | 159 |
| Ilustración 81 Colapso por viento del Tacoma Narrows Bridge | 160 |
| Ilustración 82 Flexión dúctil en muro de concreto | 162 |
| Ilustración 83 Fallas en muro de concreto durante sismo chile 2010..... | 163 |
| Ilustración 84 Explosión de ANFO y clorato de potasio en el club el Nogal, Bogotá año 2003 | 164 |
| Ilustración 85 Apoyo de viga mediante transición de colchón de neopreno | 167 |
| Ilustración 86 Fisuras por aplastamiento local en zona de anclaje de presfuerzo | 168 |
| Ilustración 87 Análisis mediante software de remoción de miembro estructural por impacto vehicular. | 168 |
| Ilustración 88 Desintegración del concreto en ensayo de cilindro a compresión..... | 169 |
| Ilustración 89 Desgaste por abrasión de superficie de concreto..... | 171 |
| Ilustración 90 Desgaste por abrasión en canal de concreto | 171 |
| Ilustración 91 Cavitación de estructura en concreto..... | 172 |
| Ilustración 92 Desgaste en la pasta de cemento por cavitación..... | 173 |
| Ilustración 93 Crecimiento de organismos en superficie de concreto | 174 |
| Ilustración 94 Ataque biológico en estructura de concreto | 177 |
| Ilustración 95 Metodología para la evaluación de estructuras | 180 |
| Ilustración 96 Tipos de sensores para medición de humedad | 198 |
| Ilustración 97 Técnicas para medición de nivel de los niveles de líquidos..... | 200 |
| Ilustración 98 Diagrama de flujo de metodología general para la evaluación de estructuras | 204 |
| Ilustración 99 Diagrama de flujo para investigación del estado de la estructura | 207 |
| Ilustración 100 Derrumbe en la vía sector Peña de Gallo | 218 |
| Ilustración 101 Colapso puente La Orquídea 1 | 220 |
| Ilustración 102 Desacople de juntas en puente La Leonera | 220 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 103 Diagrama de flujo para el planteamiento general de estrategia de evaluación para el caso de colapso del puente Los Grillos..... | 223 |
| Ilustración 104 Construcción puente Los Grillos | 224 |
| Ilustración 105 Distribución del evento sísmico en los departamentos de Meta y Cundinamarca..... | 226 |
| Ilustración 106 Colapso de puente Los Grillos | 227 |

Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1: Cambio del color y la resistencia a la compresión del concreto por variación en la temperatura | 103 |
| Tabla 2: Terrenos con presencia de agregados potencialmente reactivos en Colombia representados en la ilustración 45..... | 116 |
| Tabla 3: Principales ácidos inorgánicos, orgánicos y minerales dañinos para el concreto | 122 |
| Tabla 4: Medición cualitativa de la corrosión en barras de acero de refuerzo | 133 |
| Tabla 5: Guía de anchos permisibles de fisuras en estructuras de concreto reforzado | 139 |
| Tabla 6: Clasificación de fisuras y grietas en función a su ancho y grado de repercusión en las estructuras. | 140 |
| Tabla 7: Alteraciones producidas por microorganismos sobre los materiales de edificaciones. | 175 |
| Tabla 8: Efectos de los microorganismos en el concreto | 176 |
| Tabla 9: Métodos de ensayo para determinar condiciones y propiedades del concreto y acero de refuerzo | 184 |
| Tabla 10: Registro de colapso de puentes en Colombia desde el año 1986 hasta el año 2000 | 229 |
| Tabla 11: Colapsos representativos de puentes en Colombia..... | 231 |

Capítulo I

Introducción

Los estudios en ingeniería forense y patologías de estructuras en Colombia se ven muy limitados debido al costo que dichos procedimientos conllevan; se llega a tal punto que muchas veces resulta ser más económica la demolición total o parcial de la estructura afectada y la construcción de una totalmente nueva. Es así como el desarrollo de esta área en el país se ve limitado a un campo muy específico, en donde existan los recursos económicos para su ejecución, razón por la cual se cuenta con escaso número de profesionales dedicados a este oficio dentro del territorio nacional.

Debido a que se trata de un campo de desarrollo muy limitado se tiene la ausencia de programas académicos que fundamenten un conocimiento en el área de las patologías estructurales e ingeniería forense; esto radica en el hecho de que para desarrollar actividades conformes a la patología estructural, actualmente en el medio Colombiano no se encuentra una regulación que especifique un determinado título profesional, esto debido a que se trata de un campo en el que todo el conocimiento para su correcto desarrollo se obtiene mediante la experiencia.

La recopilación de documentación asociada a fallas de estructuras en el país es una de las principales problemáticas en la obtención de conocimientos en este campo ya que no se cuenta con una fuente en donde puedan consultarse las metodologías para la identificación de fallas aplicadas a casos reales de colapsos, adicionalmente existe una escasa divulgación de los casos de falla que se presentan en el país. Por lo tanto, existe la necesidad de contar con metodologías en donde se orienten los procedimientos que debe llevar a cabo un equipo de investigación forense para encontrar de manera asertiva, ordenada y optima las posibles causas de falla de una estructura (ruta de colapso) en conjunto con sus posibles consecuencias, es decir una explicación general de las metodologías existentes para la

identificación de fallas, con el fin de brindar pronósticos acertados sobre la ocurrencia de determinada patología o falla.

En tal sentido, es de esencial importancia el conocimiento de las causas y mecanismos de falla que presentan las estructuras para el mejoramiento de la ingeniería nacional ya que la ausencia de investigaciones formales y la recolección de datos no permiten generar criterios de seguridad para evitar futuros colapsos, pérdidas económicas y más importante aún, pérdida de vidas.

Es importante que el ingeniero en todo concepto (diseñador, constructor y revisor) se apropie de estos conocimientos durante la concepción de edificaciones nuevas ya que en muchas ocasiones se puede aprender mucho más de los errores que de los aciertos, quiere decir entonces que un ingeniero debe contar con ciertos criterios provenientes de la investigación de fallas de estructuras existentes, de esta manera se deberá estar en permanente actualización sobre temas relacionados con la seguridad estructural a fin de evitar incurrir en prácticas poco adecuadas que desenlacen en una tragedia como se ha visto en diversos casos del país y a nivel mundial.

Dados los antecedentes de fallas de obras civiles y poder determinar con una alta probabilidad las causas se requiere con urgencia una divulgación para el aporte profesional de la ingeniería de las metodologías para la investigación de fallas que permitan determinar la ruta de colapso de estructuras. Se presentan seguidamente las principales metodologías de investigación de falla en estructuras de concreto en conjunto con la explicación de sus aplicaciones, alcances puntuales, limitaciones, ventajas y desventajas.

Capítulo II

Marco teórico

Existe un reducido volumen de documentación nacional relacionada con la falla de estructuras de concreto, sin embargo, se cuenta con la presencia de textos reducidos pero valiosos en el área que aportan al desarrollo teórico. En dichos textos se pueden encontrar conceptos básicos sobre patología estructural e incluso sobre ingeniería forense; no obstante, la existencia de textos que ejemplifiquen de manera práctica las metodologías para la identificación de deficiencias estructurales o investigación de fallas es escasa.

De manera simplificada se puede reducir el problema de la identificación de deficiencias estructurales al investigar y llegar a una conclusión sobre el posible modo de falla de una determinada pieza o componente específica. Según Andersen (2006) “El análisis de la causa raíz es una investigación estructurada cuyo objetivo es identificar la verdadera causa de un problema y las acciones necesarias para eliminarla.”; para esto, será necesario incurrir en la investigación de los materiales que componen los elementos involucrados, el diseño de la estructura, el funcionamiento bajo condiciones normales, el uso que presenta o presentaba la estructura al momento de la falla, las etapas y procesos constructivos empleados y los registros de falla con los que se cuente como material de evidencia, ya sean testigos, videos, registros de usos atípicos, ocurrencia de fenómenos naturales, entre otros.

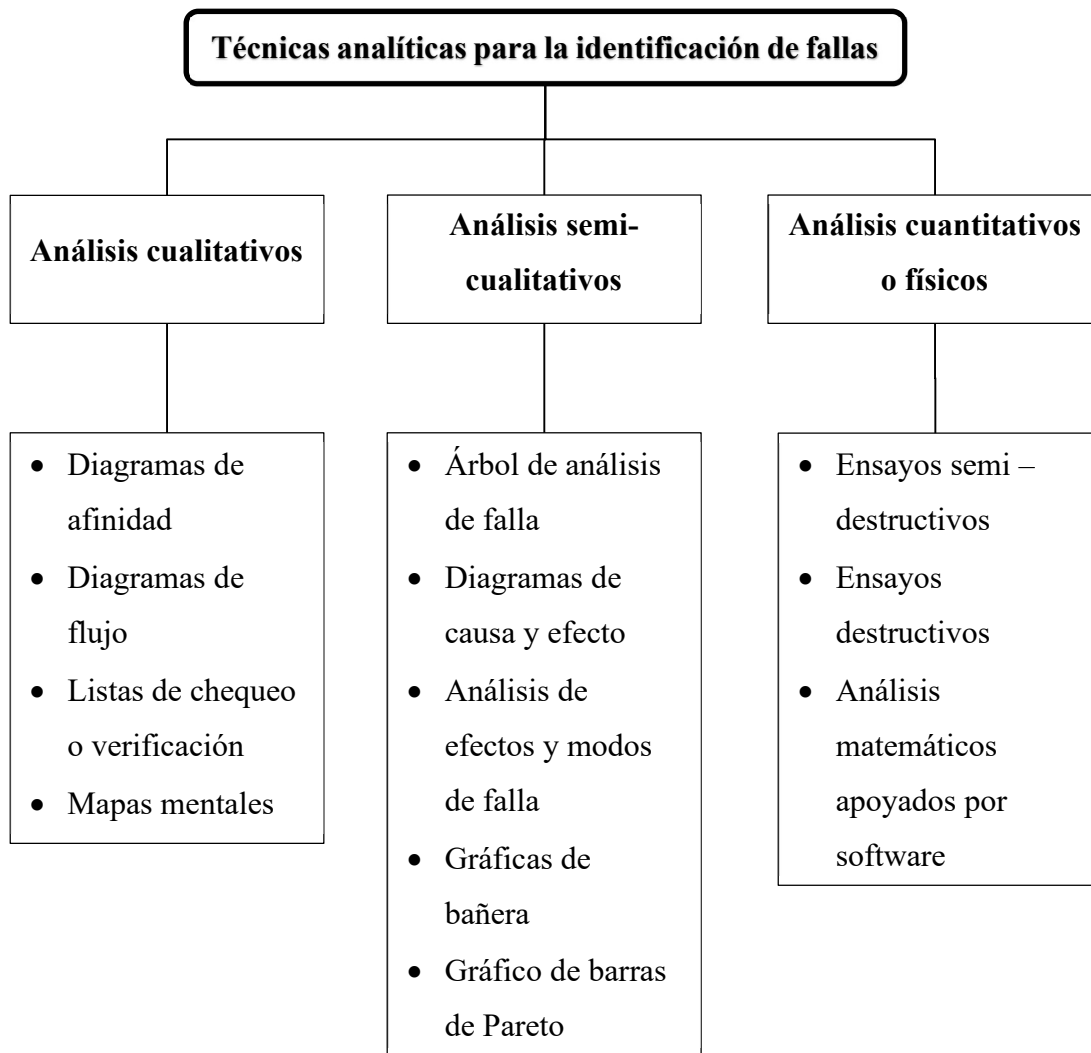
Es en este punto en donde la labor del equipo investigación patológica o forense se torna de vital importancia ya que deberá formular hipótesis a partir de la evidencia recolectada, generar análisis, evaluar posibles rutas de falla e interpretar según su criterio las causas consecuentes del evento. Dicha recopilación de un veredicto suele actuar de manera legal en tribunales en caso de demandas, por tanto, el equipo de investigación deberá contar con las suficientes pruebas sobre su hipótesis con el fin de generar un dictamen que puede conllevar en sanciones penales para alguna parte implicada en dicho proceso; es por esta razón que se

debe prestar especial atención a las metodologías de investigación e identificación de deficiencias estructurales y de falla ya que la incorrecta aplicación de estas puede conllevar a resultados inconclusos o errados (Castro Castañeda, 2022).

Es importante resaltar que las investigaciones no pueden limitarse únicamente a la evaluación de una pieza aislada; es necesario involucrar todas las variables posibles (desarrollar una evaluación integral), de manera que no se podrá pensar en un sistema aislado de manera ideal.

En procesos de investigación típicos para establecer deficiencias estructurales y fallas de estructuras se suele encontrar que la causa no se limita únicamente a un proceso o un elemento; todo lo contrario, implica una serie de efectos que desencadenan toda una ruta de falla e involucran una variedad de elementos, por tanto, encontrar dicho componente inicial que desencadena o puede potencialmente desencadenar todo el tren de falla suele ser una tarea compleja que requiere de una importante experiencia por parte del equipo de investigación (Alvarado Flores & Escudero Panduro, 2021).

Las técnicas analíticas de identificación de deficiencias y fallas estructurales mediante las cuales el equipo de investigación puede establecer la ruta potencial de falla de una estructura pueden ser divididas en tres tipos; análisis cualitativos, análisis semi-cualitativos y análisis cualitativos o físicos como se muestra en la ilustración 1 (Gagg, 2020).



*Ilustración 1 Técnicas analíticas para la identificación de fallas
Fuente: elaboración propia*

2.1 Análisis cualitativos

Se trata de técnicas abstractas que forman parte de un primer nivel de evaluación por medio de las cuales el equipo de investigación forense plantea diferentes escenarios de falla (siempre teniendo como marco de referencia los objetivos que se pretendan lograr con el proceso de análisis y el alcance del estudio). Estas técnicas involucran la relación de diferentes metodologías de diagramación y caracterización de la estructura basado en propiedades de fácil acceso en la estructura como su geometría, arquitectura, ubicación, tipo

de cargas por uso entre otros. Este tipo de metodologías permiten emitir juicios con criterio ingenieril que fortalecen o descartan hipótesis sobre la estructura y sus rutas o trenes de falla; de esta manera es posible emitir conceptos sobre el estado de la estructura o los elementos evaluados (Hanampa Mamani, 2021).

Se describen seguidamente algunas de estas herramientas enfatizando en la amplia variedad de opciones que pueden ser empleadas dentro de las cuales se cuenta con ventajas y desventajas particulares; sin embargo, se caracterizan por proveer una herramienta para mostrar y describir procesos individuales de razonamiento alrededor del evento de falla.

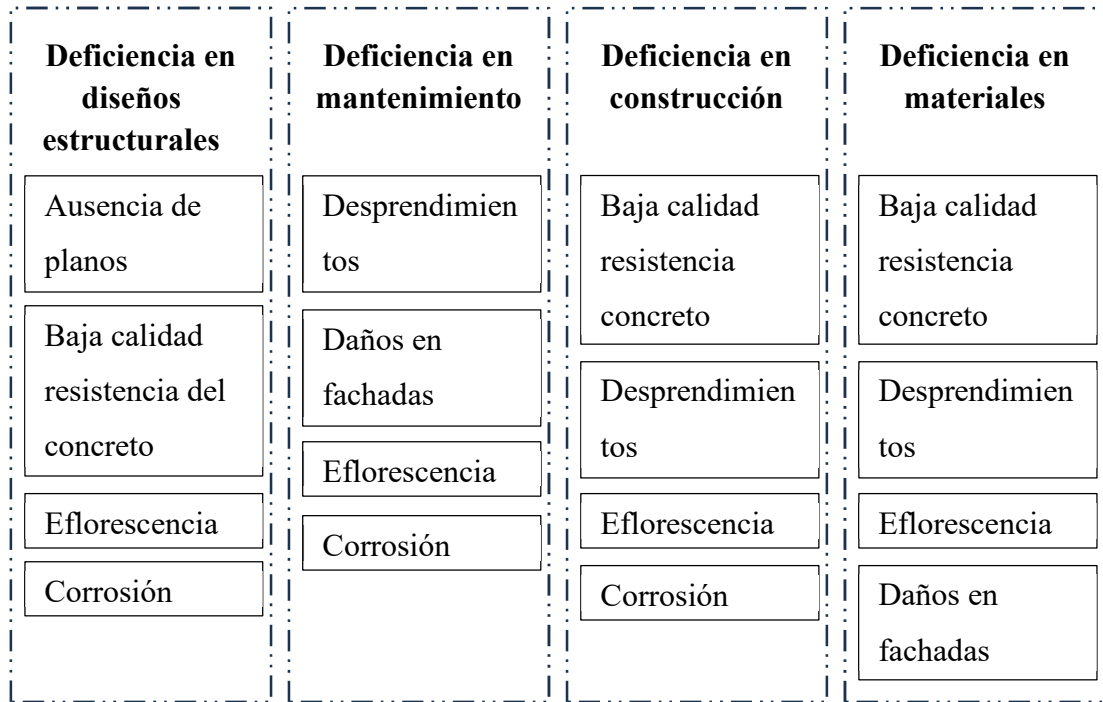
2.1.1 Diagramas de afinidad

Es una herramienta utilizada para organizar ideas, hechos, información y opiniones de forma gráfica. Permite ordenar un grupo importante de ideas para ser evaluadas y analizadas; esta herramienta promueve ventajas importantes en casos complejos de investigación de falla como el análisis ordenado de un problema de manera que se conduzca a la causa de los efectos producidos. Este tipo de diagramas representan de forma organizada y gráfica la jerarquía de los componentes de un problema agrupándolo en categorías. Su especial utilidad es la compilación y organización de realidades, suposiciones y conceptos de manera que puedan ser apoyados o rechazados mediante la adición de componentes de datos formando lazos de desarrollo (Tryana Sembiring, 2022).

En la ilustración 2 se muestra un diagrama de afinidad creado para identificar las causas de fallas en estructuras; este diagrama describe la metodología de análisis para identificación de fallas sobre una estructura de concreto que presenta eflorescencias, corrosión y desgaste en las fachadas; adicional a esto, al realizar ensayos no destructivos sobre los elementos estructurales se encuentra que la resistencia del concreto es menor al mínimo establecido para un elemento estructural.

El diagrama de afinidad contiene cuatro grupos en los que se clasifican las fallas de acuerdo con las causas generales: deficiencias en diseños, deficiencias en mantenimiento, deficiencias en construcción y deficiencias en materiales. Esta metodología permitirá clasificar las diversas causas específicas que puedan ser evidenciadas por el equipo de investigación, en donde como paso siguiente a un ejercicio de “brain storm” o “lluvia de ideas” se agruparán en las categorías generales mencionadas anteriormente, de esta manera, se podrá ordenar gráficamente la información y clasificarla según factores comunes; cabe destacar que no es necesario que cada elemento identificado como causal de las deficiencias, pertenezca únicamente a una categoría raíz o general de falla.

Identificación de fallas



*Ilustración 2 Diagrama de afinidad para identificación de fallas
Fuente: Elaboración propia*

El diagrama anterior relaciona las causas generales de falla con causas específicas, por ejemplo, la causa general de falla dada a las deficiencias en diseños estructurales podrá relacionarse con la causa específica de aparición de eflorescencias, esto debido a que la presencia de eflorescencias se encuentra vinculada en este caso al contacto semipermanente del elemento estructural con aguas lluvias, estas provocan manchas sobre el concreto como se explica más adelante; por tanto, será una falla en el diseño debido a que esta condición no se contempló al momento de conceptualización y por tanto no se generaron las medidas de protección adecuadas.

2.1.2 Diagramas de flujo

Se trata de una aplicación de metodologías cualitativas en donde se emplean datos que carecen de una medición numérica con el fin de apoyar o refutar una hipótesis inicial; de esta manera se logra una representación ilustrativa que permite describir un proceso de falla en una investigación. Esta herramienta es de suma utilidad para determinar la interacción entre varios componentes involucrados en un proceso de falla proporcionando una metodología de caminos ordenados (Cuásquer Viveros & Moreno Cortés, 2021).

Al ser una herramienta basada en un lenguaje sencillo permite una comprensión simple del punto de vista del equipo de investigación que puede ser compartida durante procesos legales puesto que se puede manejar de manera interactiva la posición del equipo de investigación ante un jurado que no necesariamente cuente con conocimientos especiales sobre el área en cuestión (aunque lo ideal es contar con jurados con conocimientos específicos en el campo), por tanto, destaca por la facilidad de comprensión ante un público poco especializado en el área-

2.1.3 Listas de chequeo o verificación

Se trata de un formato estructurado de fácil diligenciamiento y comprensión desarrollado con base en la experiencia de situaciones anteriores, este permite almacenar registros importantes de campo del lugar de falla a fin de recopilar información que será procesada en un futuro mediante una primera aproximación al sitio de interés. Las listas de chequeo permiten incluir prácticas que van desde medidas de protección, revisión y caracterización de materiales o elementos particulares, así como el estado general de toda la estructura. Este tipo de metodologías típicamente tiene origen en cuestionamientos o comprobaciones de parámetros de especial relevancia en la labor investigativa; de esta manera la lista deberá diligenciarse de manera sencilla con respuestas de tipo “sí”, “no”, “no aplica”, o “requiere de más información”. Como resultado del proceso de análisis mediante este método se tendrá un informe mencionando las fallas encontradas junto con una propuesta de mejoramiento o solución (Sánchez Colmanarejo, 2022).

Es de vital importancia para la investigación que el escenario en caso de falla permanezca lo más inalterado posible. Durante investigaciones de falla de estructuras es complejo lograr una escena totalmente inalterada, esto debido a que usualmente se ven involucrados procesos que priman antes que una investigación como por ejemplo labores de rescate, las cuales, inevitablemente alterarán la escena. Por tanto, es una herramienta que deberá ser empleada durante las primeras horas posteriores a la sucesión de la falla.

Este tipo de herramientas basan su confiabilidad en la experiencia de organizaciones o investigadores expertos; con lo cual, su confiabilidad estará dada a la probabilidad de establecer y determinar fallas de acuerdo con un registro de evaluaciones previas de diversas estructuras. Algunas de las guías más reconocidas en el sector son las proporcionada por FEMA P-154 y por AIS en su guía técnica para la inspección de edificaciones después de un sismo; la ilustración 3 se muestra un fragmento de esta.

IDENTIFICACIÓN CATASTRAL

LOCALIDAD BARRIO

| | | | | | | | |
|------------------|--|---------|--|--------|--|--------------|--|
| | | | | | | | |
| BARRIO | | MANZANA | | PREDIO | | CONSTRUCCIÓN | |
| CÓDIGO CATASTRAL | | | | | | | |

TIPO Y CLASIFICACIÓN DE INSPECCIÓN

Formulario Número

| Inspección de la edificación | | | Clasificación de habitabilidad | | | |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Completa | Parcial | Exterior solamente | Habitable (Verde) | Uso restringido (Amarillo) | No habitable (Naranja) | Peligro de colapso (Rojo) |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

IDENTIFICACIÓN DE LA EDIFICACIÓN

Dirección:

Nombre de la Edificación:

Uso predominante:

| | | | |
|----------------------|------------------|--------------|--|
| 1. Residencial | 2. Comercial | 3. Educativo | De la edificación <input type="text"/> |
| 4. Salud | 5. Hotelero | 6. Oficinas | De la Planta Baja <input type="text"/> |
| 7. Industrial | 8. Institucional | 9. Bodegas | |
| 10. Estacionamientos | 11. Otros | | |

Número de pisos: Niveles sobre el terreno Sótanos

Dimensiones aproximadas de la edificación: Frente (m) Fondo (m)

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Sistema Estructural

Concreto: Reforzado: 11 Pórtico de concreto 12 Muros estructurales 13 Sistemas duales 14 Prefabricados

Mampostería: 21 Mampostería confinada 22 Mampostería reforzada 23 Mampostería no reforzada (simple)

Acero: 31 Pórticos arriostrados 32 Pórticos no arriostrados 33 Pórticos en celosía

Madera: 41 Pórticos y paneles en madera 42 Pórticos en madera y paneles en otros materiales

Bahareque o tapia (adobe): 51 Muros en bahareque 52 Muros en tapia o adobe 60 Mixta 61 Construida en material precario (sin sistema estructural) 70 Otros

Tipo de Entrepiso

Concreto Reforzado: 11 Placa maciza 12 Placa aligerada 13 Retículo celular

Acero: 21 Lámina colaborante (steel deck) 22 Vigas 23 Cerchas

Madera: 31 Vigas 32 Cerchas 40 Mixta 50 Otros

Año de construcción

| | | |
|------------------|---------------------|----------------|
| 1. Antes de 1950 | 2. 1950 a 1985 | 3. 1986 a 1999 |
| 4. 2000 a 2011 | 5. A partir de 2012 | |

ESTADO DE LA EDIFICACIÓN

Estado General de la Edificación

Revisar la edificación en forma global para las condiciones señaladas a continuación y hacer las aclaraciones necesarias en la sección de comentarios:

1. Existe colapso: 1. No 2. Parcial 3. Total

2. Desviación o inclinación de la edificación o de algún entrepiso 1. No 2. Si 3. No se pudo determinar

3. Falla o asentamiento de la cimentación: 1. No 2. Si 3. No se pudo determinar

A. Clasificación de la habitabilidad por estado general de la edificación 1. Habitable 2. Uso restringido 3. No habitable 4. Peligro de colapso

Daños en Elementos Arquitectónicos (no estructurales)

Indique el grado de daño de los elementos arquitectónicos (no estructurales) de acuerdo a la siguiente escala o NA en caso de que no aplique.

1. Ninguno 2. Leve 3. Moderado 4. Fuerte 5. Severo

| | |
|--|----------------------|
| 7. Muros de fachadas o antepechos | <input type="text"/> |
| 8. Vidrios exteriores | <input type="text"/> |
| 9. Acabados exteriores (incluyendo antenas, letreros o similares) | <input type="text"/> |
| 10. Muros divisorios o particiones | <input type="text"/> |
| 11. Balcones | <input type="text"/> |
| 12. Cielo rasos y luminarias | <input type="text"/> |
| 13. Cubierta | <input type="text"/> |
| 14. Escaleras | <input type="text"/> |
| 15. Instalaciones: Acueducto <input type="radio"/> Red sanitaria <input type="radio"/> Energía <input type="radio"/> Gas <input type="radio"/> | <input type="text"/> |
| 16. Ductos de ventilación | <input type="text"/> |
| 17. Tanques elevados | <input type="text"/> |

C. Clasificación de la habitabilidad por daños en elementos no estructurales 1. Habitable 2. Uso restringido 3. No habitable

¿Existe una clasificación previa? ¿Cuál?

Problemas Geotécnicos

4. Falla en talud o movimientos en masa que afecte la edificación 1. No 2. Puntual 3. General

5. Asentamiento, subsidencia o licuación que afecte la edificación 1. No 2. Puntual 3. General

6. Grietas en el terreno circundante 1. No 2. Incipientes 3. Generalizadas

B. Clasificación de la habitabilidad por problemas geotécnicos 1. Habitable 2. Uso restringido 3. No habitable 4. Peligro de colapso

Daños en Elementos Estructurales en el piso de mayor afectación

Indique el nivel de entrepiso con el mayor daño

Indique el porcentaje de los elementos afectados según su grado de daño, la sumatoria para cada elemento debe ser del 100%.

| | Ninguno | Leve | Moderado | Fuerte | Severo |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 18. Columnas o muros portantes | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % |
| 19. Vigas | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % |
| 20. Nudos o puntos de conexión | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % |
| 21. Entrepisos | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % | <input type="text"/> % |

D. Clasificación de la habitabilidad por daños en elementos estructurales 1. Habitable 2. Uso restringido 3. No habitable 4. Peligro de colapso

Problemas del entorno

22. Edificio o infraestructura vecina crítica que pueda caer y afectar estabilidad 1. No 2. Si 3. No se pudo determinar

23. Evento adverso inminente que puede afectar la habitabilidad de la edificación 1. No 2. Si

E. Clasificación de la habitabilidad por problemas del entorno 1. Habitable 2. Uso restringido 3. No habitable

Clasificación global del daño y habitabilidad de la edificación

Indique la clasificación de la habitabilidad global según la presente evaluación de acuerdo con el clasificación más crítica definida en las evaluaciones A a E

1. Habitable 2. Uso restringido 3. No habitable 4. Peligro de colapso

Estime el porcentaje del área afectada con relación al área total construida de la edificación %

Ilustración 3 Lista de chequeo para evaluación de estructuras AIS
Fuente: (AIS, 2018)

2.1.4 Mapas mentales

Se trata de un diagrama utilizado para representar palabras, ideas y tareas vinculadas con el evento de interés (falla de la estructura o de un elemento particular) de manera que puedan ser desglosadas gráficamente. Al desglosar el problema se permite una ramificación de manera que se represente y segmente el problema de la falla en temas de menor complejidad. Este tipo de metodología son frecuentemente empleados para generar y conceptualizar diferentes tipos de escenarios de falla (Morales Caballero, 2016).

En la ilustración 4 se muestra la elaboración de un mapa mental orientado a la comprensión de una falla de una estructura; para un mapa mental se deberá ubicar la temática principal en el centro, de ella deberán subdividirse las principales causas de falla catalogadas de manera general y subsecuente a estas las causas raíces o específicas que puedan provocar esta causa general; de esta manera se aborda el problema de una manera general hasta avanzar a lo particular en el proceso investigativo permitiendo un orden y una generación metódica para el trato de la información y la planeación para la cobertura del alcance del proyecto.

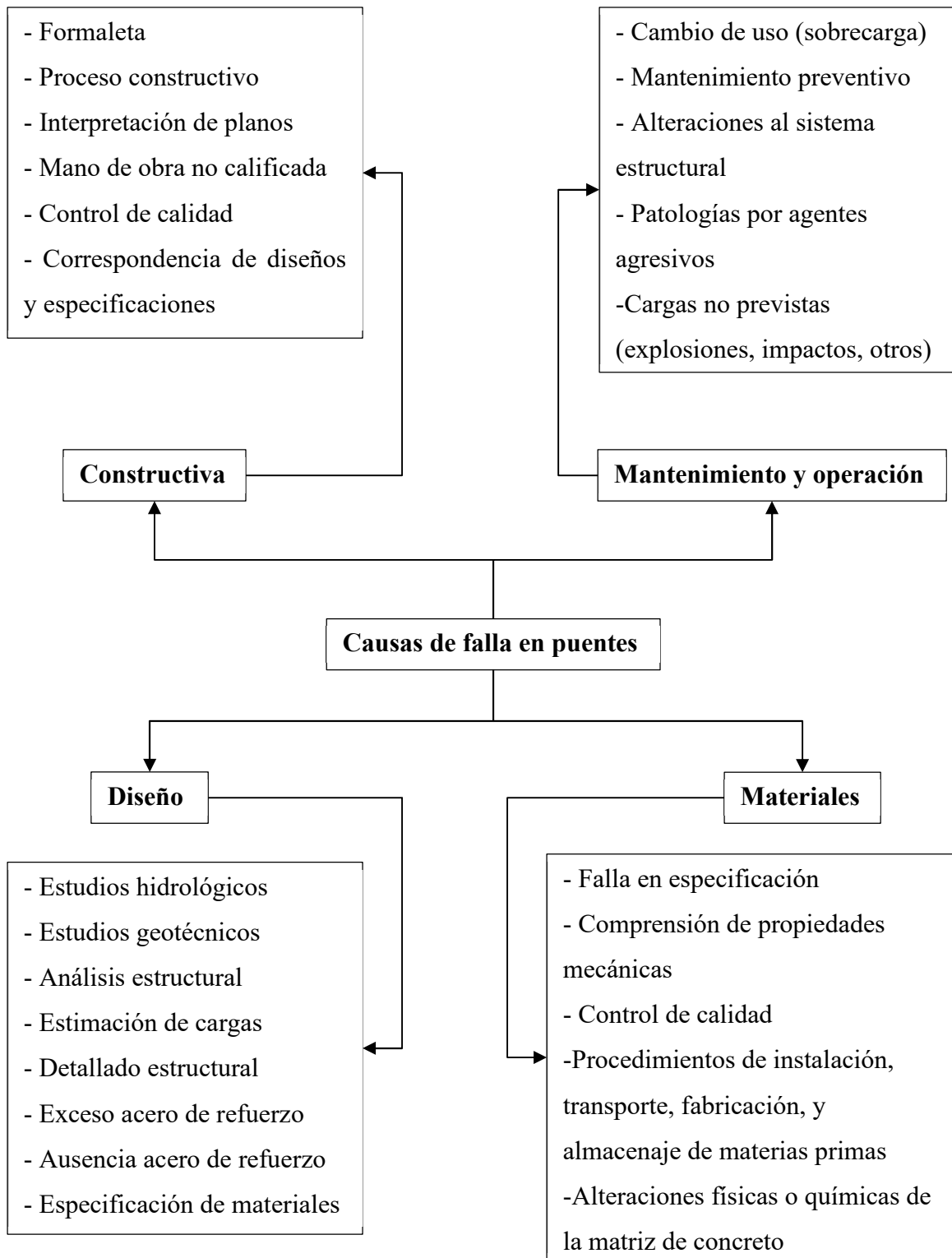


Ilustración 4 Mapa mental de posibles causas de falla en puentes
Fuente: Elaboración propia

2.2 Análisis semi-cualitativos

Se trata de una técnica de niveles en donde se establecen importancias a las deficiencias estructurales y los modos de fallas identificados en una estructura; quiere decir entonces que permite clasificar prioridades de investigación o análisis dentro del proceso. Es decir que mediante esta técnica es posible determinar con cierta magnitud cuantificable las probabilidades de ocurrencia de una ruta de falla identificada previamente. Esta técnica requiere de mayor inversión de análisis por parte de los investigadores, sin embargo, proporciona una base más sólida y justificable sobre las hipótesis inicialmente planteadas. Se denominan métodos semi-cualitativos debido a que incorporan valores tentativos basados en probabilidades y estadísticas de una recopilación de información (Gagg, 2020).

Entre las herramientas más utilizadas para este tipo de técnica se encuentra el árbol de análisis de fallas, diagramas de causa y efecto, análisis de efectos y modos de falla y gráficos de diagramas de barras.

2.2.1 Árbol de análisis de falla (Fault Tree Analysis - FTA)

Se trata de un procedimiento deductivo que implica diferentes combinaciones posibles de falla involucrando los posibles agentes que intervienen en el tren de falla. De esta manera se representa la combinación de causas elementales (eventos primarios) que conducen a eventos no deseados (evento principal), conduciendo a la creación de una red de eventos que tiene como fin diagnosticar la causa raíz de una falla, mecanismos de falla, riesgos asociados a la falla, medidas de mitigación de riesgos y frecuencia de ocurrencia del evento.

Mediante esta metodología se ilustra la relación entre las fallas y los subsistemas y se realiza una evaluación probabilística del riesgo (por esto tendrá carácter semi-cualitativo). La información que se tiene como resultado del análisis es la ruta de falla, causa raíz, áreas conflictivas del sistema relacionando las funciones de un

elemento particular con sus fuentes de falla y sumando un carácter probabilístico mediante un grado de confiabilidad del análisis (Aguilar Chávez, Rodríguez Medina, Poblano Ojinaga, Alvarado Tarango, & Pinto Santos, 2023).



*Ilustración 5 Fractura en acabados de piso
Fuente: (Arqa, 2020)*

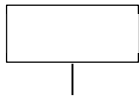
En la ilustración 5 se presentan casos de fallas de estructuras en donde se evidencian fallas por fractura en las baldosas cerámicas de un nivel; seguidamente en la ilustración 7 se muestra el desarrollo de la metodología de análisis de investigación de falla mediante un árbol de análisis de falla. En el análisis de falla realizado mediante árbol de falla se observa entonces que cada ruta tendrá una probabilidad de ocurrencia, esta posibilidad estará dada por la identificación de todas las posibles causas que puedan intervenir en la falla, posterior a esto y basado en análisis estadísticos se determinará que porcentaje de probabilidad de falla tendrá la estructura

asociada a determinada causa de falla; de esta manera el soporte matemático de esta metodología será valioso y fundado en fuentes con mayor peso de confiabilidad.

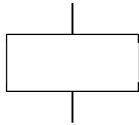
Determinadas las probabilidades de falla por cada evento puntual podrá evidenciarse que establecer una única causa de falla para la caracterización del problema será erróneo ya que la deficiencia en la estructura típicamente se deberá a la suma de varias afectaciones; por tanto, será más propio hablar de la probabilidad de falla de la estructura asociada a múltiples fallas como se muestra en la ilustración 7.

En el árbol de análisis de fallas de la ilustración 7, se observa entonces que la mayor probabilidad de falla que caracteriza la problemática presentada es debido a deflexiones en el entrepiso; sin embargo, esto no descarta la presencia de asentamientos diferenciales, impactos, cambios abruptos de temperatura o deficiencias en la instalación del material cerámico. Por tanto, es evidente que este caso deberá ser complementado con otro tipo de metodologías con el fin de establecer con mayor certeza la causa de falla.

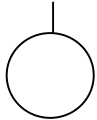
Seguidamente se muestran las convenciones utilizadas para el desarrollo del análisis por árbol de fallas; sin embargo, es necesario aclarar que existen más convenciones adicionalmente a las presentadas las cuales se ajustarán a las necesidades de la investigación.



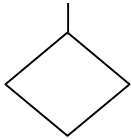
(EP) Evento principal: será el evento que figura en la parte superior del árbol, es el desencadenante de la investigación.



(EI) Evento intermedio: será un evento desencadenado por un evento previo; puede ser la causa de un evento subsecuente.



(EB) Evento básico: será un evento de causa raíz, por tanto, se representa en la parte inferior del árbol ya que es la base de la línea de investigación.



(ET) Evento terminal: será un evento en donde termina el árbol de análisis de falla por la dada a la ausencia de información; indica la necesidad de una investigación más profunda.



Puerta lógica de tipo o: representa la condición en la que cualquiera de los eventos subsecuentes puede provocar la causa con la cual está relacionado.

*Ilustración 6 Convenciones básicas para la elaboración de un árbol de análisis de fallas
Fuente: Elaboración propia basado en normas generales para elaboración de diagramas de afinidad*

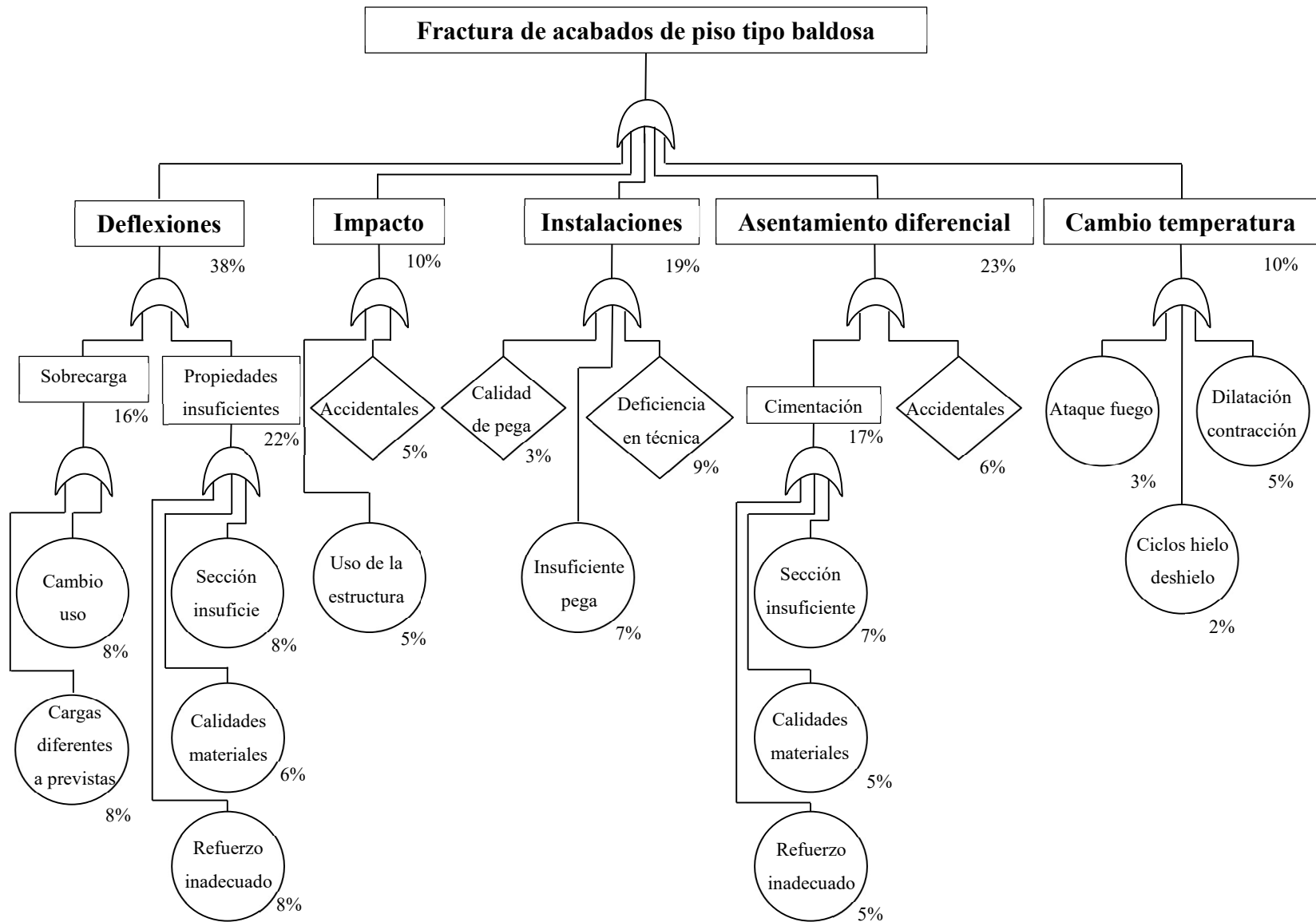


Ilustración 7 Árbol de análisis de falla para caso de fractura de acabados de piso tipo baldosa cerámica
Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Diagramas de causa y efecto

Conocido como diagrama causa-efecto de Ishikawa, permite identificar posibles causas de una falla gracias a la jerarquización de posibles causas relacionadas (dado a que todas las causas contribuyen a la falla, pero no con igual magnitud), de esta manera se permite la interrelación entre ellas. La ventaja principal de este método de análisis es la visualización de varias cadenas de causa-efecto (involucrando causas mayores o variables críticas, causas menores o variables incidentes sobre las causas críticas y sub-causas quienes afectarán directamente a las causas menores) que darán origen a la falla otorgando una calificación de importancia a cada una de las causas evaluadas. Es una metodología muy importante ya que permite identificar posibles rutas de falla gracias a su facilidad y metodología consecuente (Arévalo Mejía & Sobero Alania, 2020).

En la ilustración 8 se muestra la elaboración del diagrama de causa y efecto para el mismo caso expuesto en la página 35; de este modo se podrá realizar una comparativa en cuanto a la eficiencia de este tipo de metodología debido a que se planteó la necesidad de complementar con una metodología adicional con el fin de establecer la causa de falla.

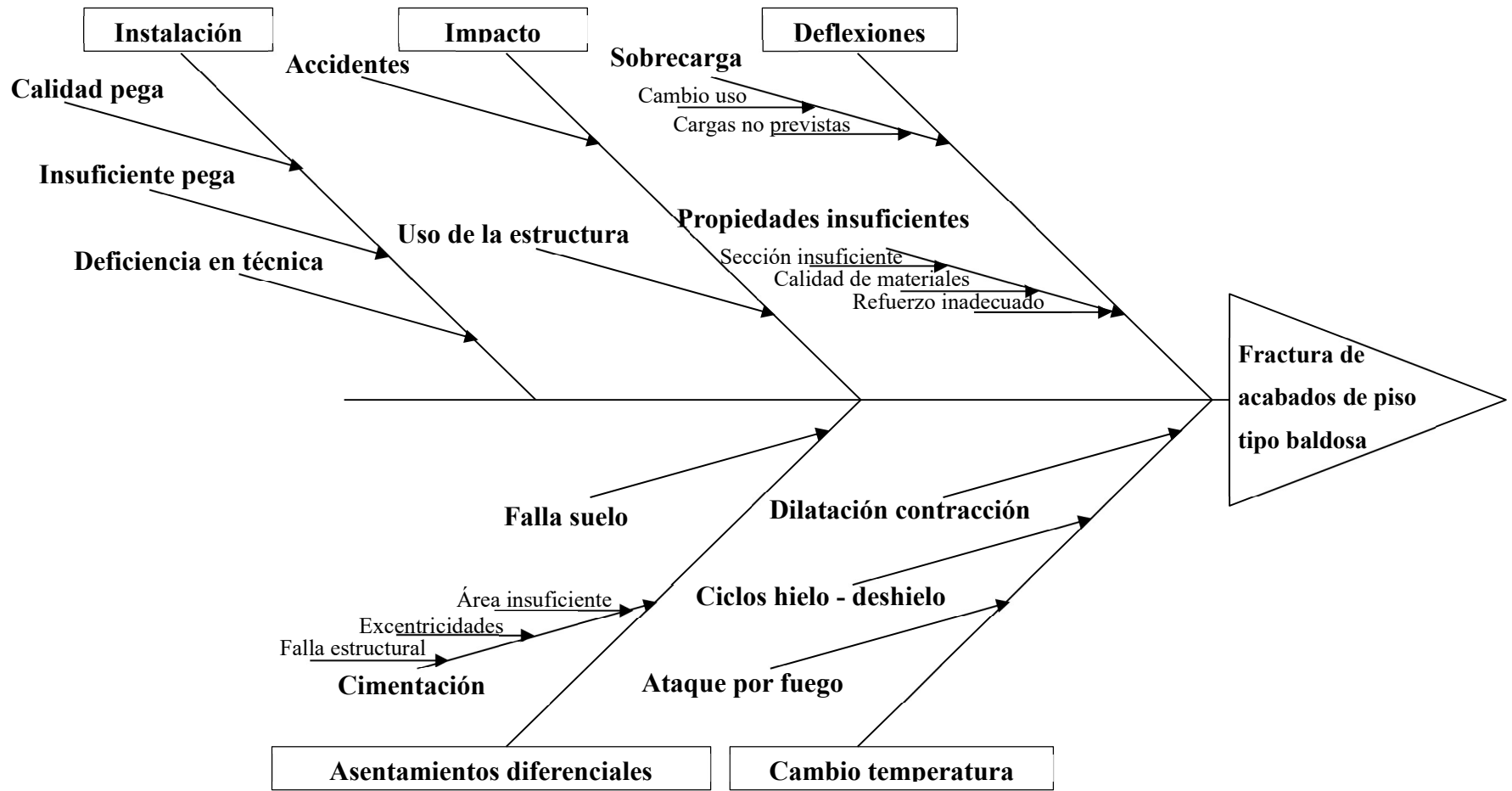


Ilustración 8 Diagrama de causa efecto para caso de fractura de acabados de piso tipo baldosa cerámica
 Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la ilustración anterior, esta metodología se encuentra mejor asociada a problemáticas relacionadas con procesos de ejecución, por tanto, analizar el mismo caso anterior mediante esta metodología no aportaría información adicional, todo lo contrario, es evidente que para el análisis general será mejor optar por la metodología del árbol de análisis de fallas, ya que este otorga probabilidades y un mejor orden en la ejecución de la investigación. Por otra parte, como aplicación de esta metodología de análisis de falla podrá pensarse en lugar de analizar el problema general mediante esta metodología, generar un análisis de un proceso particular, por ejemplo, el proceso de instalación de los pisos que se muestra en la ilustración 9, complementando así la información y el análisis otorgado por el árbol de fallas.

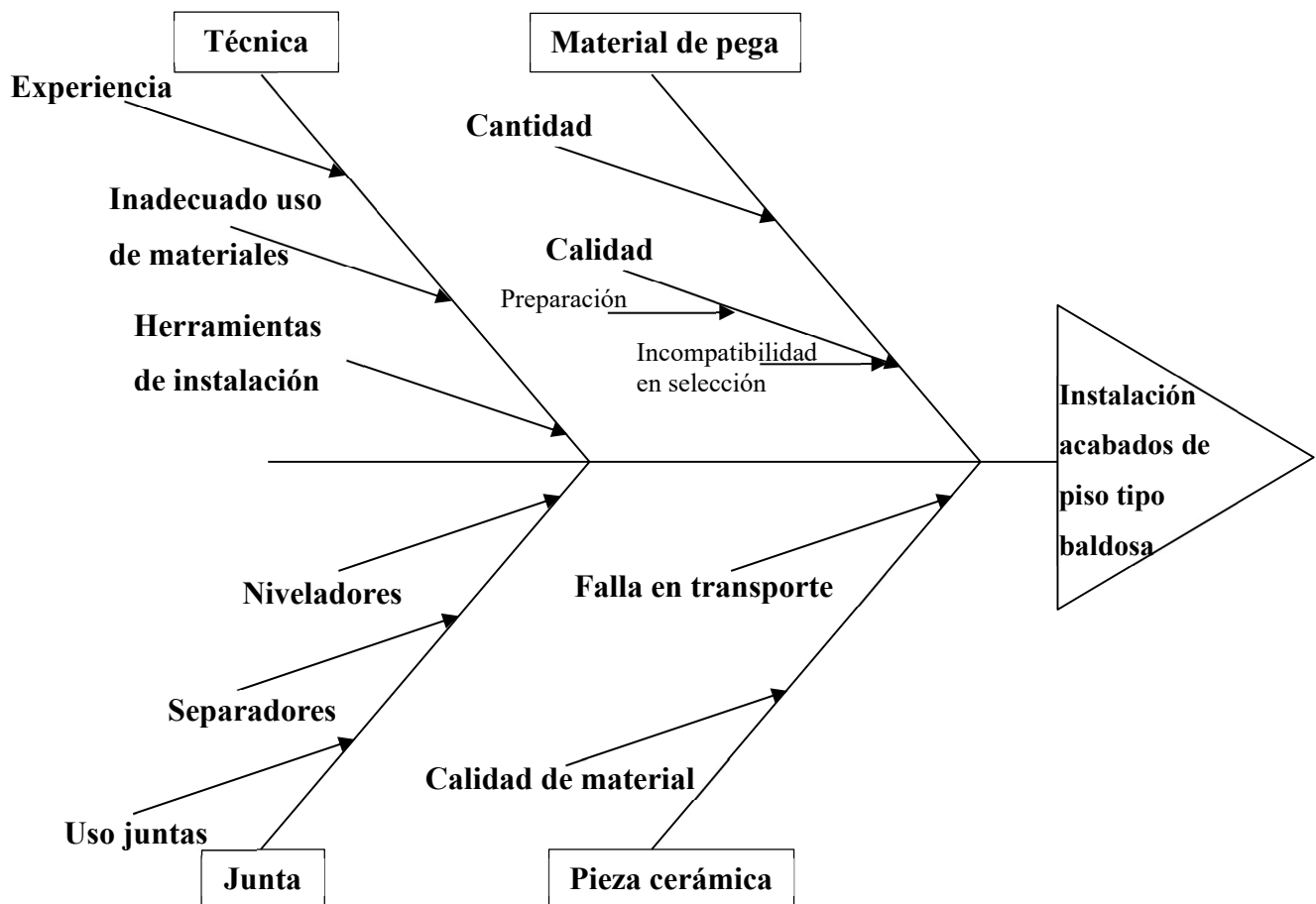


Ilustración 9 Diagrama de causa efecto para evaluación de proceso de instalación de acabados de piso tipo baldosa

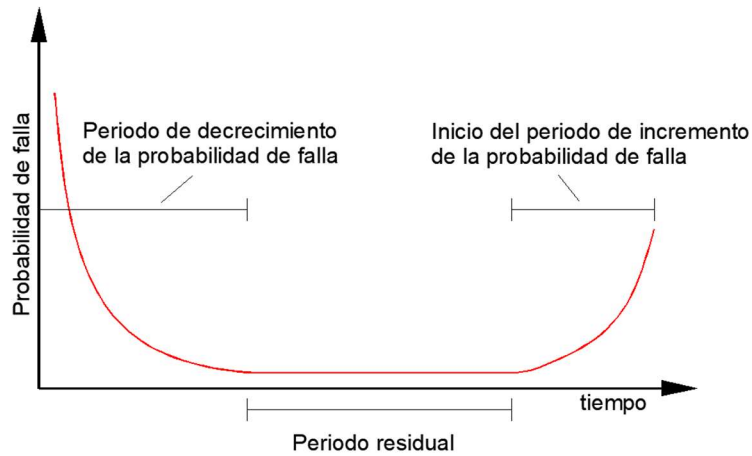
Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Análisis de efectos y modos de falla (Failure Modes and Effects Analysis - AMEF)

Es un método empleado para identificar potenciales modos de falla que podrían tener una importancia significativa en el sistema de falla de una estructura. Esta metodología se basa en generar probabilidades de ocurrencia para los diferentes modos de falla que pudieron afectar la estructura en cuestión. Radica su importancia en el fundamento probabilístico ya que involucra variables que permiten ser calificadas en una escala de rango de acuerdo con su frecuencia probable de ocurrencia en conjunto con sus consecuencias; de esta manera se logra otorgar una gama de opciones de acción frente a la identificación de la falla (Perez Chavez, 2021).

2.2.4 Graficas de bañera

Esta gráfica o curva comprende tres regiones características como se muestra en la ilustración 10: región de periodo de arranque o mortalidad infantil; aquí se tendrá una tasa de riesgo que desciende conforme transcurre el tiempo, se maneja una probabilidad de falla elevada en la etapa inicial de vida; conforme transcurre el tiempo se tiende a alcanzar una estabilidad. La segunda región representará la vida útil u operación normal; allí se tendrá un periodo con una tasa de riesgo sin crecimiento o disminución. Finalmente, la tercera región presenta el desgaste de la estructura o elemento; aquí se tendrá una tasa de riesgo de falla con crecimiento rápido conforme transcurre el tiempo. Será importante manejar una magnitud de probabilidad razonable para determinar el tiempo en el que se requerirá intervención de la estructura o elemento. Esta gráfica mostrará la probabilidad de falla del elemento en cuestión con el fin de establecer el riesgo de inicio de un tren de falla mediante un componente particular de la estructura (Breuge & Beek, 2017).



*Ilustración 10 Esquema general de curva de bañera
Fuente: Elaboración propia*

2.2.5 Gráfico de barras de Pareto

Permite realizar una comparación gráfica entre los efectos y las causas, esto basándose en la regla del 80-20 en donde se describe que el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas; de esta forma se identifican los elementos que participan en una falla con el fin de determinar las problemáticas a las que se les atribuye el mayor porcentaje de las fallas. La ventaja de este tipo de graficas está en permitir identificar la prioridad o importancia que tiene los elementos y de esta manera manejar una toma de decisiones sustentada en datos mostrados de manera gráfica de simple interpretación (Arévalo Mejía & Sobero Alania, 2020).

2.3 Análisis cuantitativos o físicos

Se trata de la técnica más precisa pero más dispendiosa puesto que requiere del uso de análisis físico sobre los materiales que conforman la estructura, esto iniciando por ensayos poco invasivos y más económicos, llegando hasta los ensayos más invasivos sobre la estructura tales como pruebas destructivas. Es importante recordar que el fin de la realización de estos ensayos es siempre encontrar la ruta de falla de la estructura. De esta manera, esta

metodología logra involucrar ensayos cuantitativos que proporcionan las bases más sólidas para la determinación de las posibles fallas presentadas en una estructura, siendo la metodología más fiable pero más costosa y dispendiosa que debe utilizarse solo en casos en los que las metodologías anteriores no proporcionen suficiente evidencia para concretar una hipótesis dada (Peña Mondragón, 2010).

Durante la realización de este análisis se suelen emplear equipos computacionales para la creación de modelos de plastificación progresiva, para estos es necesario contar también con una adecuada caracterización de los materiales mediante ensayos de laboratorio. Es indispensable contar con documentación certera del estado de la estructura, es decir, recopilar la mayor información de toda la vida de la estructura hasta el momento de falla. Dentro de esta documentación se tienen planos de diseño, planos de obra, modificaciones al uso, posibles intervenciones a la estructura entre otros (Nina Escobar, 2022).

Actualmente se cuenta con diversidad de software (como DPL Fault Tree para la construcción de árboles de falla o ReliaSoft BlockSim para el desarrollo de diagramas tipo Markov) que permite emplear herramientas de análisis de manera metódica, de esta forma la gama de procedimientos tentativos a emplear se incrementa. Este tipo de software permiten una aplicación fácil e intuitiva de las metodologías descritas, de modo que el trabajo de análisis del equipo de investigación se ve simplificado, claro está que el resultado de estos análisis será tan bueno como la información y criterios de entrada (Gagg, 2020).

Es importante resaltar que las técnicas descritas anteriormente solo son herramientas para el proceso de investigación, sin embargo, esto no indica que el equipo de investigadores no puedan desarrollar su propia metodología de investigación; de hecho, la mejor metodología para la investigación será una combinación de las mencionadas anteriormente, con lo cual se hace evidente la necesidad de los profesionales involucrados en conocer cada una de estas metodologías y su correcta aplicación ya que el valor que aporta cada una individualmente resulta de gran importancia; sin embargo, el valor agregado de concatenar varias de estas

herramientas es mucho mayor ya que proporciona diferentes ángulos de vista al problema y otorga mayor rango de asertividad a las hipótesis planteadas.

Se destaca entonces la relevancia del presente documento en la aplicación de las metodologías descritas anteriormente para la investigación de las causas de falla de estructuras; de la misma forma, se pretende orientar al lector en la preservación y durabilidad de estas de manera que se eviten los colapsos encontrando la problemática raíz y así, a futuro, lograr establecer planes para la intervención y “cura” de las estructuras “enfermas”. Será necesario para el empleo de la investigación de falla de una estructura conocer una variedad de causas generales y específicas que puedan ser relacionadas en un tren de falla para un elemento o de manera global para una estructura; así, a partir de una serie de diagnósticos dirigidos por evidencias de campo se logrará determinar las posibles problemáticas raíces de la estructura en conjunto con sus consecuencias.

De acuerdo con las metodologías y ejemplos presentados anteriormente, se observa entonces la importancia de la experiencia del equipo investigador en la selección de las metodologías adecuadas para dicho proceso; el seleccionar una metodología inadecuada podrá incurrir en trabajos ineficientes e inclusive sobrecostos. Así mismo, será importante resaltar que la mejor metodología para la investigación de fallas será única para cada proceso de análisis y por tanto para cada proyecto; esta metodología típicamente consistirá en una combinación de las metodologías generales presentadas anteriormente y ajustadas al cumplimiento del alcance de la investigación.

Capítulo III

Objetivos

3.1 Objetivo general

Generar un documento explicativo que permita identificar causas de falla y sus consecuencias mediante la aplicación de metodologías de fallas en estructuras de concreto.

3.2 Objetivos específicos

- Documentar información sobre las principales metodologías para la identificación de fallas y deficiencias en estructuras.
- Realizar una descripción clara y ejemplificada de los mecanismos de falla de estructuras mediante el uso de casos reales a nivel nacional e internacional.
- Evaluar las diferentes metodologías de identificación de deficiencias e investigación de fallas en estructuras de concreto.

Capítulo IV

Evaluación patológica e ingeniería forense

La evaluación patológica es el conjunto de prácticas que tienen como finalidad conducir a la determinación de posibles causas que generaron la falla de una estructura; por tanto, se trata de un proceso de investigación que en diversas ocasiones podrán desencadenar en litigios de ingeniería forense involucrando a todos los posibles afectados (Seclen Falen, 2019).

Como resultado de un proceso de evaluación se espera contar con un conjunto de pruebas físicas que otorguen claridad sobre la falla presentada; sin embargo, es importante anotar que en la mayoría de las situaciones será imposible determinar cómo causal de falla a un solo elemento, esto conduce entonces a la necesidad de contar con investigadores con un grado adecuado de experiencia y un cierto sentido de intuición que permitan localizar con precisión el tren de falla de interés (Basset Salom, 2023).

Será entonces necesario integrar equipos multidisciplinarios de trabajo en los que se integren diferentes disciplinas y campos de trabajo para ejecutar un proceso de investigación. En la etapa investigativa, será esencial contar con un alcance establecido de manera clara; esto permitirá entonces definir la profundidad de la investigación y por tanto la cantidad y especialidad de los investigadores a involucrar. En procesos de investigación de gran impacto se involucrarán profesionales a fines de diversas áreas inclusive saliendo del campo ingenieril ya que será conveniente iniciar con revisiones de proyectos desde las primeras etapas como la concepción o involucrar ámbitos contractuales e incluso de impacto medioambiental.

Las tareas de evaluación patológica demandan una inversión de recursos importantes, es decir, se requieren no solo profesionales muy experimentados en el campo, sino que también se demanda de la incorporación de metodologías de investigación cuyos costos pueden ser muy elevados. El determinar los procesos a seguir para establecer un veredicto en una

evaluación con un determinado grado de precisión es una labor de vital importancia, esto dado a que invertir demasiado en análisis y ensayos costosos durante el proceso de pesquisa puede no ser el camino más óptimo hablando en termino económicos. Es por esta razón que el equipo de investigación debe contar con los conocimientos suficientes sobre las metodologías de investigación y evaluación disponibles en el mercado para no incurrir en sobrecostos desmedidos; el grado de certeza de una evaluación patológica estará directamente relacionado con la inversión en materia de tiempo y costo que se emplee (Martínez Forero, Patiño León, & Barreto Castillo, 2020).

La evaluación patológica es un componente base de la ingeniería forense; sin embargo, no es el único aspecto que debe tenerse en cuenta durante este proceso. Durante la etapa de investigación forense se deberá partir de una hipótesis en donde se relacionen las posibles causas de fallas, esto se logra mediante la recolección de evidencias de todo tipo (no solo de ensayos a la propia estructura) que conduzcan a la revelación del eslabón más débil de la cadena (Arone Huallpa, 2022).

A lo largo de la trayectoria moderna de la ingeniería forense se ha observado que la mayor parte de las fallas presentadas dentro de las estructuras en concreto se deben a omisiones durante cualquiera de las etapas del proyecto (concepción, diseño, construcción u operación). Es por esta razón que en los procesos de determinación de causas es necesario contar con la mayor cantidad de información asociada a cada una de las etapas o ciclos de vida del proyecto, de manera que se cuente con un registro fiable de evidencia (Chacon Sierra & Lopez Garcia, 2021).

El realizar investigaciones forenses cuenta con un valor importante en la resolución de pleitos de carácter legal o contractual; sin embargo, en el marco del crecimiento de la ingeniería nacional, radica su importancia en la generación de lecciones aprendidas que permitan el mejoramiento de prácticas que eviten fallas similares.

La ingeniería forense pretende basarse en la aplicación de estudios científicos, medios físicos y evidencias recolectadas (fotografía, videos, testimonios, entre otros) para determinar causas y responsabilidades ante una falla de una estructura. El desarrollo de la ingeniería forense requiere del trabajo integral de diversos tipos de profesionales que permitan crear un panorama amplio gracias al conocimiento específico de cada uno de ellos. Es así como se encuentra la diferenciación entre la evaluación patológica y la ingeniería forense; será entonces la evaluación patológica un componente fundamental para el desarrollo de la ingeniería forense de un caso (ASCE, 2018).

La ASTM E2713-18 (2018) es una excelente guía para la ingeniería forense en donde se enuncia de manera general el rol y las capacidades a desempeñar en este campo. En él, se expone como rol principal la actuación legal por parte del ingeniero en casos de litigios. Como primera medida el ingeniero forense tendrá por objetivo principal encontrar una explicación técnica del incidente para su cliente manteniéndolo siempre informado sobre el curso de la investigación. La meta del ingeniero forense será generar una explicación clara ante un juzgado de la parte técnica relacionada con el evento investigado mediante su testimonio que cobrará especial importancia gracias a la trayectoria y conocimientos demostrables del ingeniero forense. Para el aporte ante un jurado será esencial que el ingeniero demuestre todo el proceso investigativo realizado mediante pruebas y las razones por las cuales las metodologías seleccionadas son las más adecuadas para la tarea de investigación y su alcance definido; es aquí en donde se resalta la importancia de contar con personal capacitado para realizar procesos de investigación y selección de la mejor metodología de investigación de fallas.

Es clave anotar que la evaluación patológica no limita su aplicación únicamente a labores investigativas relacionadas con la ingeniería forense; por su parte esta es implementada con mucha mayor frecuencia en labores de evaluación y reparación de estructuras, en estos casos su finalidad será el determinar el estado actual de la estructura a intervenir y proporcionar un insumo base para establecer una línea de procedimientos a emplear para la intervención de la estructura (Alva Ortega, 2019).

Se direccionará entonces el presente documento al estudio de patologías en donde se pretende generar un diagnóstico de la estructura afectada, de esta manera se podrá generar un plan de procedimientos o intervenciones, que de la misma forma permitan el uso de la estructura bajo los lineamientos de la filosofía de la ingeniería estructural (estructuras seguras, funcionales, económicas y sostenibles con el medio ambiente); por tanto, no se pretenderá abordar de manera profunda temas relacionado con investigaciones forenses. En el Capítulo IX se tratará un caso de colapso de una estructura representativa en Colombia, pese a ser un colapso que podría desencadenar una investigación forense, no se pretende dar este enfoque ya que la estructura del puente Los Grillos podría contar con la posibilidad de continuar su servicio ya que existe la opción de reparación siempre y cuando se encuentre una viabilidad tanto técnica como económica.

Típicamente, los hechos que desencadenan una investigación forense se clasifican en:

4.1 Accidentes

Se denotan como accidentes a aquellos sucesos que salen de la cotidianidad en cualquier etapa del proyecto y que generan afectaciones al desempeño de la estructura (Godoy, y otros, 2019). Como ejemplo destaca la explosión ocurrida en Beirut el 4 de agosto de 2020 que provocó el colapso de la zona portuaria de la capital del Líbano; en la ilustración 11 se muestra el registro de la secuencia de la onda expansiva provocada en donde se puede otorgar un panorama general de la magnitud de la explosión.



*Ilustración 11 Secuencia de imágenes del momento de la explosión en el puerto de Beirut.
Fuente: (El País, 2020).*

Por otra parte, en la ilustración 12 se muestra la devastación generada; allí se evidencia la gran cantidad de estructuras afectada en conjunto con el patrón de afectación descrito por la naturalidad radial de la onda expansiva.



*Ilustración 12 Destrucción del puerto de Beirut a causa de la devastadora explosión
Fuente: (El País, 2020)*

4.2 Crímenes

En este contexto se entenderá como crimen a toda acción intencional que afecte la integridad de otro individuo, por tanto, un crimen puede radicar no solo en afectaciones individuales a seres humanos, sino que también se refiere a afectaciones de especies en concreto de flora o fauna, ecosistemas o hábitats. Uno de los crímenes más representativos en el campo de la ingeniería forense es el ocurrido el 11 de septiembre de 2001 que trajo consigo el derribo del “World Trade Center” como se muestra en la ilustración 13.



*Ilustración 13 World Trade Center atentado del 11 septiembre de 2001.
Fuente: (MARCA, 2022)*

4.3 Eventos catastróficos

Se trata de situaciones fortuitas que desencadenan un daño de altas magnitudes implicando la afectación en materia de pérdidas económicas y de vidas (Ortiz Soto, 2022). Una situación de catástrofe destaca en el campo es el accidente nuclear de Fukushima I ocurrido el 11 de marzo de 2011 tras la ocurrencia de un terremoto de magnitud 9.0 M_w (Escala sismológica de magnitud de momento) que desencadenó un tsunami en la costa de Japón y

con ello una afectación importante al reactor de la planta como se muestra en la ilustración 14; consecuencia de esta situación fortuita se libera una cantidad importante de radiación (Oe, Takebayashi, Sato, & Maeda, 2021).



*Ilustración 14 Catástrofe nuclear en central de Fukushima I 11 marzo de 2011.
Fuente: (Eitb.eus, 2012)*

4.4 Degradación de los bienes

Ocurre degradación natural en las estructuras típicamente por afectaciones de uso cotidiano; sin embargo, para evitar la ocurrencia de fallas en los elementos es necesario contar con planes de mantenimiento periódicos. Una de las degradaciones de estructuras más frecuentes en el área de infraestructura es la socavación presente en puentes como se muestra en la ilustración 15; cabe destacar que muchas veces esto puede evitarse con un correcto mantenimiento de la estructura. La socavación en puentes es una afectación de suma importancia puesto que debilita las condiciones de apoyo de la estructura y conlleva a fallas súbitas; resulta complejo realizar evaluaciones del estado de

estos elementos debido a que se encuentran permanentemente sumergida en agua (Díaz Saucedo, 2021).



*Ilustración 15 Descubrimiento de pilotes soporte de pila principal en puentes
Fuente: (Sandoval, 2012)*

4.5 Distintos tipos de errores

Existen otros tipos de errores que ameritan una investigación forense, estos errores pueden clasificarse en errores de diseño, construcción u operación (Zapana Zapata, 2021). Uno de los casos más emblemáticos en Colombia es el colapso del edificio Space ocurrido el 12 de octubre de 2013 en la ciudad de Medellín mostrado en ilustración 16; allí se incurrió en errores tanto de concepción, como de diseño y construcción; no obstante, después del colapso de esta estructura se logró la instauración de normativas más exigentes para las construcciones colombianas (Hernández García & Zapata Villa, 2023).



Ilustración 16 Falla de la torre 6 del edificio Space 12 de octubre de 2013, Medellín, Colombia.

Fuente: (Semana, 2013)

Así entonces, la evaluación patológica logra apoyar el desarrollo de las investigaciones forenses mediante la identificación de fallas de componentes, sistemas o estructuras; es decir, es parte de elementos simples, hasta llegar a envolver todas las variables de los componentes que conforman un sistema dentro de una estructura.

Aquel profesional dedicado y vinculado a un equipo de investigación en materia de ingeniería forense deberá contar con bases sólidas teóricas en conjunto con una gran experiencia en labores de ejecución de obra e investigación, esto debido a que el rol de investigación no puede ser enseñado únicamente de manera teórica ya que requiere del desarrollo de habilidades muy específicas. También es de radical importancia para estos profesionales el desarrollo de habilidades comunicativas ya que deberán presentar sus resultados en muchas ocasiones a personas o entidades que no cuentan con los conocimientos específicos de ingeniería para entender conceptos o lenguaje técnico.

Capítulo V

Investigación de fallas

Una falla es la incapacidad de un elemento, sistema o estructura de cumplir con parámetros adecuados, la función para la cual fue concebido. A partir del diseño estructural se busca establecer condiciones límites para las cuales la estructura debe mantener un comportamiento esperado; esto sabiendo que se puede encontrar determinado nivel de daño en la estructura bajo situaciones de carga que no se presentarán permanentemente. Para obtener estos resultados se ha trabajado en metodologías de diseño que clasifican niveles de aceptación de daño en estructuras ante determinadas situaciones particulares, por ejemplo, se tendrán consideraciones mucho más flexibles en el diseño de una edificación residencial de baja altura ubicada en una zona de amenaza sísmica baja que en el diseño de una central nuclear, en esta última sería extremadamente riesgoso aceptar algún tipo de daño ante una solicitación fortuita (Maskrey et al, 1993).

Es importante contar con conocimientos de las solicitaciones a las que se verá sometida la estructura a lo largo de su vida de servicio; estas de manera general podrán clasificarse en tres grupos.

5.01 Cargas vivas

Las cargas vivas son aquellas que no tienen una magnitud ni localización completamente definidas dentro de la estructura, algunas de estas cargas son: cargas sobre cubiertas, cargas de tránsito en puentes, cargas de impacto, cargas lineales (típicamente reconocidas por el tránsito de maquinarias fijas), presiones de suelo, presiones hidrostáticas, cargas explosivas y fuerzas centrífugas (típicamente ocasionadas en puentes) (Cortez Chamorro & Orellana Chicaiza, 2021). La estimación de este tipo de cargas no podrá ser

precisa, por tanto, se deberá tener un especial cuidado en las consideraciones de diseño para contemplar las desviaciones que puedan existir en el cálculo de las magnitudes de aplicación. En los códigos y normativas de diseño se contemplan estas imprecisiones típicamente con sobrestimaciones de magnitudes de las cargas en conjunto con la aplicación de factores de mayoración provenientes de estudios estadísticos (dependiendo de la metodología de diseño a emplear); dados estos estudios estadísticos es permisible en diversos escenarios la reducción de la carga viva para el diseño de determinados elementos como la cimentación ya que es poco probable que en edificaciones grandes toda la carga viva de diseño se presente al mismo tiempo.

5.02 Cargas muertas

Se denominan cargas muertas a todas aquellas solicitaciones de magnitud constante dentro de la estructura que permanecerán en un mismo lugar (muros estructurales, columnas, vigas, entrepisos, pañetes, cielos rasos, muros de tabiquería, acabados de piso, fachadas, ventanas, entre otras) (Burgos & Sigüenza, 2022). Para el proceso de diseño se deben estimar estas cargas ya que nunca estarán totalmente definidas hasta que se tengan por completo las dimensiones de todos los elementos, por tanto, se trata de un proceso iterativo en el que se recurre a la experiencia para realizar estimaciones de la mejor manera posible. Es de radical importancia la definición de estas cargas puesto que influirán en la masa de la edificación y por tanto en su comportamiento dinámico por tratarse de una componente intrínseca de la estructura.

5.03 Cargas ambientales

Estas cargas son provocadas por el ambiente en donde se sitúan las estructuras; podría presentarse el caso en donde se tengan dos estructuras con cargas tanto muertas como vivas exactamente iguales, pero en locaciones diferentes, estas estructuras se verán sometidas a cargas ambientales

totalmente desemejantes. Por tanto, las cargas ambientales a pesar de cumplir con la definición de cargas vivas puesto que su localización y su magnitud no suelen ser precisas, radican su diferencia a que no son cargas por uso de la estructura. Dentro de estas cargas se encuentran las cargas de hielo y nieve (su magnitud dependerá de la localización geográfica y forma de la cubierta de la estructura), lluvia (puede producir efectos de encharcamiento en cubiertas planas, este efecto provoca la acumulación de agua en la cubierta que de no ser evacuada de manera adecuada provocará deflexiones en la placa y por tanto podrá acumular mucha más agua incrementando el peso de la misma hasta llegar a producir fallas en la estructura de cubierta), viento (es una de las cargas más complejas de estimar debido a la variabilidad que puede presentar y a las metodologías que existen para su estimación, es necesario resaltar que es a su vez uno de los tipos de carga que más fallas ocasionan en las estructuras) y sismo (este tipo de cargas provocadas por liberaciones de energía a través de las placas tectónicas de la tierra representa movimientos en la base de las edificaciones de difícil estimación, de reducida ocurrencia pero con magnitudes de fuerza muy amplias, por tanto para el diseño ante este tipo de cargas se ha optado por concebir y dotar a las estructuras de capacidades para incursionar en el rango inelástico, de esta manera se aprovechan al máximo los materiales durante periodos cortos logrando estructuras más económicas), estas cargas dado sus magnitudes y su variabilidad para la estimación de efectos son las más retadoras para el ingeniero ya que constituyen la principal causa de falla en las estructuras (McCormac & Brown, 2018).

Para la resolución y comprensión del asunto de diseño y concepción de las estructuras y su comportamiento ante los tipos de cargas a las que se verá sometida durante el ciclo de su vida útil, se han logrado desarrollar distintas metodologías de diseño basadas en las teorías de la resistencia de materiales que buscan concebir un comportamiento seguro de la estructura.

5.1 Métodos de diseño de estructuras en concreto

5.1.1 Método de diseño de los esfuerzos admisibles de trabajo (ASD)

Este método de diseño basa su filosofía en el comportamiento lineal de los materiales, esto en la masa de concreto es válido siempre y cuando las deformaciones que se experimenten sean pequeñas, de lo contrario la linealidad de su comportamiento no se cumplirá, es por esta razón que se busca trabajar limitando el esfuerzo máximo al que los materiales podrán incurrir (esto proporcionará un factor de seguridad de trabajo), en contraposición se utilizarán cargas de trabajo, es decir, la sumatoria por combinaciones de cargas reales que la estructura experimentará.

Debido a los resultados conservadores que implica la suposición de trabajar únicamente dentro del rango lineal de las estructuras en concreto, se ha optado en las últimas décadas por implementar cada vez menos el diseño de estructuras nuevas mediante esta metodología; sin embargo es de esencial conocimiento para el ingeniero dedicado a las patologías dado a que es una metodología que en décadas pasadas se implementó con mucha frecuencia, por lo tanto, existirán diversas estructuras a evaluar que se habrán concebido bajo esta metodología de diseño.

5.1.2 Método de diseño de la resistencia última (LRFD)

Esta es la metodología más empleada en el diseño de estructuras nuevas en concreto reforzado, basa su filosofía en el aprovechamiento máximo de la capacidad del material, esto se logra mediante el cálculo de resistencias nominales del elemento afectados por un coeficiente de reducción de resistencia (siempre menor o igual a uno) de manera que este valor calculado sea siempre mayor o igual a las combinaciones de carga que afectaran a la estructura amplificadas por un factor de mayoración (siempre mayor o igual a uno); con esto se logra conseguir diseños más

económicos e inclusive comportamientos más cercanos a los esperados (ACI 318-19(22), 2022).

5.1.3 Método de diseño de los estados límites

El diseño por Estados Límites es un paso más en el método de Diseño por Resistencia Última. Indica el estado del elemento en el que deja de satisfacer los requisitos de servicio, los elementos de concreto reforzado deben ser analizados con respecto a tres estados límites: Capacidad de carga (seguridad, estabilidad y durabilidad), Deformación (deflexiones, vibraciones e impacto) y formación de grietas.

El objetivo de este análisis es asegurar que ningún estado límite aparecerá en el elemento estructural durante su vida útil. Esta metodología establece condiciones límites aceptables a las que los elementos o la estructura se verán sometidos, por tanto se podrán fijar valores aceptables de desplazamientos de pisos (por ejemplo en casos donde se dispongan equipos instalados dentro de edificaciones que no puedan recibir alteraciones de movimientos por sismos, en estos casos se deberá limitar al máximo el desplazamiento de la estructura mediante la concepción de elementos más rígidos o incluso estructuras con disipadores de energía o aisladores sísmicos), vibraciones (en caso de puentes o entrepiso con sistemas de lámina colaborante), fisuraciones (por ejemplo en estructuras estancas) entre otros; se deberá entonces concebir la estructura desde el diseño para soportar todas las condiciones de carga enmarcadas en los estados límites de diseño de manera que se cumplan siempre con los criterios de seguridad, sostenibilidad y funcionalidad (Rupay Taipe, 2022).

5.1.4 Método de diseño por desempeño

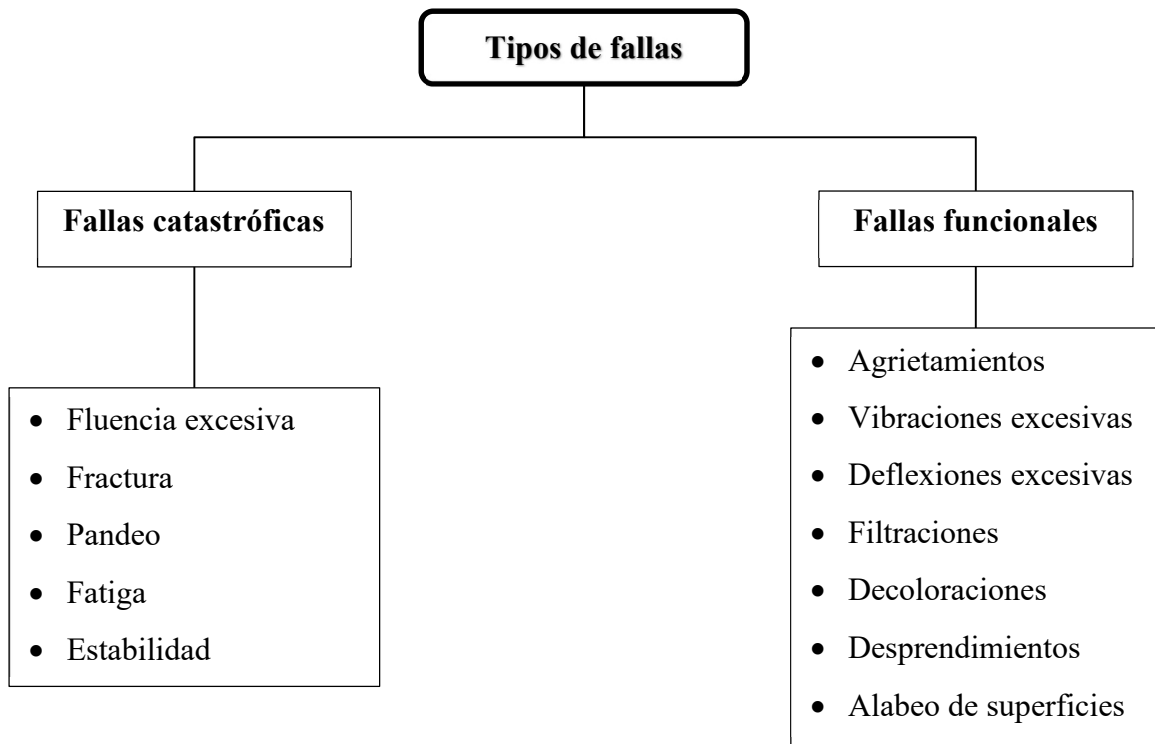
Esta filosofía de diseño se basa en encontrar las capacidades máximas de los elementos teniendo como prioridad el comportamiento inelástico de la estructura y la formación de mecanismos mediante rótulas plásticas, desde aquí se podrá encontrar

las fuerzas máximas que podrán soportar los elementos y por tanto las fuerzas que podrán llegar a transmitir a otros elementos de manera que se evite el colapso. Se definirá un grado de desempeño para la estructura a analizar (operacional, Ocupación inmediata, seguridad de la vida o prevención del colapso) de acuerdo con una probabilidad de retorno del sismo de diseño. Con estas fuerzas máximas que se logran transmitir a los demás elementos principales de la estructura se dimensionarán cada uno de los elementos desde los niveles superiores hasta llegar a niveles inferiores; esta metodología se aproxima más a la realidad pues no requiere involucrar factores estándares de coeficientes de disipación de energía que pueden provocar desviaciones entre el cálculo y el comportamiento real de la estructura, sin embargo esta metodología requiere un análisis más detallado de todos los elementos involucrados (Edilton Rodrigues, 2021).

Al alcanzar comportamientos no esperados a los predichos mediante las metodologías de diseño se considera que se ha presentado una falla; por tanto, es importante generar una clasificación en donde se establezca la gravedad de la afectación para que de esta manera se generen estrategias de intervención de la estructura, esta clasificación deberá variar según la cantidad de componentes de la estructura que se encuentren afectados y su magnitud.

5.2 Tipos de fallas

Caracterizar los tipos de fallas que se pueden encontrar dentro de las estructuras se basa en establecer límites de tolerancia en la funcionalidad, seguridad, estética, economía y sostenibilidad ambiental; cuando dichos límites (de resistencia o servicio) se sobrepasan se podrá hablar de fallas estructurales (catastróficas o funcionales) (Benítez, Rocha, & Rodrigues, 2020). En la ilustración 17 se muestra la clasificación de los tipos de fallas que se pueden presentar en las estructuras.



*Ilustración 17 Clasificación de algunos tipos de fallas en las estructuras
Fuente: Elaboración propia*

5.2.1 Fallas catastróficas

Las fallas catastróficas se relacionan directamente con la pérdida de la capacidad de elementos estructurales que infieren un exceso en los estados límites de resistencia; es decir, los elementos en cuestión verán una reducción considerable en su capacidad (Cirilo Manzanares, 2013). De manera general es posible clasificar estas fallas en cinco tipos:

5.2.1.1 Fluencia excesiva:

Se tendrá este tipo de falla cuando el acero de refuerzo alcance deformaciones muy grandes, de esta manera se dará inicio a un mecanismo de falla dúctil; esto partiendo de una sección con la suficiente cantidad de acero como para evitar la falla de la sección por módulo de rotura y suponiendo asimismo que dicha cantidad de acero no genera una sección sobre reforzada, por tanto se

sabr  que bajo la presencia de cargas altas la secci3n de concreto iniciará su falla mediante la fluencia del acero de refuerzo gracias a las altas deformaciones que este podrá desarrollar. Posterior a esto, al incrementar más las cargas se producirá una fisuraci3n con un patr3n definido de trazas que irán desde la fibra más extrema en tensi3n hasta llegar al eje neutro del elemento, una vez alcanzado el límite de la secci3n ocurrirá una plastificaci3n por fluencia originando una r3tula plática; quiere decir que el elemento habrá alcanzado su capacidad máxima (Márquez Pe naranda, Vergel Ortega, & Jácome Carrascal, 2021).



*Ilustraci3n 18 Falla a flexi3n en viga principal de puente.
Fuente: (El Comercio, 2015)*

Es posible hablar de un colapso de un elemento provocado por este tipo de fallas cuando se supera el límite de articulaciones plásticas como se observa en la ilustraci3n 18, all  como mecanismo final de la estructura se presenta una articulaci3n en el centro de la luz provocando una condici3n de inestabilidad dado a que se trata de un miembro simplemente apoyado; es decir, este mecanismo de falla dependerá de las condiciones iniciales de apoyo del elemento en cuesti3n. Típicamente en los c3digos de construcci3n se insiste en la importancia de la redundancia de las estructuras, pues el fallo de

un elemento no debe condenar a la falla generalizada de la estructura (situación compleja de lograr en estructuras como puentes).

5.2.1.2 Fractura:

Ocurre una fractura cuando existe una separación física en dos o más partes de los materiales que componen el elemento estructural; este tipo de fallas pueden presentarse de manera súbita (típicas fallas por esfuerzos cortantes o de compresión) o progresiva (fallas típicas de elementos dúctiles) comprometiendo la estabilidad de toda la estructura (Amaya Arciniegas, 2021).



*Ilustración 19 Comparativa gráfica entre grieta y fisura
Fuente: (Enrique, 2017)*

En términos generales se establece la diferencia entre fisuras y grietas en la medida en que este tipo de interrupciones en el material generan pérdida de capacidad mecánica del elemento como se muestra en la ilustración 19, esto indica que no será una afectación únicamente estética. Por su parte, el espesor de una fisura deberá ser menor a los 5 mm; si es mayor será una grieta (Puma Visa & Aycachi Huareccallo, 2020).

De esta manera será posible hablar de fracturas cuando se tienen separaciones físicas del material producto de esfuerzos que excedieron la resistencia a la ruptura del material como se muestra en la ilustración 20; al observar fracturas se debe ser muy cuidadoso en la identificación de las causas ya que los patrones de las trazas sobre el material revelan las condiciones de esfuerzos internos a las que está sometido el elemento y por tanto las causales de la falla (Roman Celi, 2019).



*Ilustración 20 Falla por fractura en viguetas de entepiso.
Fuente: (Murillo, 2004)*

5.2.1.3 Pandeo:

Se presenta pandeo en elementos esbeltos sometidos a cargas de compresión; al aplicar una carga axial sobre un elemento de concreto reforzado el acero de refuerzo tomará parte de esta carga, cuando este no se encuentra confinado adecuadamente ocurrirá una falla por pandeo, típicamente se emplean flejes de acero con ramas auxiliares para garantizar la estabilidad del elemento brindando apoyo lateral a las barras de refuerzo (Atao Huamán, 2020).



*Ilustración 21 Pandeo en columna de concreto reforzado.
Fuente: (Ccallo, 2016)*

En la ilustración 21 se presenta una falla de un muro por efecto del pandeo, esta falla provoca que el elemento de concreto reforzado no pueda entrar a un rango inelástico y por tanto no logre desarrollar su máxima resistencia, se trata de una condición de falla muy delicada ya que afecta principalmente a columnas, muros de carga y elementos presforzados como vigas con gran luz; si la estructura no cuenta con una redundancia adecuada (típico caso de puentes) se verá condenada a la falla total o parcial.

5.2.1.4 Fatiga:

Se tiene fatiga cuando se aplica una carga repetitiva sobre los elementos estructurales; dicha carga será menor a la capacidad máxima del elemento, sin embargo, dado a su naturaleza cíclica conducirá a un daño progresivo de los elementos. Típicamente es posible ver este tipo de falla en estructuras que soportan cargas móviles como puentes o estructuras de soporte de máquinas con vibraciones considerables como se muestra en la ilustración 22 (CILA, 2019).



*Ilustración 22 Falla por fatiga en puente de tres luces.
Fuente: (La fatiga de los puentes, 2019)*

En etapas tempranas las fallas por fatiga pueden verse como micro fisuras que generan concentraciones de esfuerzos; al continuar repitiendo las cargas estas micro fisuras incrementan su tamaño hasta ocasionar la falla, el periodo comprendido entre la aparición de la primer micro fisura y la propagación de esta será la vida útil de la estructura (Uría Arraya, 2020).

5.2.1.5 Estabilidad:

Se habla de fallas relacionadas con la estabilidad cuando existen asentamientos diferenciales (relacionados con la capacidad de carga), deslizamientos o volcamientos en la estructura como se muestra en la ilustración 23 que afectan directamente la seguridad y durabilidad de la edificación, esto se traduce directamente en incrementos de la fuerza aplicada sobre los elementos principales (Márquez Espinoza, 2021).



Ilustración 23 Fallas por estabilidad externa de estructuras
Fuente: a) (Blanco, 2012); b) (La Terraza, 2013); c) (An Ingenieros y Consultores, 2021) & d) (RPP, 2019)

Estas condiciones suelen estar asociadas a las condiciones del suelo sobre el cual se apoya la estructura y su sistema de cimentación; en muchos casos no se provee a la fundación de las prestaciones adecuadas para resistir dichos efectos desde la etapa de diseño. Dado a que es una falla que se produce a nivel de fundaciones suele ser compleja y costosa de intervenir; su falla puede aparecer bajo la acción de cargas verticales (cargas de gravedad), cargas horizontales (empujes laterales como viento, sismo o empujes de fluidos o

terrenos) o sobrecargas (por ejemplo, condiciones de inestabilidad o sobreesfuerzo en el terreno por construcciones vecinas); en la ilustración 24 se muestra el colapso de una estructura por falla de estabilidad general o externa. (Herrera Gaspar & Silva Silva Santisteban, 2021).



*Ilustración 24 Falla por volcamiento de edificación.
Fuente: (bloggauta wordpress, 2011)*

Los tipos de fallas descritos anteriormente comprometen de manera importante a la estructura ya que afectan directamente a la seguridad, funcionalidad, estética, economía y sostenibilidad ambiental del proyecto.

Exceder los estados límites de resistencia expuestos anteriormente conducirá a fallas en los elementos estructurales, dependiendo de los elementos estructurales afectados se podrá presentar una degradación importante de la capacidad portante de un elemento estructural localizado, un colapso parcial o total de la estructura.

5.2.2 Fallas funcionales

Las fallas funcionales por su parte se relacionan con un exceso en los estados límites de servicio, es decir, definen el comportamiento que sobrepasa límites en cuanto a funcionalidad, costo y estética; usualmente se relacionan con el confort o comodidad del uso de la estructura; sin embargo, no representan riesgo en cuanto a la seguridad de la estructura o sus habitantes (Sanchez Mena, 2022). Estas fallas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

5.2.2.1 Agrietamientos

Se consideran agrietamientos a separaciones en la sección de máximo un milímetro, estos no afectan el comportamiento de la estructura sin embargo afectan la estética de esta; suelen ocurrir por variaciones en las condiciones de temperatura, juntas no previstas entre elementos estructurales y no estructurales, deficientes procesos de curado, exceso en la cantidad de agua de la mezcla de concreto, asentamientos de la estructura entre otros; un patrón típico de estos tipos de grietas se muestra en la ilustración 25 (Lewis Rodríguez, 2019).



*Ilustración 25 Agrietamiento por cambios de temperatura.
Fuente: (industry surfer, 2023)*

Estos fenómenos requieren particular atención pues si se detecta que la grieta está afectando a un elemento estructural y adicionalmente se encuentra activa (la grieta sigue incrementando su espesor y longitud) se requerirá de una intervención inmediata (muchas de las causas de fallas catastróficas proveen sus primeros indicios mediante la aparición de pequeñas fisuras), caso contrario ocurre cuando esta afecta elementos no estructurales o se detecta que la grieta ya no se encuentra activa. Estas fallas son de relativa facilidad correctiva siempre y cuando se garantice que no se seguirá produciendo el fenómeno causal.

5.2.2.2 Vibraciones excesivas

Se suelen presentar vibraciones excesivas en estructuras esbeltas con baja rigidez y bajo amortiguamiento como pasarelas o puentes con losas delgadas o suspendidas que contienen cargas móviles como el tránsito vehicular, peatonal o uso de maquinarias (Casado Sánchez, Sanz, Muñoz Díaz, & Poncela Méndez, 2011).

Para establecer un límite en la tolerancia de las vibraciones se acostumbra a hablar de límites tolerables para una persona; se ha encontrado que por lo general los órganos del cuerpo humano trabajan en frecuencias de entre los 4 y los 8 Hz; por tanto, las vibraciones serán perceptibles para un rango de entre los 8 y 10 Hz. Sin embargo, existen limitaciones importantes cuando se trata de estructuras que deben soportar equipos de alta sensibilidad ya que podría ocurrir dificultades en la operación de estos; en este caso se consideraría una falla importante de la estructura en términos de funcionalidad y requerirá de atención inmediata (Lozano Guevara & Marcas Arrieta, 2022).

En general este tipo de fallas pueden solucionarse mediante el aumento de rigidez de los elementos en cuestión (típicamente se trata de intervenciones a las losas en concreto), dichas intervenciones producen el cierre de operación

de parte de la estructura, por tanto, demandará una inversión importante en materia económica que muchas industrias no pueden permitirse; es por esta razón que se suele permitir una tolerancia en estas fallas sin realizar actividades correctivas. En la ilustración 26 se muestra el modelo idealizado de un sistema para el control de vibraciones; radica su importancia en el control y comprensión del comportamiento físico de las estructuras sometidas a este tipo de solicitaciones.

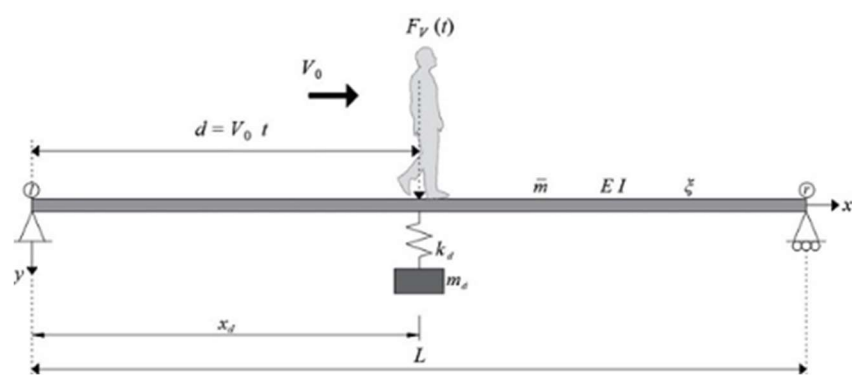


Ilustración 26 Modelo dinámico idealizado de acción y control de vibraciones en estructura de concreto.

Fuente: (Huergo & Hernández, 2020)

5.2.2.3 Deflexiones excesivas

Para elementos en concreto reforzado se establecen límites en las deflexiones, de manera que la ocupación de la estructura no sea molesta; un claro ejemplo de deflexiones excesivas es mostrado en la ilustración 27. Los límites para las deflexiones estarán definidos por el uso de los entrepisos; la norma colombiana NSR-10 establece límites más conservadores para entrepisos que soportan elementos susceptibles a daños, por otra parte, los entrepisos que no cuentan con la anterior limitación podrán tener deflexiones mayores; esto no quiere decir que si se exceden los límites establecidos la estructura colapsará.

La tolerancia de las deflexiones afecta principalmente la funcionalidad de la estructura (un entrepiso con grandes deflexiones podrá provocar agrietamientos en muros de tabiquería, ruptura de ventanas, desajuste de puertas, acumulación de líquidos por incorrecto drenaje entre otros), las intervenciones para este tipo de fallas suelen ser localizadas, sin embargo, suele relacionarse esta falla en muchas ocasiones a la necesidad de reforzamiento de la estructura, por tanto, su intervención podría ser bastante invasiva y costosa (Mamani Apaza, 2023).



*Ilustración 27 Falla por deflexión excesiva en losa de entrepiso de concreto.
Fuente: (IStock, 2023)*

Entre los métodos de reparación y reforzamiento para este tipo de fallas es posible encontrar tensionamientos externos con cables o con fibras (mediante estos se logra invertir la curvatura de sección; sin embargo, es necesario garantizar una superficie adecuada para generar un anclaje adecuado, adicionalmente se debe evaluar la sección de manera que esté en la capacidad de soportar las cargas de compresión adicionales), recrecimientos de sección con corrección de deflexión, adiconamiento de apoyos o demoliciones localizadas de los elementos afectados. Bajo ningún motivo se deben corregir

estas deflexiones en los entrepisos mediante el adiconamiento de capas de mortero u otros tipos de afinados de piso, esto provocará sobrecargas en los elementos y por tanto deflexiones adicionales (Norabuena Espinoza & Barrientos Huaypar, 2022).

5.2.2.4 Filtraciones

Se produce principalmente en estructuras que deben mantener condiciones de estanqueidad como tanques que almacenen fluidos o estructuras de cubiertas en donde deben limitarse los anchos de grietas (Marcas Arrieta, 2022), un claro ejemplo de filtraciones en estructuras que deben almacenar líquidos se muestra en la ilustración 28.



*Ilustración 28 Falla por filtraciones en tanque aéreo.
Fuente: (La Capital, 2021)*

Comúnmente se emplean materiales impermeabilizantes para impedir el paso de los fluidos, también es común la incorporación de aire dentro del concreto para dificultar el paso del fluido, sin embargo, las soluciones anteriores no son suficientes si no se cuenta con una cuantía suficiente de acero dentro de la masa de concreto en conjunto con un correcto detallado de vértices y juntas

que permitan el control de fisuración ante cambios de temperatura; para esto existen diversas soluciones en el mercado como los materiales epoxis o las cintas PVC.

5.2.2.5 Decoloraciones

Son alteraciones en la uniformidad del color de la masa de concreto producidos por efecto de la reacción de los agregados, composición del cemento (altos contenidos de álcalis), tipo de agua empleada en la mezcla, tipo de acabado, agua empleada para el curado o la metodología empleada para el vaciado del concreto (Casas Figueroa, 2018).

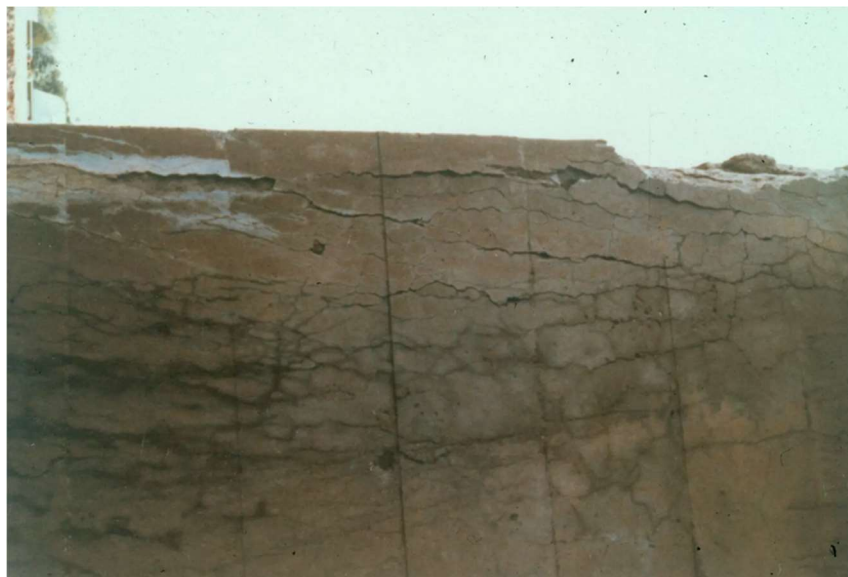


*Ilustración 29 Decoloraciones y manchas en elemento de concreto.
Fuente: (Decoloración del concreto, 2017)*

En la ilustración 29 se muestra una afectación por decoloración a una estructura de concreto; para solucionar este tipo de fallas que será solo de tipo estético bastará con aplicar productos de limpieza como detergentes neutros o en caso de ser una decoloración poco superficial y severa se verán emplear productos especializados en esta materia.

5.2.2.6 Delaminaciones

Cuando el concreto entra en su etapa de curado alcanza temperaturas altas las cuales provocan exudación del agua de la mezcla de concreto; estas a su vez producen una separación entre las capas limitando la adherencia entre ellas como se muestra en la ilustración 30. Su manifestación suele presentarse en pisos en donde se da un determinado acabado de manera inadecuada que obstruye el proceso de fraguado y genera grietas y posibles cambios de color sobre una superficie de área bien definida (Alva Ortega, 2019).



*Ilustración 30 Falla por delaminación en piso de concreto.
Fuente: (Arango Mejía, 2013)*

5.2.2.7 Desprendimientos

Se trata de separaciones de las capas superficiales del concreto como se muestra en la ilustración 31; típicamente ocurre cuando existe desgaste del material por impactos, deformaciones excesivas de las fibras extremas, cambios térmicos abruptos o desgaste por circulación de cargas (en industrias o puentes) (Unidad de Puentes LanammeUCR, 2020).

Al aparecer una fuerza externa y generar el desprendimiento de la capa de recubrimiento del acero de refuerzo se corre el riesgo de que este inicie un proceso de corrosión y se presente una falla de mayor impacto.

Es necesario generar reparaciones de manera que se provea de los recubrimientos adecuados al acero de refuerzo, radica su diferencia con las delaminaciones en la medida de que las delaminaciones son efectos de separación en las capas internas, por otra parte, los desprendimientos se darán únicamente en las capas superficiales; adicionalmente sus causas serán completamente diferentes como se estudia en el Capítulo VI.



*Ilustración 31 Falla por desprendimiento de la superficie de concreto.
Fuente: (Constro Facilitator, 2019)*

5.2.2.8 Alabeo de superficies

Se relaciona con la curvatura producto de una deformación causada por fenómenos de retracción y expansión que nos son controlados adecuadamente mediante acero de refuerzo (ya sea por la ausencia o por la incorrecta colocación de este), estos se originan por cambios de temperatura o humedad dentro de la masa de concreto; es típico encontrar este tipo de fallas en pisos

industriales o vías de concreto reforzado (Chavez Bocanegra & Vasquez Ruiz, 2021).



*Ilustración 32 Falla por alabeo y cambio de volumen en losas de concreto.
Fuente: (Holcim Colombia S.A., 2011)*

Actualmente, gracias a la evolución en la tecnología de los materiales de la industria de la construcción se pueden evitar las fallas funcionales mencionadas anteriormente siempre y cuando se aborden desde la etapa de concepción y diseño, esto generará un costo inicial adicional a la estructura, sin embargo, a largo plazo en temas de mantenimiento o posventas se generará un beneficio mayor. Cabe destacar que todos estos tipos de fallas podrán contar tanto con acciones correctivas como preventivas, es responsabilidad de los involucrados en el proyecto evaluar hasta que medida se podrá prever en la ejecución del proyecto este tipo de fallas sabiendo que siempre será más económico tratarlas en etapas tempranas.

5.3 Estudio de fallas

Cuando se habla del estudio de fallas es necesario incurrir en el campo de la investigación encontrando múltiples causas de falla que alimentarán hipótesis iniciales, se observará entonces que el desarrollo de un evento de falla será la relación fortuita de una serie de eventos infortunados que conducirán a ese tren de falla (encontrando en muchas ocasiones ese eslabón débil que desencadena el evento). Los eventos que conducen a estos desenlaces

desafortunados pueden tener múltiples causas como lo son errores de concepción, diseño o construcción, malentendidos en interpretación de planos constructivos, desconocimiento o inexperiencia del área técnica e inclusive acciones de corrupción o violencia (Culma Rodríguez & Forero Osorio, 2021).

Será necesario evaluar cada una de las hipótesis iniciales de manera que se genere un razonamiento particular a todas las posibles causas sin llegar a juicios precipitados, es aquí en donde la experiencia del equipo y todos los vinculados a la investigación cobra real importancia; sin embargo, en labores sistemáticas de investigación se debe ser metódico y riguroso en responder preguntas fundamentales de hecho.

Las preguntas fundamentales de hecho buscan obtener información objetiva sobre el evento, esta información deberá ser verificable, correcta y tangible; para esto será necesario reunir datos, registros, evidencias o testimonios confiables que respondan a las interrogantes de manera que no se dé opción a interpretaciones subjetivas.

Pueden existir múltiples preguntas relacionadas con una investigación de falla, sin embargo, parte esencial del trabajo investigativo responderá a incógnitas como: ¿cuál fue la falla?, ¿cuál es la magnitud y extensión de la falla?, ¿cuándo ocurrió?, ¿por qué ocurrió?

Dichas preguntas darán como resultado el material tangible del estudio de fallas que será en informe patológico, este informe será responsabilidad única de un equipo multidisciplinario de investigadores y traerá consigo una serie de implicaciones que relacionarán a los involucrados en el proyecto; implicaciones que en muchos casos serán de carácter legal llegando a involucrar expertos de muchas disciplinas, es por esto que el informe deberá limitarse únicamente al área técnica siendo totalmente objetivo (no se podrá inclinar de manera conveniente a alguna de las partes, se requiere de total neutralidad en todo el proceso) limitándose únicamente a la evidencia disponible.

5.4 Informe patológico

Se trata de un documento redactado de forma técnica, con lenguaje claro y sustentado en donde se muestra el proceso adelantado durante la etapa de investigación o estudio de las fallas; allí se mostrará a detalle cada una de las causas encontradas brindando un análisis de las consecuencias que se desencadenan (Saavedra Guzmán, 2019), de manera general, un informe patológico deberá contener los siguientes elementos:

5.4.1 Introducción:

Se mencionará la intención de la realización del trabajo en conjunto con datos general de la estructura a evaluar.

5.4.2 Alcance y metodología:

Es importante definir claramente el alcance del trabajo a realizar de manera que no se tenga espacio para inconvenientes contractuales, aquí se deberá describir el tipo de análisis que se realizará a la estructura, de la misma forma se argumentará la necesidad de los ensayos a emplear en el proceso de investigación y su importancia dentro de las metodologías seleccionadas por el equipo investigador.

5.4.3 Descripción de la estructura:

Se proporcionará una descripción detallada de los elementos de la estructura basándose en toda la información que se pueda recolectar (planos, fotografías de la etapa de construcción, técnicas de construcción, registros de ensayos de los materiales, antecedentes, entre otros) de manera que se pueda caracterizar los elementos principales que la componen; material, sistema estructural, localización geográfica, cargas aplicadas, consideraciones especiales, construcciones vecinas, uso de la estructura, dimensiones de elementos, estado actual de los elementos y demás características relevantes.

5.4.4 Observaciones y evaluaciones:

Se mostrarán los registros fotográficos, mediciones de campo, testimonios de ocupantes, muestras y ensayos realizados que permitirán caracterizar los elementos afectados, todas las evidencias mostradas deberán estar correctamente descritas indicando las observaciones puntuales que se registran en conjunto con parámetros que permitan identificar la localización del elemento evaluado. Dentro de la evaluación se deberá mostrar todos los daños y potenciales daños que la estructura presente enfatizando en la magnitud de estos.

5.4.5 Análisis y conclusiones:

Empleando las observaciones y evaluaciones realizadas con anterioridad se realizará un análisis de los problemas y daños encontrados en la estructura en donde se mostrarán las posibles causas y consecuencias de estos, se mostrarán aquí las posibles rutas del tren de falla, será la parte más importante del informe en especial si es requerido para determinar procedimientos judiciales.

5.4.6 Recomendaciones:

Basado en los resultados obtenidos de las fallas se propondrán procedimientos alternos si es el caso de realizar investigaciones y evaluaciones estructurales más profundas (como pruebas de carga o análisis de plastificación progresiva), reparaciones, reforzamientos o repotenciaciones de la estructura.

5.4.7 Anexos:

Se adjuntará toda la evidencia producto del desarrollo del análisis tales como fotografías adicionales, ensayos de laboratorio, mediciones, entre otros que respalden toda la información presentada con anterioridad.

Toda la información que se presenta en un informe patológico deberá estar soportada en evidencias; de la misma forma se debe tener mucha precaución en la terminología y redacción

de este ya que este deberá contener un lenguaje profesional y una forma organizada en el desarrollo de este de manera que no exista cabida a confusiones o interpretaciones erróneas.

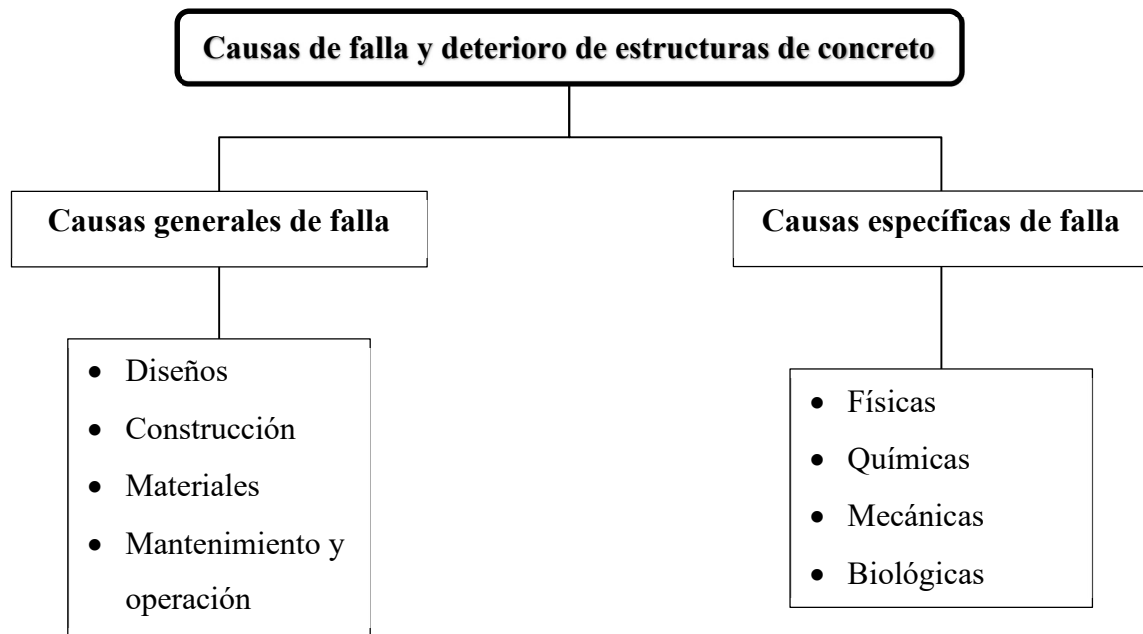
Capítulo VI

Causas de falla y deterioro de estructuras de concreto

En el proceso de investigación de fallas de estructuras como ya se mencionó es clave la identificación de las causas de falla. Realizar esta actividad es una tarea de alta complejidad para un único investigador, más aún si este cuenta con poca experiencia en el tema, por esto será esencial contar con equipo suficientemente preparado y multidisciplinario de manera que pueda generarse contraste de diferentes conceptos y puntos de vistas con soporte científico.

Es necesario que el grupo de profesionales que se encuentran aplicando las metodologías de investigación de fallas tengan conocimientos sobre el funcionamiento, la capacidad estructural y los tipos de fallas con el fin de conocer los diferentes tipos de afectaciones y las incidencias que cada una de las patologías representan mediante manifestaciones, sabiendo como premisa que la afectación directa a la estructura no se generará por una única causa; todo lo contrario, será un acumulado de varias de estas.

Las afectaciones a una estructura pueden provenir de diferentes orígenes; sin embargo, es posible generar una clasificación de las causas de falla de manera general, de modo que la tarea se simplifique en mayor medida. Una vez identificadas estas causas generales será posible avanzar a la particularidad del asunto hasta llegar a una causa específica. En la ilustración 33 se muestra la clasificación de causas de falla y deterioro de estructuras de concreto; seguidamente se presentarán algunas de las causas generales y específicas típicas de fallas y deterioro de estructuras.



*Ilustración 33 Causas de falla y deterioro de estructuras de concreto
Fuente: Elaboración propia*

Se muestran entonces las causas de fallas de forma general en conjunto con algunas de las más frecuentes causas de fallas de forma particular que se pueden presentar en estructuras de concreto.

6.1 Causas generales de falla

De manera general se pueden clasificar las causas de falla en deficiencias a nivel estructural, estas deficiencias involucrarán a una o varias partes implicadas en el proyecto, bien sea en etapas tempranas como el diseño o etapas de operación y uso de la estructura como el mantenimiento (Monje Penagos, 2022).

6.1.1 Diseños

Las deficiencias en los diseños se presentan comúnmente por falencias o descuidos en conceptos básicos de la ingeniería estructural, errores de cálculo o por super optimizaciones en las capacidades de los elementos en donde se llegan a estados en

los que la estructura colapsa únicamente ante cargas gravitatorias o más grave aún ante cargas de peso propio (BibLus, 2022).

Una práctica frecuente en la actualidad es el diseño mediante software especializado que trae consigo un sinnúmero de riesgos al no tener claros los conceptos básicos de la mecánica y diseño estructural. Muchas veces se incorporan ingenieros con conocimientos insuficientes en el cálculo estructural con la única inducción del funcionamiento de un software, se convierte así al ingeniero en una máquina que solo suministra datos de entrada y adopta sin criterio alguno todos los resultados del software; desafortunadamente el mercado colombiano ha tendido a adoptar esta dinámica dado el alto nivel de competencia no calificada en el campo de la consultoría estructural en donde el costo de los diseños estructurales no es suficiente como para realizar una adecuada ingeniería de detalle.

Es típico encontrar diseños en el medio nacional con detalles genéricos que “aplican para todos los proyectos”, elementos como conexiones que simplemente son copiados en múltiples proyectos y nunca son revisados cuidadosamente. Muchas veces el rol de detallado de la estructura se deja a cargo del dibujante o modelador BIM (Building Information Modeling), que frecuentemente carece de formación en ingeniería estructural. También es típico encontrar que estos detalles constructivos se dejan a cargo del constructor, quien delega al maestro de obra para que, basado en su experiencia los ejecute.

Es importante que el ingeniero diseñador cuente con criterios básicos de ejecución de obras, pero será mucho más importante que se cuente con el permanente acompañamiento del constructor en etapas de diseño quien avalará la factibilidad de la ejecución de los diseños y detalles estructurales ya que muchas veces por materia constructiva no es posible ejecutar los diseños, bien sea por exceso de costos, necesidad de maquinarias o formaletas con las que el constructor no cuenta o imposibilidad física de ejecutar maniobras con la tecnología actual.

Los profesionales dedicados a la ingeniería estructural deben permanecer en constante actualización sobre los avances en la ingeniería, sabiendo que dichos avances muchas veces son provocados por lecciones aprendidas de fallas.

Un error típico en las fallas que tienen su origen directo en el diseño estructural es la ausencia de conocimiento espacial del proyecto; esto quiere decir que los ingenieros calculistas muchas veces se limitan a observar las variables de diseño y recomendaciones geotécnicas que proporciona el ingeniero de suelos sin llegar siquiera a aproximar una visita de obra y comprobar el estado del terreno, esto será una falencia importante ya que el ingeniero diseñador podría omitir factores como ambientes agresivos (ambientes salinos o altamente corrosivos para los cuales deberá tomar medidas como proporcionar recubrimientos adecuados al acero de refuerzo), sitios con alta susceptibilidad a deslizamientos, sobrecargas potenciales por construcciones vecinas que pueden existir en el momento o que podrían surgir en un futuro y afectar el comportamiento de la estructura durante su vida útil.

Otra de las falencias más comunes en la etapa de diseño es la deficiencia en la idealización de una estructura; dada la relativa facilidad de uso de los actuales softwares de diseño se ha tendido a realizar modelos matemáticos mucho más complejos que pretenden reflejar de manera más detallada el comportamiento de la estructura, esto en ocasiones trae consigo comportamientos que difieren al esperado sabiendo que distan de la realidad; usualmente el mejor modelo matemático para una estructura será el más sencillo a menos que se requiera realizar análisis avanzados como la evaluación mediante elementos finitos de conexiones, aberturas o elementos particulares de interés siempre y cuando se tenga conocimiento e intuición de los resultados esperados (Industry Sufer, 2022).

No se podrá contar con el apoyo de un software de diseño sin tener criterios previos de las magnitudes esperadas de los resultados (desaparecerá entonces la importancia

del criterio ingenieril si se adopta como verdad última todos los resultados de un software sin siquiera tener una mirada crítica de ellos).

La interacción con el cliente del proyecto es de vital importancia en las etapas de diseño y concepción de la estructura; puede que una estructura cumpla todos los estándares de seguridad, economía, sostenibilidad ambiental y estética, sin embargo, si la estructura no fue concebida de manera adecuada para desempeñar sus funciones se considerará como una falla, por ejemplo, un puente que no respete el gálibo para un tránsito adecuado de vehículos bajo él.

En la etapa de diseño de una estructura es común encontrar deficiencias dentro de las especificaciones técnicas de los materiales, éstas deben figurar en los planos de diseño enunciando la calidad de los concretos para cada tipo de elemento estructural, la calidad del acero de refuerzo y las propiedades mínimas de desempeño; esta información debe ser muy clara de manera que no exista cabida a interpretaciones erróneas en obra.

Es de vital importancia que el ingeniero diseñador cuente con conocimientos y criterios suficientes para la selección de los tipos y calidades de materiales, de esto dependerá en gran medida no solo el comportamiento estructural sino el costo directo de la estructura y por tanto la viabilidad del proyecto sabiendo que, dentro de todas las disciplinas involucradas en el desarrollo del proyecto, la estructura es quien más peso económico tiene (por ejemplo, será innecesario especificar calidades de concreto de altas prestaciones en una escalera típica de uso residencial, por otra parte, será dudoso especificar calidades bajas de concreto en la ejecución de pilotes, practica que es muy común en el medio).

Es importante que dentro de las especificaciones técnicas del proyecto se considere la durabilidad de este, por tanto, será necesario incorporar temas de mantenimiento estructural. Para garantizar la difícil labor de durabilidad de la estructura han resaltado

empresas dedicadas a la tecnología del concreto quienes están demostrando que la inversión en materia de prevención de fallas en el concreto puede ser importante en términos económicos de corto plazo, sin embargo, a largo plazo resultará más eficaz monetariamente solicitar su acompañamiento e incorporar sus tecnologías (Argos, 2022).

La durabilidad de las estructuras de concreto dependerá en gran medida de la experiencia del ingeniero estructural en prever los diferentes escenarios a los cuales la estructura se verá sometida durante su vida útil, por esto, es tarea fundamental que el ingeniero diseñador contemple todos los tipos de cargas que se puedan presentar en conjunto a la probabilidad e incertidumbre en su determinación y aplicación en acción combinada con otros tipos de cargas; esto se traduce en estimar y aplicar todas las combinaciones de carga posibles que puedan presentarse con los correspondientes factores de mayoración (recordar que los factores que se presentan en las normativas son valores mínimos y por tanto quedará a criterio del ingeniero diseñador emplear valores mayores o adoptar los propuestos por el código).

Así mismo, es importante la correcta aplicación de los factores de reducción de resistencia enfocadas a un tipo de comportamiento del material ante un tipo concreto de acción, por tanto, sabiendo que son valores aplicables únicamente al material, no será posible alterarlos para cumplir con relaciones de resistencia demanda.

Sabiendo que el ejecutar diseños pretende concebir estructuras en su mayoría nuevas y seguras, no cabe posibilidad alguna de admitir este tipo de concepciones sabiendo que se encontrarán sobreesforzadas en especial cuando se trabaja con valores mínimos de los códigos de diseño. No tiene ningún caso realizar cálculos complejos y dispendiosos sabiendo que al momento de un diseño se omitirá el resultado de este, admitiendo estructuras cuyas relaciones de demanda capacidad superan el 100%.

La evaluación de irregularidades en las estructuras durante la etapa de análisis es una frecuente deficiencia puesto que muchas veces no se cuenta con el conocimiento apropiado para su determinación. Uno de los errores típicos en la concepción de estructuras es la complacencia excesiva al arquitecto o cliente del proyecto, pues pareciera que actualmente es este quien realiza toda la concepción geométrica de la estructura (en muchos proyectos típicos colombianos es el arquitecto quien define los espesores de placas, secciones y ubicaciones de columnas y muros de concreto; parece que el papel del ingeniero se ha limitado a obtener datos de un software para ubicar cantidades de acero de refuerzo, generar despieces y otorgar cantidades de obra), esto sumado a la mecánica del medio comercial actual constituye un problema enorme en la concepción de estructuras (Carrión Zamora, 2016).

Será necesario recordar que el principio de evaluar irregularidades en estructuras es aplicar un “castigo” en el comportamiento de la estructura que afectará directamente la economía del proyecto; sin embargo, este “castigo” está orientado a desincentivar la concepción de estructuras irregulares, por tanto, contar con irregularidades de todo tipo (en especial cuando se tiene una irregularidad de ausencia de redundancia o irregularidades de categoría extrema en planta o en altura) no pretende calcular valores de coeficientes de capacidad de disipación de energía bajos, todo lo contrario, indica que la estructura no tendrá comportamientos estructurales adecuados y por tanto, deberá replantearse por completo su concepción.

La complacencia, falta de formación y criterio estructural actual de los arquitectos ha provocado que el protagonismo y peso del ingeniero estructural se vea apaciguado, de manera que, si un ingeniero objeta en la concepción de una estructura, el cliente tomará una posición simple, cambiará y buscará otro ingeniero diseñador que realice la tarea sin objetar y a un menor costo.

6.1.2 Construcción

Existen deficiencias en etapas constructivas que típicamente pueden deberse a errores en la interpretación de planos en donde el armado de los elementos estructurales como vigas, columnas o sistemas de fundaciones no corresponden a lo especificado en planos de diseño; es típico observar en sistemas de entrepisos que las mallas de refuerzo superior se “escurren” hacia la parte inferior del elemento dotando así de ningún tipo de refuerzo negativo al elemento, esto ocasionará fallas importantes en las zonas sobre los apoyos. Otro error frecuente en obra es la incorrecta ubicación de mallas de refuerzo que no son simétricas en su armado, es decir, mallas que cuentan con grafiles de diferente grosor en cada sentido (Aceros Arequipa, 2022).

Los diseñadores estructurales típicamente cuentan con detallados adicionales para elementos sensibles como aberturas en muros para puertas y ventanas, remates de borde de losa, uniones de elementos no estructurales, confinamientos adicionales en elementos específicos de concreto, refuerzos adicionales en elementos de concreto de gran altura, entre otros; por tanto es necesario asegurar la lectura y comprensión total de los planos estructurales por parte del constructor de manera que no existan omisiones bien sea de información faltante por parte del diseñador, de cumplimiento de normatividad o de responsabilidad por alguna parte involucrada del proyecto.



*Ilustración 34 Cargas concentradas durante construcción de proyecto
Fuente: (Lengua Fernández, 2013)*

Las cargas constructivas concentradas producto del almacenaje de materiales de construcción que no fueron previstas en la etapa de diseño son factor clave de falla en estructuras como se muestra en la ilustración 34, esto debido a que típicamente estos almacenajes se dan en etapas tempranas de la vida del concreto en donde este no suele contar con el tiempo suficiente de madurez como para soportar grandes cargas concentradas; no se tendrá un comportamiento adecuado en una estructura diseñada para sostener cargas típicas de uso residencial distribuidas en toda su área a la cual se le aplica una carga de mayor magnitud a la estimada en su diseño y adicionalmente aplicada de manera puntual (Lengua Fernández, 2013).

Durante el proceso de diseño estructural es clave definir la metodología constructiva a emplear, en diversas edificaciones es necesario realizar excavaciones profundas con el fin de incorporar sótanos en la edificación. Los procesos de remoción de masas importantes deben estar siempre supervisados por un profesional en el área de la geotecnia quien será el responsable de especificar el proceso constructivo de la excavación.

Una práctica común en la ejecución de proyectos con procesos constructivos en donde es necesario realizar excavaciones profundas es la incorporación de pantallas de contención apuntaladas mediante placas que forman parte de anillos temporales; mediante estos anillos es posible generar tránsito de maquinaria amarilla sobre las losas al tiempo que los niveles inferiores se excavan. Este tipo de procedimientos constructivos son de especial cuidado ya que requieren de la interacción entre el ingeniero estructural, el ingeniero de suelos y el constructor pues serán los encargados desde etapas tempranas de definir las cargas de diseño y condiciones de apoyo de estos elementos en una etapa temporal, así como los mecanismos necesarios de control de deformaciones laterales, esto dado a que el manejo inadecuado de remociones amplias de tierra puede afectar la estabilidad propia de la excavación o edificaciones vecinas. Ocurrirá una falla si por errores en obra las cargas o deformaciones estimadas en la etapa de diseño son superadas durante la etapa de construcción pues dichas cargas y deformaciones pueden llegar a ser hasta diez veces mayores a las de la etapa final de servicio de la estructura (Ministerio del Trabajo, 2014).

Uno de los factores claves a considerar en la etapa constructiva son las formaleas puesto que estas suelen constituir un porcentaje importante del costo total de la edificación; pueden llegar a ser tan crítico que el contar con cierto tipo de formaleas condicionará totalmente la geometría de los elementos (caso típico de las edificaciones con muros industrializados).

En la dirección de obras será de vital importancia garantizar un orden de secuenciación lógica en la ejecución, por tanto, se deberá disponer de la cantidad adecuada de formaleas y apuntalamientos para permitir una rotación adecuada de las mismas. Dado a que la inversión en formaleas es muy importante dentro del costo del proyecto será necesario sacar el máximo provecho de estas generando una rotación adecuada de la misma; se incurrirá en mayores costos si se permite que la formalea permanezca más tiempo del necesario en su lugar.

Parte esencial de optimizar los costos en las construcciones es reducir los tiempos de ejecución, es por esta razón que actualmente se utilizan concretos incorporados con acelerantes de resistencia, esto con el fin de obtener altas resistencias tempranas que permitan rotar de manera más rápida el uso de las formaletas (siempre y cuando se garantice una correcta adherencia entre el concreto y el acero por medio de su endurecimiento). La práctica mencionada anteriormente es totalmente viable toda vez que se realice incorporando las medidas de supervisión necesarias, es decir, llevando un riguroso control de la evolución de los concretos que se encuentran en etapa de endurecimiento.

Es común encontrar fallas en estructuras en las cuales se retiró su formaleta antes de tiempo, luego, siguiendo la mecánica de la construcción se eleva un piso adicional sobre estas permitiendo que la estructura recién desmoldada no solo deba soportar su peso propio sino el adicional del piso superior en conjunto con toda su formaleta y apuntalamientos, se conduce así a una falla inminente. Ahorrar en formaleta es un ítem de alto impacto dentro del presupuesto; sin embargo, no proporcionar los apoyos adecuados como apuntalamientos genera percances en la obra que muchas veces terminan en tragedia, esto sumado a los escasos procedimientos de diseño de encofrados, en donde muchas veces la cantidad y separación de puntales y soportes para estas son determinados con base en la experiencia del maestro de obra o el ingeniero residente generan una composición volátil de alto riesgo a la seguridad de la obra (Argos, 2022).

La falta de supervisión en materia técnica durante la etapa de ejecución de la estructura es un factor clave en materia de fallas estructurales dado que pueden existir diversos tipos de fallas, unas de las principales fallas están relacionadas con la durabilidad de la estructura al no asegurar los recubrimientos mínimos dentro de la masa de concreto que garanticen una protección adecuada del acero de refuerzo.

De la misma forma se cuenta con fallas frecuentes durante el proceso de curado de la estructura generando así altas temperatura internas dentro de la masa de concreto que de no ser controladas ocasionarán problemas no solo estéticos; para esto es recomendable seguir las guías y recomendaciones como las dadas por el ACI 306R “Guía para el control del calor de hidratación del concreto” y el ACI 308 "Guía para el curado del concreto" en donde se otorgan las directrices para obtener un endurecimiento y durabilidad optima del concreto.

Durante los procesos de curado es necesario contar con conocimiento adecuado de los tiempos de manejabilidad de la mezcla ya que serán los espacios de los que se dispondrá no solo para vaciar el concreto sino también para proporcionar vibrados o acabados especiales de piso, por esto será necesario contar con una organización adecuada en obra que permita garantizar en todo momento el funcionamiento de los equipos (en obras de gran importancia se exige contar con una cantidad mínima de equipos de respaldo como bombas de concreto, equipos de vibrado o gatos de tensionamiento en proceso de pretensado).

En muchas ocasiones los errores de obra son detectados en etapas tempranas; sin embargo, los responsables de las actividades de obra a causa de evitar repercusiones, reprocesos, atrasos en cronogramas o sobrecostos deciden pasar por alto estas fallas generando dificultades de mayor magnitud en el conjunto de la estructura a futuro.

6.1.3 Materiales

Las fallas en los materiales tienen dos causas principales: fallas en la especificación del material y falla directa del material. Cuando se habla de falla en la especificación indirectamente se sabrá que el material no fue causante propiamente de la falla; más bien, se refiere a una falla en la determinación y uso de este por parte de los desarrolladores del proyecto, bien sea el constructor o el diseñador (Audeves Pérez, Solís Carcaño, Álvarez Romero, & Martínez Álvarez, 2013).

Típicamente estas fallas se atribuyen a la falta de compresión del material por los implicados que se traducen en incompresiones en la mecánica y resistencia del material, procesos de curado deficientes, malos manejos en obra, precauciones o supervisiones técnicas ausentes o comportamientos fuera de la predicción y compresión del diseñador o constructor (típicamente sucede cuando se trata de materiales o técnicas novedosas, es por esta razón que estas tecnologías deben pasar por un proceso muy estricto de aprobación ante la comisión asesora permanente) (Arkiplus, 2016).

Por otra parte, referirse a una falla propia del material indica falencias dentro de la matriz que lo conforma; esto debido a alteraciones químicas o físicas. Dentro de las edificaciones en concreto reforzado se pueden distinguir dos materiales participantes de la mecánica estructural, el concreto y el acero de refuerzo. Por una parte, el concreto será una composición de varios materiales: agua, cemento, agregados finos, agregados gruesos y aditivos.

La complejidad del concreto radica muchas veces en la composición del cemento (se involucran aquí todas las posibles adiciones que este pueda contener) y su interacción con el agua, agregados gruesos, agregados finos y aditivos. Las deficiencias por tanto en el concreto estarán relacionados con reacciones inesperadas o incontroladas por presencia de agentes químicos en el agua, en los agregados y el cemento. Cuando se presentan estas alteraciones en concreto se tendrán reacciones álcali agregado; esto ocurre cuando la mezcla de concreto está compuesta por un cemento con grandes contenidos de álcalis, unos agregados con gran potencial de reactividad y una presencia importante de humedad en el ambiente. Como consecuencia, el concreto presentará una degradación que iniciará desde su interior avanzando hasta las capas superficiales, por tanto, cuando sea visible en su exterior toda la matriz se encontrará comprometida.

Para evaluar por completo la integridad de los materiales que componen el concreto existen diferentes tipos de ensayos entre los que destacan las pruebas de petrografía en donde se revela a detalle toda la composición, estado, características físicas y químicas.

Adicionalmente, el concreto presenta incertidumbres en la estimación de la resistencia a la compresión; si la concretera encargada del diseño y suministro de la mezcla otorga mayores resistencias a la compresión que las especificadas en el diseño estructural, se tendrá entonces que los elementos estructurales tomarán fuerzas laterales de mayor magnitud a las calculadas inicialmente ya que estos elementos distribuyen sus cargas por rigidez, quiere decir entonces que el refuerzo proporcionado para estos elementos será insuficiente.

Otro escenario posible será el opuesto al mencionado anteriormente, en este, la resistencia obtenida en el concreto será inferior a la especificada en el diseño estructural, esto puede deberse a diversos factores como procesos de vibrado deficientes, adición de agua en obra para cambiar manejabilidad, relaciones agua cemento mal especificadas, inclusión de aditivos o adiciones no apropiadas o ausencia de controles de calidad; en estos casos la capacidad del elemento se verá comprometida pues la estructura podría sobre esforzarse incluso ante cargas de peso propio.

En cualquiera de los escenarios posibles se observa que el control sobre la calidad del concreto es una tarea compleja, como alternativa algunas edificaciones de mayor importancia en el país han logrado realizar solicitudes de diseños de mezcla particulares, estas no se basan en el funcionamiento bajo el parámetro de la resistencia a la compresión sino que se basan en la propiedad del módulo elástico, se confiere de esta manera al diseñador un mayor control sobre la rigidez, desplazamientos laterales y fuerzas que tomará cada elemento siendo más acordes con el diseño estructural.

En cuanto al acero de refuerzo se pueden presentar fallas en el material debidas a la composición química del acero (variaciones en los contenidos de carbono o presencia de corrosión) o desempeños inadecuados debidos a propiedades alteradas de la resistencia y la ductilidad del acero por procesos de fabricación, por ejemplo, procesos de fabricación mediante trefilado o procesos en frio que eliminen las características de ductilidad del acero o alteren sus capacidades de absorción de energía. En este último caso no se podrá considerar una falla en el material sino en su especificación, situación que sucedió por un periodo considerable de tiempo en Colombia con las construcciones de muros industrializados en donde sus refuerzos principales se encontraban provistos con mallas no dúctiles, es decir, se utilizaban las mallas comerciales electrosoldadas destinadas para ser usadas en losas de entresijos, estas se elaboran mediante un proceso de trefilado que no provee ductilidad al elemento; es por esto que estas fallas son producto del no entendimiento del comportamiento tanto del sistema estructural como del material por parte de los responsables.

6.1.4 Mantenimiento y operación

Todas las estructuras cuentan con un ciclo de vida para el cual son proyectadas, sin embargo, a lo largo de este ciclo será común realizar intervenciones; la frecuencia y el grado de invasión dependerán de varios factores como el uso de la estructura (por ejemplo una industria láctica requerirá mayor atención que una edificación residencial), su localización (no será lo mismo una edificación que se encuentre expuesta a ambientes corrosivos a una edificación que no lo este) o su importancia para la sociedad (por ejemplo se requerirá mayor atención para un hospital que para una edificación de almacenaje de material).

El grado de intervención a una estructura será definido según se requiera un mantenimiento de tipo preventivo, correctivo o curativo. Un mantenimiento correctivo será aquel que se realiza para impedir o prevenir la aparición o desarrollo

de defectos como la limpieza de tuberías o tanques, impermeabilización de cubiertas, entre otros. Un mantenimiento correctivo será aquel en que se busca restablecer las condiciones originales del diseño estructural, un caso típico es la preservación y restauración de estructuras patrimoniales. Por último, un mantenimiento curativo será aquel en el que se realizan reemplazos parciales de la estructura como la sustitución de una viga en concreto por una viga en acero (Sánchez, 2002).

Es poco habitual en el medio colombiano que una estructura se entregue a sus propietarios con una guía de mantenimiento tal como si se tratase de un vehículo, no obstante, se debe tener claridad que un mantenimiento de una estructura puede no limitarse únicamente a limpiar fachadas o realizar retoques de pintura y pañete sobre fisuras.

Dentro de las deficiencias de mantenimiento y operación es el poseedor de la estructura sobre quien recae la mayor responsabilidad pues será este el encargado de generar periodos de mantenimiento en conjunto con buenas prácticas de operación, brindando así alertas tempranas sobre posibles fallas estructurales que detectadas a tiempo tendrán soluciones poco invasivas; sin embargo, podrían desencadenarse fallas catastróficas en caso de dar un manejo inadecuado a estas situaciones (por ejemplo, las filtraciones de agua sobre elementos principales de concreto generaran corrosión sobre el acero de refuerzo que a futuro provoca fallas; detectar y reparar las filtraciones será una tarea de mayor facilidad comparada con la sustitución completa del elemento estructural afectado).

Se hace necesario entonces de mecanismos administrativos dentro de las edificaciones que garanticen una periodicidad en las labores de supervisión, control y mantenimiento, tarea que se complica cuando se habla de estructuras pequeñas o con bajos recursos destinados a materia de prevención y mantenimiento.

Durante la etapa de operación de la estructura pueden existir solicitudes de carácter funcional por medio de las cuales el uso principal de estructura se vea alterado, por tanto, de acuerdo con las necesidades y acorde con los principios de la ingeniería estructural se deberá adecuar la estructura para garantizar su funcionalidad; esto se logra mediante el estudio cuidadoso de las capacidades de los elementos en conjunto con la adecuación de los diseños previos. En el desarrollo de estas tareas es posible que algunos elementos estructurales deban ser eliminados e inclusive que las cargas aplicadas sobre estos cambien, por tanto, deberá reforzarse adecuadamente la estructura para garantizar la redistribución de cargas y su correcto comportamiento. Las deficiencias en este aspecto radican cuando los ocupantes de la estructura deciden realizar intervenciones sobre los elementos estructurales sin el aval de un profesional capacitado para determinar la viabilidad de las alteraciones; dichas alteraciones se reflejan típicamente en Colombia con situaciones como el cambio de uso de una estructura, instalación de equipos pesados cuya carga no se contempló inicialmente, derribo de elementos estructurales principales como muros, placas, columnas o vigas o inclusive la incorporación de plantas estructurales adicionales.

Todas las alteraciones mencionadas anteriormente de no ser manejadas de manera apropiada ocasionarán cambios en el comportamiento estructural, bien sea en falencias de transmisión de cargas o en sobrecargas a elementos estructurales como la cimentación.

Las deficiencias mencionadas anteriormente han sido tema de importantes discusiones y preocupaciones en el país. Dadas las lecciones aprendidas de fallas presentadas en la nación, se han logrado implementar normativas que permiten establecer mayores controles como la creación de leyes nacionales, instauración y potenciación de poderes a las curadurías (organizaciones encargadas de generar revisiones y controles sobre diseños de manera que se cumpla la normativa colombiana), incorporación de revisores externos (generan una segunda vista sobre las decisiones técnicas que se tomen a nivel de diseño garantizando los principios de la ingeniería estructural), supervisiones técnicas (garantizan la calidad y

correcta ejecución de las obras), normas técnicas colombianas (basadas en normas extranjeras como las ASTM que tienen como fin el control de calidad de los materiales) y metodologías BIM (permiten una mejor coordinación entre las etapas y ciclos del proyecto evitando los errores, retrasos y sobrecostos en obra).

Todos estos controles están enmarcados dentro de la ética profesional, pues se tienen en la actualidad diversas herramientas que permiten el mejoramiento de la ejecución de los proyectos, empero, será difícil combatir las deficiencias mencionadas cuando se dispone de profesionales poco legibles en carácter tanto técnico como moral para desempeñar labores de alto impacto y responsabilidad.

6.2. Causas específicas de falla

Las causas específicas de falla podrán ser agrupadas en cuatro tipos: causas por acciones físicas, químicas, mecánicas y biológicas. Estas causas marcarán un tipo en concreto de sintomatología dentro de la estructura en concreto; seguidamente se proporcionarán detalles de cada una de ellas (Rodríguez Sánchez, 2020).

6.2.1 Físicas

Las causas físicas están relacionadas con los cambios volumétricos que se puedan presentar en la estructura, estos podrán presentarse tanto en condiciones de estado plástico o endurecido.

6.2.1.1 Cambios temperatura

Estarán representados por cambios de volumen en la masa de concreto debidos a fenómenos de contracción térmica inicial, dilatación y contracción por temperatura, ataques por fuego, ciclos de congelamiento y deshielo.

6.2.1.1.1 Contracción térmica inicial:

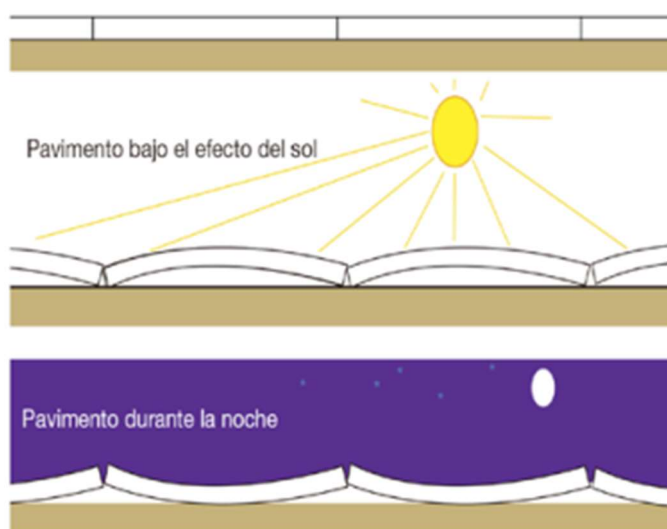
Se produce por el calor de hidratación liberado en edades tempranas del concreto cuando el cemento se hidrata. Su mecanismo es similar al que ocurre en estructuras de acero durante su proceso de laminado en donde se crean esfuerzos residuales producto del enfriamiento exterior de la masa mientras que el interior aún permanece caliente; por tanto, el material se contraerá; cuando el interior de la masa de concreto se enfría se contraerá aún más creando unos esfuerzos de tensión entre la superficie de la masa de concreto y el interior de esta. Se provoca entonces la aparición de fisuras superficiales que se manifiestan sin seguir un patrón definido dado a la presencia de esfuerzos de tensión en la superficie del concreto. Estas fisuras solo afectarán de manera superficial el concreto y no atravesarán el agregado, por tanto, solo se verá afectada la pasta de cemento (Colpari Pozzo, 2020).

Es común evidenciar esta tipología de fallas en estructuras que no fueron provistas con un acero de refuerzo suficiente como para controlar las tracciones presentes durante la etapa inicial. También es posible encontrar este tipo de fisuras cuando se cuenta con falencias durante el proceso de curado.

Cómo método de control se deberá prever el manejo de la temperatura y los esfuerzos de tracción presentes. Es posible lograr esto mediante la adición de acero de refuerzo para tomar esfuerzos de tracción, utilizando mezclas con baja cantidad de cemento de manera que se libere menor cantidad de calor de hidratación, garantizando un adecuado proceso de curado y empleando de manera correcta el uso de juntas de contracción (Effio Reátegui & Quiñones Ticse, 2021).

6.2.1.1.2 Dilatación y contracción por temperatura;

Al existir cambios por temperatura el concreto reaccionará mediante la expansión o contracción relacionada directamente con su coeficiente de expansión térmico (típicamente se emplea un valor de 0.010 mm/m/°C); este desplazamiento sumado a la restricción por ausencia de juntas provocará esfuerzos internos de tensión dentro de la masa de concreto (Amaya Pico, 2017).



*Ilustración 35 Alabeo del concreto por variación en la temperatura
Fuente: (Becker, 2009)*

Es posible que al existir juntas se produzca el fenómeno conocido como alabeo mostrado en la ilustración 35, en la situación diurna, la cara expuesta al sol se dilatará más que la cara que no está expuesta; por tanto, el alargamiento en la fibra expuesta será mayor a la fibra opuesta provocando una forma en la superficie similar a un cuenco. Situación contraria ocurrirá en las noches debido a que la temperatura en la cara expuesta será menor que en la cara no expuesta. Esta situación ocurre típicamente en pavimentos y pisos de concreto, por tanto, al adoptarse una forma de cuenco se verán alteradas las condiciones iniciales de apoyo en donde no se encontrará

íntegramente apoyada la losa de concreto contra el terreno; esto quiere decir que se tendrán esfuerzos de flexión y de compresión en las fibras extremas y opuestas del concreto causadas por el peso propio del elemento y el tránsito sobre este, será necesario entonces incorporar una cuantía suficiente de acero de refuerzo tanto superior como inferior previendo las dos situaciones mencionadas anteriormente (Becker, 2009).

6.2.1.1.3 Ciclos de hielo y deshielo

Cuando el concreto se ve expuesto a temperaturas por debajo del punto de congelamiento, el agua que permanece en sus poros tendrá un cambio de estado de sólido a líquido, esto provocará un aumento de volumen de aproximadamente 9% con lo cual se inducirán esfuerzos de tracción en la masa de concreto conduciendo a fracturas del elemento como se muestra en la ilustración 36 (Cerna Vásquez & Galicia Guarniz, 2010). Una solución para evitar este tipo de fallas es el empleo de mezclas de concreto con incorporaciones de aire, esto permitirá que el volumen aumentado y desplazado de agua pueda ser acomodado en las cavidades que contienen aire, aliviando la presión hidráulica y por tanto previniendo altos esfuerzos de tracción dentro de la masa de concreto (Treval C. Powers, 1953).

Por su parte la norma sismorresistente colombiana NSR-10 en sus tablas C.4.2.1 – Categorías y clases de exposición - y C.4.3.1 – Requisitos para el concreto según la clase de exposición – recomiendan el uso de relaciones de agua material cementante de entre 0.4 y 0.5 conduciendo a resistencias de concreto a los 28 días de entre 35 MPa y 28 MPa con el fin de mitigar los efectos de este cambio físico.



*Ilustración 36 Ataque por congelamiento de una losa de concreto
Fuente: (Cerna Vásquez & Galicia Guarniz, 2010)*

6.2.1.1.4 Ataque por fuego

El concreto es un material que posee buena resistencia al fuego, durante el desarrollo de un incendio el recubrimiento que el concreto proporciona al acero de refuerzo actuará como un protector. Conforme la temperatura aumenta el acero de refuerzo irá dilatándose proporcional a su coeficiente de expansión térmico provocando tensiones sobre la masa de concreto, luego de esto la capa protectora del acero de refuerzo conformada por el recubrimiento del concreto se perderá. A su vez, se producirá un efecto conocido como “spalling” o desprendimiento por explosión del concreto, este fenómeno tendrá inicio a temperaturas de entre 100°C a 150°C; en este, se dará la evaporación del contenido de agua presente en la masa de concreto provocando un desgarramiento de la masa superficial y contribuyendo a la pérdida del recubrimiento del acero de refuerzo (Pérez Quiroz, López Miguel , Téllez Martínez, Maura, & Terán Guillén, 2023).

La pérdida del recubrimiento del acero de refuerzo provoca a su vez uno de los efectos más críticos a tratar durante la exposición del concreto al fuego, esta será la pérdida de adherencia entre el concreto

y el acero de refuerzo, dada cuando el concreto alcanza temperaturas superiores a los 300°C (Guerrero Corona, 2022). El comportamiento descrito anteriormente se representa en la ilustración 37.



*Ilustración 37 Esquema general de rotura del concreto ante ataque por fuego
Fuente: (Helene & Pereira, 2003)*

Los efectos de un incendio sobre una estructura de concreto reforzado pueden verse con facilidad por los colores reflejados en el concreto (posterior a un incendio los elementos en concreto reforzado se encontrará cubiertos por una capa de hollín y humo carbonizado; el color al que se refiere es el que se evidencia después de remover esta capa contaminante); estos proporcionarán indicios de la temperatura que alcanzó el elemento durante el incendio y a su vez proporcionarán indicios de la afectación y resistencia remanente que posee el elemento.

En la tabla 1 se presenta la relación entre el color del concreto reforzado, la temperatura alcanzada y la resistencia remanente aproximada del concreto.

Tabla 1: Cambio del color y la resistencia a la compresión del concreto por variación en la temperatura

| Colores | Temperatura | % resistencia a la compresión del concreto |
|---------------|-------------------|--|
| Normal | Menos de 300°C | 100 a 80 |
| Rosa a rojo | 300- 600°C | 80 a 40 |
| Gris cenizo | 600-950°C | 40 a 20 |
| Amarillo/Ocre | 950 °C o superior | 20 a 0 |

Basado en artículo fuente: (Qin, Gao, Aslam, Sufian, & Alabduljabbar, 2022)

Los efectos producidos sobre una estructura de concreto reforzado se podrán dilatar dotando a los elementos de propiedades adecuadas para garantizar un tiempo mínimo de resistencia al fuego.

Se deberán seleccionar espesores mínimos de elementos junto con recubrimientos del acero de refuerzo adecuados (en caso de que el fuego alcance el acero de refuerzo se tendrá un gradiente de temperatura que se propagará mucho más rápido) al tiempo que se emplean bajas permeabilidades del concreto para que no existan humedades en el momento del incendio; estas humedades descascarar la masa de concreto por el gradiente de temperatura entre el interior y el exterior (si el concreto mantiene el equilibrio de temperatura en toda su masa, es decir que el gradiente de temperatura sea mínimo, no se descascarará y por tanto no se pierde su recubrimiento), cabe destacar que el concreto se descascara primero en las zonas más calientes, es

por esto que el recubrimiento del acero de refuerzo es quien se pierde en primeras etapas. Sumado a las precauciones anteriores será conveniente emplear agregados que no tengan tendencia alta a expansiones con el aumento de temperatura como los de origen ígneo, esto con el fin de aumentar el tiempo de resistencia al fuego de los elementos (Álvarez Torres & Vargas Calvo, 2023).

En la ilustración 38 se presentan algunos ejemplos de los daños producidos por efectos del fuego en estructuras de concreto.

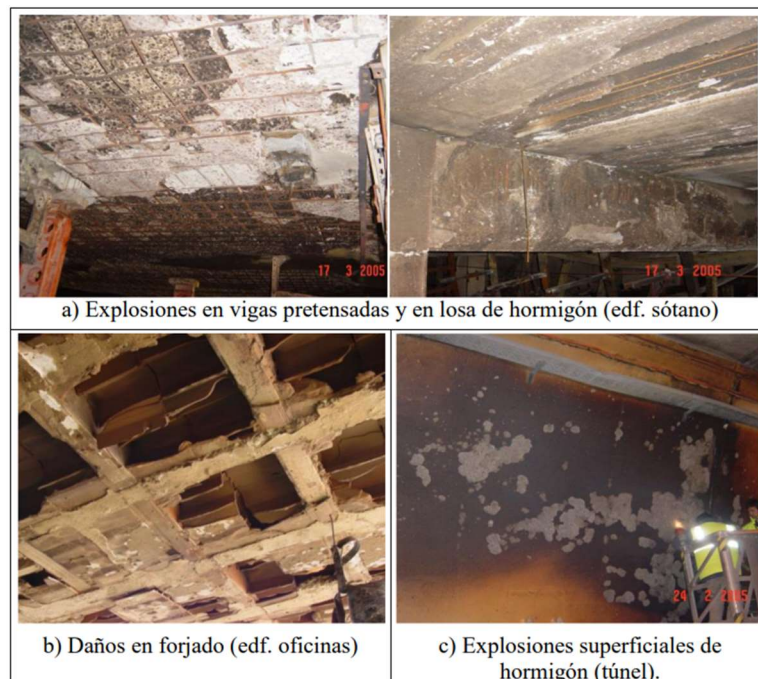


Ilustración 38 Daños por incendio en elementos de concreto
Fuente: (Alonso & Flor Laguna, 2013)

6.2.1.2 Cambios de humedad

Se trata de fisuras que se presentan únicamente dentro de la pasta de cemento y por tanto no atravesarán el agregado, estas se presentan debido a cambios de humedad de la amasa de concreto o por la permanente presencia de agua.

Existen cuatro tipos de clasificación para este tipo de falla que dependerán específicamente de la causa de falla.

6.2.1.2.1 Cuarteaduras:

Este tipo de falla se encuentra relacionada con deficiencias en el proceso de fraguado a causa de errores en el proceso de vibrado (exceso de vibrado que provoca una segregación de los materiales de la mezcla), vaciado desde alturas excesivas (caso similar al exceso de vibrado ya que ocurrirá una segregación del material) o falencias en procesos de acabados de piso (es típico en estructuras de pisos industriales en donde se requieren realizar acabados específicos en etapas tempranas del concreto, estos procesos pueden inducir a la pérdida de agua o separación de los materiales base de la mezcla) (Mayorga Mayorga, 2016).

Al segregarse el material base se tendrá que las componentes con mayor densidad como los agregados estarán al fondo del elemento mientras que el agua en solución con el cemento estará en la superficie; esto genera entonces una pasta de cemento con baja resistencia y alto grado de contracción comparado con el material del fondo del elemento.

Después del proceso de fraguado quedarán inducidos esfuerzos de tensión producto del diferencial de contracciones entre el material de la superficie y el del fondo de la mezcla de concreto dando origen así a fisuras, estas serán únicamente superficiales con un patrón de distribución en forma de mapa que cubrirán la superficie del elemento,

no suelen tener ningún tipo de implicación estructural, sin embargo, si afectarán la estética del elemento (Rivva L , 2006).

6.2.1.2.2 Contracción por secado:

Cuando el concreto es expuesto al aire se presenta una reducción de su humedad producto de la evaporación del agua restante (aquella porción de agua de la mezcla que no reacciona con el cemento) provocando a su vez una reducción en el volumen del concreto (Higuera Flórez, 2016).

Para controlar estos efectos se puede pensar en evitar o reducir el área de contacto del concreto con el aire; sin embargo, esta solución será poco conveniente ya que en muy pocas ocasiones será factible (especialmente en elementos con grandes superficies como losas o muros). Por otra parte, se podrá pensar en efectuar un proceso de endurecimiento del concreto bajo condiciones húmedas, esto garantizará que el agua proporcionada para la manejabilidad y consistencia del concreto no se pierda durante el proceso de secado además de producir un proceso inverso de dilatación, sin embargo, este proceso puede presentarse por términos de meses lo que hace inviable a esta alternativa a largo plazo. Finalmente, será factible disponer de mezclas de concreto que contengan la cantidad justa de agua para hidratar el cemento, proporcionar consistencia y manejabilidad a la mezcla; otra alternativa será el uso de fibras, de esta manera la pérdida de volumen y por tanto contracción serán mínimas siendo esta la solución más viable (Huacho Ochoa, 2021).

Es evidente que los procesos de contracción por secado serán difíciles de evitar, por esta razón es necesario proveer a la estructura de acero

de refuerzo o fibras para controlarlos; de la misma forma, es conveniente emplear juntas que permitan la contracción libre de los elementos.

6.2.1.3 Asentamiento plástico

Posterior al vaciado del concreto se iniciará la etapa de asentamientos en estado plástico, este fenómeno se presenta cuando los componentes más densos de la mezcla transitan hasta el fondo del elemento, paralelamente por procesos de exudación el agua tenderá a acumularse en la superficie.

La condición de asentamiento también podrá darse cuando la fuerza del peso del concreto fresco deforme la superficie sobre la cual se está vaciando el elemento.

Los efectos que se conseguirán por el asentamiento serán fisuras de poco tamaño como se muestra en la ilustración 39, que muchas veces describen la posición del acero de refuerzo (esto porque durante el proceso de asentamiento se impide la acomodación de manera correcta de la mezcla cerca de las superficies del acero de refuerzo), estas fisuras no afectarán el comportamiento del elemento estructural, sin embargo, si serán de especial interés en temas de durabilidad.



*Ilustración 39 Fisuración por asentamiento plástico
Fuente: (IMCYC, 2013)*

Cómo métodos de prevención de aparición de estas fisuras (Sánchez, 2002) sugiere: emplear cementos con bajo calor de hidratación (inferior a los 77°C), vaciar el concreto sobre superficies húmedas, emplear mezclas con bajas relaciones de agua / material cementante, mantener una mezcla homogénea del concreto durante el proceso de vaciado y emplear procesos adecuados de compactación del concreto.

6.2.1.4 Contracción plástica

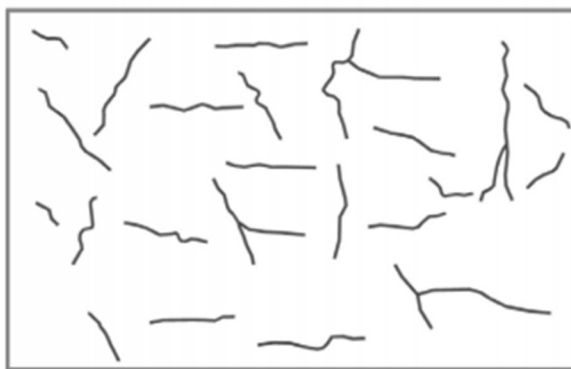
También conocido como retracción plástica, es un fenómeno que ocurre en el concreto especialmente cuando es vaciado en climas cálidos y con baja humedad. Según (ACI 305R-20, 2020) ocurrirá por la evaporación rápida de la humedad superficial del concreto, es por esto por lo que se presenta principalmente en elementos de concreto con grandes superficies expuestas como se aprecia en la ilustración 40; su aparición será justamente después de que la película superficial de agua brillante del concreto desaparezca. Este fenómeno se encontrará totalmente condicionado a los factores ambientales

como la humedad del medio, la temperatura tanto del concreto como del medio ambiente y la velocidad del viento.



*Ilustración 40 Fisuras de contracción plástica
Fuente: (IMCYC, 2013)*

Este tipo de falla tendrá un patrón como el que se observa en la ilustración 41, es causado por el diferencial de humedad presente entre la superficie y el interior de la masa de concreto durante el proceso de exudación; este factor acompañado de un proceso rápido de contracción por secado genera esfuerzos de tensión en la superficie, entre mayor sea este fenómeno mayor será la profundidad de la fisura; típicamente se presentarán fisuras o micro fisuras que podrán ser tanto superficiales como profundas.



*Ilustración 41 Esquema general de fisuras vistas en planta por retracción plástica
Fuente: (AIS, 2011)*

Como métodos de control el ACI 305R-20 presenta técnicas para estimar la tasa de evaporación del agua, con esto se podrán tomar medidas en la etapa de vaciado y curado del concreto; así mismo, en el capítulo 6 del mismo documento se mencionan requisitos y recomendaciones para el vaciado y curado del concreto de manera que se controlen este tipo de fisuras.

6.2.1.5 Movimientos durante la construcción

Se trata de cambios volumétricos que afectan al concreto, estos podrán ser causados por movimientos en la base de apoyo o en la formaleta durante el proceso de vaciado o fraguado; también podrán ser ocasionados por procesos de descimbrado prematuro (Castillo Ninatanta, 2019).

Estos movimientos podrán generar la aparición de fisuras en la masa de concreto debido a que en estado plástico el elemento no tendrá ninguna capacidad de adherencia con el acero de refuerzo, tampoco tendrá ninguna resistencia por lo que no podrá soportar los esfuerzos generados por estos movimientos; estas fisuras muchas veces pueden perjudicar el comportamiento estructural del elemento.

Cuanto más tiempo se tome el proceso de fraguado y endurecimiento del concreto, mayor tiempo estarán susceptibles los elementos a presentar este tipo de fallas, este será un tema de especial interés cuando se empleen concretos con retardantes.

6.2.1.6 Heladas tempranas

Al exponer el concreto a ambientes climáticos de baja temperatura, bien sea descensos bruscos en la temperatura o elaboración de construcciones en ambientes con temperaturas bajas se producen cambios físicos en el agua de

la mezcla, esto a su vez provoca el bloqueo de la reacción con el cemento además de propiciar el desarrollo de fisuras por planos frágiles.

Este tipo de reacciones pueden producirse durante el periodo de transporte, vaciado o fraguado. La guía (ACI 306R-16, 2016) enuncia pautas y recomendaciones importantes para el tratamiento del concreto empleado en ambientes con baja temperatura con el fin de prevenir daños en la masa de concreto por la acción de congelación. Entre ellos se destacan recomendaciones para el proceso de curado (con el fin de que los elementos logren desarrollar la resistencia requerida), preparación de la formaleta o la base sobre la cual se realizará el vaciado (para evitar choques térmicos y la formación de hielo o nieve), temperatura sugerida para el proceso de mezcla y colocación, pérdida de temperatura durante la colocación y protección tanto del concreto como del acero de refuerzo para climas fríos.

6.2.2 Químicas

Las causas de falla por acciones químicas están estrechamente relacionadas con el contacto entre el concreto y sustancias químicas agresivas representadas por iones o moléculas, estas se trasladarán desde el medio ambiente hasta la superficie o interior de la masa de concreto en donde se dará origen a la reacción.



Ilustración 42 Lavado de la pasta de cemento por ataque químico
Fuente: (Arango Mejía, 2013)

La ilustración 42 muestra una reacción química, este tipo de fallas podrán presentar síntomas de forma inmediata o a largo plazo, el grado de afectación y compromiso del elemento estructural dependerá entonces del ambiente en el que se encuentre el elemento y su exposición al agente químico.

Las fallas por acciones químicas se clasifican en seis tipos:

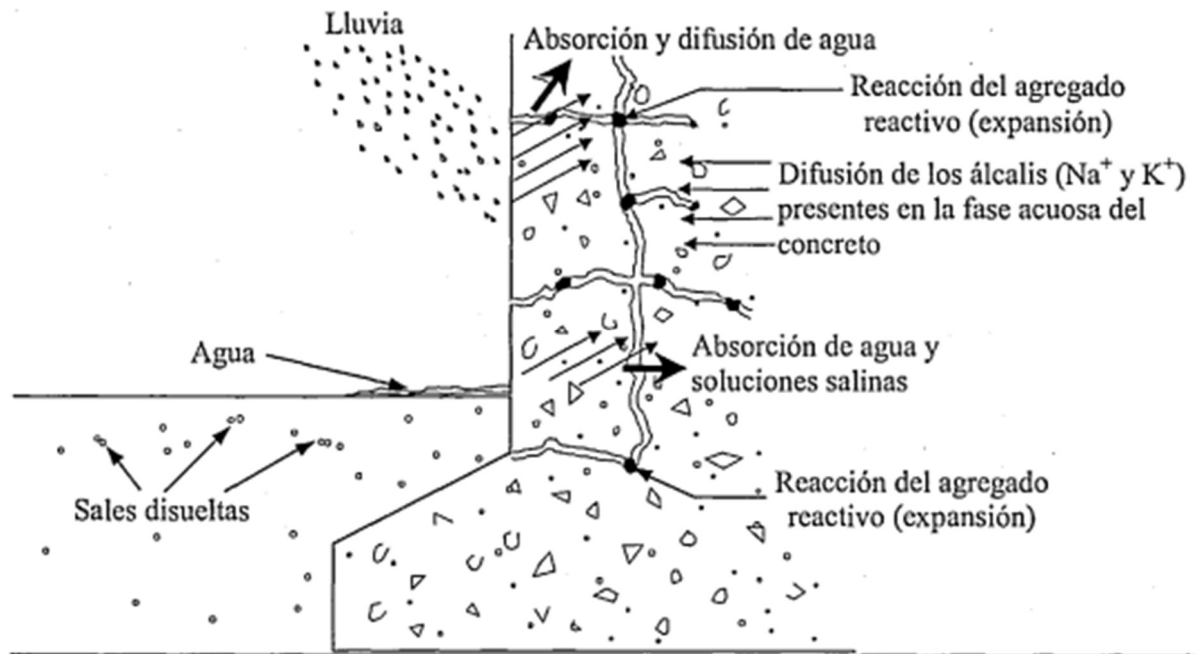
6.2.2.1 Reacciones álcali-agregado (AAR – Alkali Aggregate Reactions)

Se produce una expansión del concreto a causa de una reacción entre los minerales de agregados inestables y los hidróxidos alcalinos derivados de los álcalis del cemento (óxido de sodio Na_2O y óxido de potasio K_2O), de los mismos agregados o del medio ambiente; es posible que esta reacción se presente por agentes externos como el agua de mar o sales de deshielo. Al presentarse esta reacción se crea un gel sobre la superficie del agregado que se expande cuando entra en contacto con la humedad; esta expansión provoca esfuerzos de tensión dentro de la masa de concreto quienes a su vez fisuran desde el interior el elemento como se aprecia en la ilustración 43 (ACI-221.1R-98, 2008).



*Ilustración 43 Reacción álcali-agregado en elemento de concreto.
Fuente: (López, Pérez, Terán, & Arroyo, 2023)*

Para que se produzca esta reacción serán necesario que se cumplan cuatro condiciones de manera simultánea como se muestra en la ilustración 44: Presencia en la masa de concreto de agregados reactivos, alto contenido de álcalis en la mezcla de concreto (mayor a 0.60%), presencia de humedad del medio ambiente (mayor a 80%) y una temperatura propicia (alrededor de 35°C) para desarrollar el evento; es preciso anotar que este tipo de reacción requieren de un tiempo aproximado de entre 5 a 16 años para manifestarse.



*Ilustración 44 Mecanismo de reacción álcali agregado
Fuente: (Sanjuan Barbudo & Castro Borges, 2001)*

Se presenta en la ilustración 45 un mapa extraído de la NTC 174 en donde se exponen los terrenos en donde se ha encontrado presencia de agregados potencialmente reactivos en Colombia. A su vez, adaptado de la NTC 174 se presenta en la tabla 2 el tipo de roca fuente asociado a los terrenos descritos en el mapa.

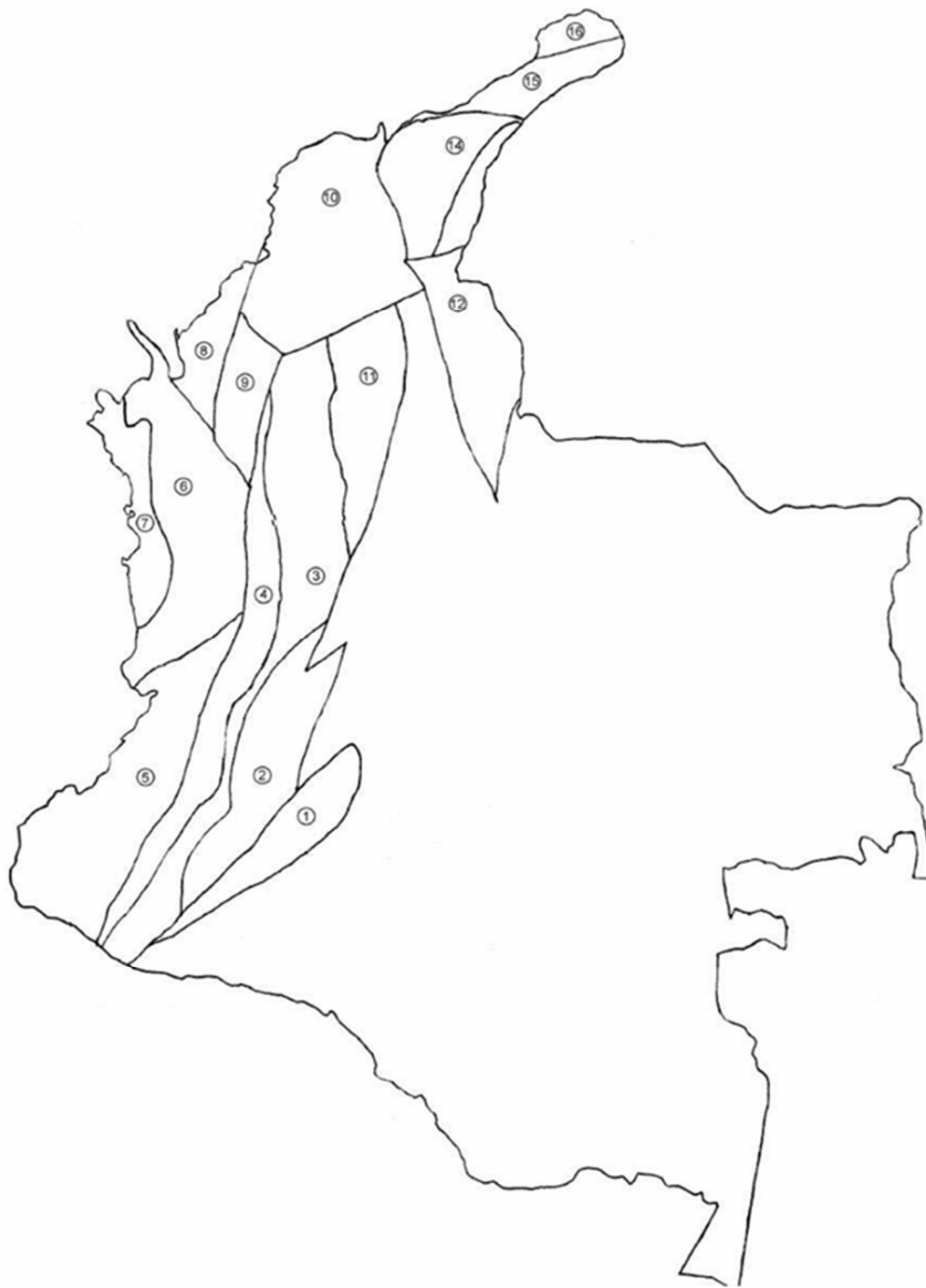


Ilustración 45 Mapa de terrenos geológicos con presencia de agregados potencialmente reactivos en Colombia.

Fuente: (NTC 174, 2000)

Tabla 2: Terrenos con presencia de agregados potencialmente reactivos en Colombia representados en la ilustración 45

| No. | Terreno | Rocas fuente de agregados |
|-----|---------------|--|
| 1 | Garzón | Intrusivos granitoides, charnoquitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos. |
| 2 | Payandé | Intrusivos granitoides, riolitas, traquitas, andesitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos, calizas, areniscas. |
| 3 | Cajamarca | Intrusivos granitoides, neises, cuarcitas, mármoles. |
| 4 | Cauca Romeral | Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos toleíticos, neises, esquistos, liditas o cherts. |
| 5 | Dagua | Plutones calcoalcalinos, basaltos toleíticos, calizas, liditas o cherts. |
| 6 | Cañas Gordas | Plutones calcoalcalinos, basaltos toleíticos, calizas, liditas o cherts. |
| 7 | Baudó | Basaltos pobres en k, liditas, calizas. |
| 8 | Sinú | Liditas y calizas. |
| 9 | Buriticá | Plutones calcoalcalinos, andesita, basaltos, tobas, liditas. |
| 10 | San Jacinto | Calizas, liditas, areniscas calcáreas. |
| 11 | San Lucas | Granitoides, lavas riolíticas y riodacítas, tobas, neises cuarzo fedespláticos. |
| 12 | Santander | Granitoides, riolitas, andesitas, neises félsicos, mármoles, calizas. |
| 13 | Perijá | Granitoides, riolitas, tobas riolíticas, calizas. |
| 14 | Sierra Nevada | Granitoides, riolitas, andesitas, neises félsicos, calizas. |
| 15 | Baja Guajira | Riolitas, espilitas de bajo Al, esquistos félsicos, mármoles, calizas. |
| 16 | Cosinas | Granitoides, flujos riodacíticos, neises félsicos, mármoles, calizas. |

Fuente: (NTC 174, 2000)

Dado a que la reacción química dependerá del tipo de mineral que se encuentra presente en la roca se distingue entre tres tipos de reacciones alcali-

agregado: reacción álcali-sílice, reacción álcali agregado y reacción álcali carbonato.

6.2.2.1.1 Reacción álcali-sílice (ASR – Alkali Silica Reaction)

Este tipo de reacción ocurre cuando la mezcla de concreto reforzado presenta en su contenido agregados reactivos de sílice (por ejemplo, minerales de cuarzo) capaces de reaccionar con los hidróxidos alcalinos del cemento; una vez efectuada la reacción se formarán alrededor de las partículas de cemento estructuras de silicatos alcalinos en forma de gel quienes cuentan con la facultad de absorber agua y ejercer presión causando fisuración (Edgar Vacas, 2016).

La manifestación de esta reacción suele darse en periodos de entre los dos a cinco años, en estos se presenta como etapa inicial la extracción de los componentes solubles de la mezcla debida al contacto con la humedad producto de la hidrólisis de la sílice activa por el ion hidróxido. Es esta misma humedad quien hidrata los geles álcali-silicosos formados en las partículas de cemento provocando así su aumento de volumen y consecuentemente el desarrollo de tensiones y agrietamientos desde el interior de la masa de concreto (Monteiro Ramos, 2013).

Las fisuras formadas por este fenómeno tendrán una distribución irregular por toda la superficie teniendo en sus primeras etapas una afectación mínima; conforme el fenómeno continúa se presentarán planos de falla sobre las fisuras inicialmente inducidas lo que conllevará a la desintegración de la masa de concreto.

Será importante establecer el potencial reactivo de los agregados empleados en las mezclas de concreto puesto que se trata de un tipo de patología silencioso, pero de gran afectación en la estructura. Cómo evaluación la norma (ASTM C 289 - 07, 2016) establece el método de ensayo para la determinación de la reactividad potencial de componentes silicios con álcalis en concreto de cemento hidráulico.

6.2.2.1.2 Reacción álcali-silicato (ASR – Alkali Silicate Reaction)

La reacción álcali-silicato posee un mecanismo de acción similar al de la reacción álcali-sílice; su diferencia en esencia radica en el origen del material reactivo; en este caso los materiales reactivos estarán presentes en los silicatos de los agregados silíceos polifásicos como rocas sedimentarias con alto contenido de minerales de arcilla (Herrador Barrios, 2002).

Al incorporarse el material reactivo con las condiciones de humedad, temperatura y los álcalis del cemento (hidróxido de sodio o de potasio) generarán geles expansivos, estos al hidratarse aumentarán de volumen y provocarán tensiones en la interfase pasta de cemento con agregado induciendo fisuraciones y desintegración de la masa de concreto.

A diferencia con la reacción álcali sílice estos reaccionarán con una velocidad menor debido a la diseminación de los materiales en la matriz.

6.2.2.1.3 Reacción álcali-carbonato (ACR – Alkali Carbonate Reaction)

Este tipo de reacción se presenta de manera menos frecuente (se tienen evidencias únicamente en Estados Unidos, Canadá y China), sin embargo, mantiene el mismo comportamiento general expuesto anteriormente con la diferencia de que en este caso la reacción ocurrirá entre los álcalis del cemento y los carbonatos del agregado reactivo (por ejemplo, agregados con minerales de dolomita y calcita).

En este caso la reacción generará geles de carbonato de calcio y silicato de calcio quienes al entrar en contacto con la humedad aumentarán su volumen generando igual que en los casos anteriores esfuerzos de tensión y fisuración en la masa de concreto (Milanesi, 2013).

La falla por reacción álcali agregado debe ser controlada desde la etapa de diseño y construcción; para ello se requiere reducir en la medida de lo posible la presencia simultánea de los cuatro factores causales expuestos anteriormente. Será conveniente no emplear agregados reactivos al tiempo que se emplean cementos con bajo contenido de álcalis.

Adicionalmente, se sugiere la utilización de adiciones de micro sílice ya que estas cuentan con la capacidad de fijar álcalis, por tanto, contribuirán a evitar expansiones. La incorporación de aire a la mezcla de concreto será un factor de aporte a la prevención y retardo de la reacción debido a su funcionamiento como barrera de hidratación para los geles formados.

Como medida de control es posible impermeabilizar la superficie de concreto afectada de manera que se detenga el proceso de hidratación y por tanto expansión de los geles que provocan aumento de volumen. Este tipo de fallas

debido a su invasión son de difícil corrección, en muchos casos solo será posible detener o disminuir la velocidad de reacción, sin embargo, en los casos más severos, debido al grado de compromiso estructural se deberá remover por completo el elemento.

6.2.2.2 Ataque por ácidos

El concreto debido a la presencia de calcio en el cemento y su capacidad para formar hidróxidos de calcio será un compuesto básico; su pH se encontrará generalmente alrededor de 13, esto lo hace un material muy susceptible al ataque de cualquier tipo de ácidos tanto leves como fuertes como se muestra en la ilustración 46.

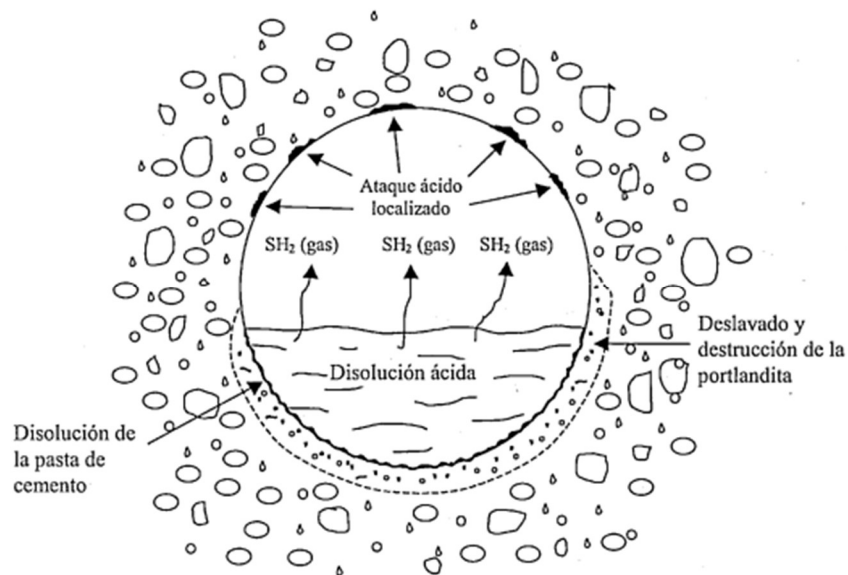


*Ilustración 46 Concreto sometido a ataque por ácidos
Fuente: (Helene & Pereira, 2003)*

Cuando un ácido entra en contacto con el hidróxido de calcio, el silicato cálcico hidratado y el aluminato cálcico hidratado (componentes cálcicos de la mezcla) presentes en la pasta de cemento se genera una reacción con los

iones de hidrógeno (H^+) del agente atacante, esto produce un compuesto de calcio soluble en agua; proceso en el cual se genera agua y sales cálcicas de naturaleza ácida soluble (Cerna Vásquez & Galicia Guarniz, 2010).

La solubilidad de la sal determinará la velocidad de degradación del concreto ya que cuanto más soluble sea la sal originada, mayor será su flujo y velocidad de penetración dentro de la masa de concreto y por tanto más rápida será la tasa de degradación de este.



*Ilustración 47 Tubería de concreto atacada por una disolución ácida
Fuente: (Sanjuan Barbudo & Castro Borges, 2001)*

El hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ será afectado en etapas tempranas y ante concentraciones más bajas y leves, por tanto, será este quien se disuelva primero debido a su debilidad ante este tipo de ataques. Por su parte, el silicato de calcio hidratado CSH (principal responsable de las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto) será el último en degradarse al verse afectado por ácidos fuertes y concentrados, será en este punto en donde las propiedades estructurales del elemento se vean afectadas de manera importante. A medida

que la reacción continúa, el concreto se debilitará cada vez más perdiendo su resistencia y sufriendo daños estructurales.

Dada la naturaleza básica y porosa del concreto será complejo el manejo de su protección ante estos agentes, por tanto, se deberá controlar y mitigar de cualquier manera el contacto con compuestos ácidos. Esto es posible de lograr mediante la instauración de barreras impermeabilizantes y resistentes a ácidos que protejan al concreto del contacto directo con el ácido.

Algunos de los principales ácidos que afectan el concreto se presentan en la tabla 3; muchos de estos ácidos pueden provenir del uso propio de la estructura como en tuberías de transporte de aguas residuales o fábricas. En estos casos es importante resaltar el papel esencial de los periodos adecuados de mantenimiento.

Tabla 3: Principales ácidos inorgánicos, orgánicos y minerales dañinos para el concreto

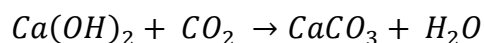
| Ácidos inorgánicos y minerales | Ácidos orgánicos |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Ácido clorhídrico | Ácido acético |
| Ácido brómico | Ácido fórmico |
| Ácido carbónico | Ácido láctico |
| Ácido de cromo | Fenol |
| Ácido fluorhídrico | Ácido tánico |
| Ácido fosfórico | Ácido butílico |
| Hidrógeno sulfurado | Ácido úrico |
| Ácido nítrico | Microrganismos |
| Ácido sulfúrico | Ácido húmico |
| Ácido sulfuroso | |

Fuente: (Sánchez, 2002)

6.2.2.3 Carbonatación

Se trata de la penetración de dióxido de carbono CO₂ presente en aire de la atmosfera o en el suelo a través de la estructura porosa del concreto. Cuando este componente penetra reacciona con los componentes alcalinos del

cemento produciendo ácido carbónico quien a su vez afectará el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ convirtiéndolo en carbonato de calcio $CaCO_3$ y agua.



Una vez efectuada esta reacción se presentará un descenso del pH en las capas afectadas de concreto llegando a un valor de hasta 9 con lo que dejará de ser un protector para la corrosión del acero de refuerzo; conforme al avance del frente de corrosión se generará una pérdida de la capa pasiva que recubre el concreto. A su vez, con el avance del frente de carbonatación, se generará una contracción adicional sobre el concreto conocida como contracción por carbonatación. Es necesario destacar la humedad relativa como factor clave en los procesos de carbonatación; será crítico contar con valores entre el 50% y el 75%. Por otra parte, si el concreto permanece seco o saturado no habrá carbonatación (Meneses Martínez, 2012).

Existen diferentes modelos matemáticos desarrollados de forma empírica con los que es posible estimar la velocidad y profundidad de carbonatación de un elemento de concreto, el más común es el modelo basado en la segunda ley de Fick.

La segunda ley de difusión de Fick es una ecuación que describe el proceso de difusión de una sustancia (en el caso de la carbonatación será un gas) en un medio sólido como lo es la matriz porosa del concreto. La ley establece la relación entre el flujo de difusión de una sustancia a través de un medio poroso y el gradiente de concentración de dicha sustancia.

De manera simplificada es posible emplear esta ley para evaluar la velocidad y la profundidad de penetración del CO_2 en el concreto; en términos

matemáticos se trata de estimar la profundidad del frente de carbonatación de forma proporcional al producto entre un coeficiente de carbonatación y la raíz cuadrada del tiempo (Vagelis G & Costas G, 1991).

$$x = k\sqrt{t} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde:

x = Profundidad del frente de carbonatación en mm

k = Coeficiente de carbonatación en mm/año^{1/2}

t = Tiempo transcurrido en años

Es importante destacar que el coeficiente de carbonatación (k) dependerá de varios factores como la porosidad, la relación agua material cementante, la cantidad de CO₂ presente en el ambiente, la humedad relativa, la temperatura, la presión del medio ambiente, tipo y cantidad de cemento, la compactación de las capas de recubrimiento del concreto y la presencia de fisuras en la matriz del concreto.

Dada a la gran cantidad de variables que influyen en estos procedimientos, será necesario realizar una evaluación detallada del valor del coeficiente de carbonatación para cada tipo de concreto y condición ambiental. Esto hace que el estudio de la carbonatación del concreto sea un tema complejo y requiera considerar múltiples variables en la evaluación del proceso de difusión.

Para obtener el valor clave del coeficiente de carbonatación se deberá contar con muestras de ensayo que permitan su calibración; esto se logra mediante la implementación de cámaras de carbonatación, estas simulan el avance del frente de carbonatación sujeto a una determinada concentración producida en

periodos de tiempo más cortos con el fin de evaluar el desempeño de determinado tipo de concreto (Moreno, Domínguez Lara, Cob Sarabia, & Duarte Gómez, 2004).



*Ilustración 48 Corte en probetas para evaluar frente de carbonatación
Fuente: (Moreno, Domínguez Lara, Cob Sarabia, & Duarte Gómez, 2004)*

Posterior a la aceleración del proceso de carbonatación se determina la profundidad del frente de carbonatación como se muestra en la ilustración 48 y la ilustración 49 mediante pruebas colorimétricas con fenolftaleína. Si la superficie de concreto se pinta con la fenolftaleína quiere decir que la capa no está carbonatada; por otra parte, cuando la capa no se pinta quiere decir que ya se encuentra carbonatada.



*Ilustración 49 Medición de frente de carbonatación en probeta
Fuente: (Moreno S. , 2010)*

Con este procedimiento se podrá estimar la velocidad de carbonatación del elemento y por tanto se podrá determinar valores adecuados de recubrimientos, especificaciones de mezcla y protecciones necesarias para garantizar la durabilidad de la estructura de acuerdo con las condiciones de exposición ambiental.

Existen procedimientos alternos al mencionado anteriormente que permiten el cálculo del coeficiente de carbonatación del elemento, estos son modelos empíricos en donde se busca involucrar variables como la resistencia mecánica, la concentración de CO₂, la temperatura, el tiempo de curado, el tipo de cemento, o la humedad relativa, ejemplo de estos son los modelos propuestos por Tuutti, Bakker, Papadakis y Castello. Por otra parte, existen modelos como el propuesto por Parrott en donde se estima el coeficiente de carbonatación en función de la permeabilidad del concreto (Galán García, 2011).

6.2.2.4 Ataque por sulfatos

El ataque por sulfatos puede presentarse por fuentes externas o internas. Será un ataque por sulfatos desarrollado por fuentes externas cuando la estructura se encuentra en contacto con agentes externos de alta concentración de sulfatos.

El ión sulfato (SO₄⁻²) que causa la degradación por origen externo del concreto podrá ser de origen natural (como suelos orgánicos, suelos arcillosos, agua de mar o aguas freáticas con capacidad de producir sales sulfatadas), biológicos (microorganismos, aguas residuales con descomposición biológica de carácter aeróbico, abonos artificiales o estiércol) o industrial (aguas domésticas e industriales, plantas industriales, fábricas de fertilizante, galvanizados o laboratorios fotográficos).

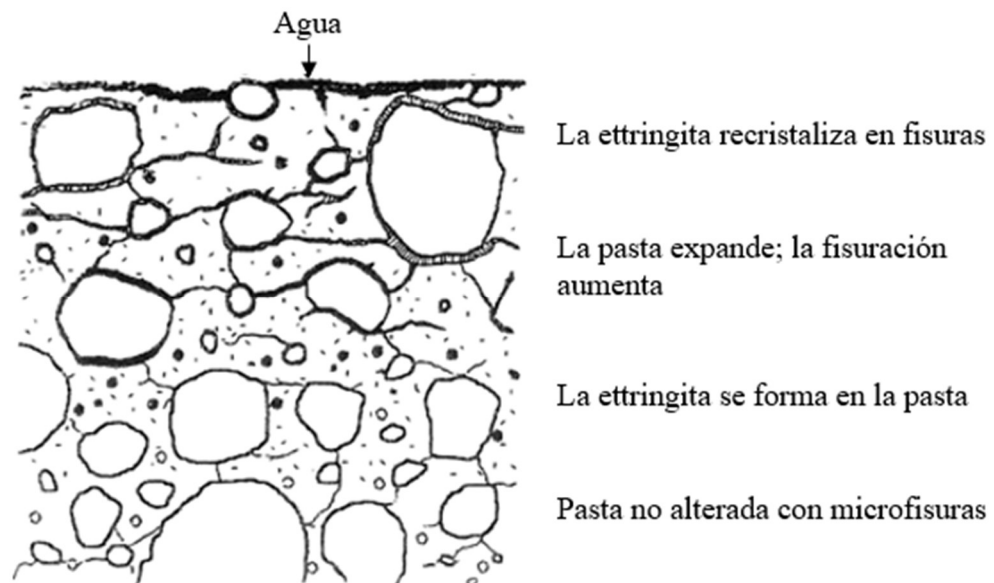
El mecanismo de reacción del ataque por sulfatos provenientes de fuentes externas será provocado por los sulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio presentes en los suelos, en el agua freática o atmósfera acumulados sobre la superficie del concreto; estos a su vez producirán una reacción con el hidróxido de calcio del cemento formando sulfato de calcio (conocido como yeso). Una vez formado el yeso se combinará con el aluminato hidratado de calcio generando sulfoaluminato de calcio también llamado ettringita (Souza, 2006).

La ettringita ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) o sulfoaluminato cálcico hidratado cristalino se forma durante la etapa de hidratación normal del cemento portland, en este estado, siempre y cuando exista un adecuado proceso de colocado y curado del concreto no representará ningún tipo de amenaza para el concreto (resaltando que se trata de ettringita inicial producida únicamente durante el proceso de fraguado del concreto). Este compuesto puede crecer y re – depositarse en espacios disponibles mediante un proceso de envejecimiento conocido como “Ostwald ripening” que no genera ningún tipo de expansión en la masa de concreto.

Por otra parte, será un ataque por sulfatos desarrollado por fuentes internas cuando se tienen materiales de elaboración del cemento con altos contenidos de sulfatos (representados en exceso de yeso como material retardante del fraguado), o por el uso de agregados contaminados (Chinchón-Payá, Torres, Rebolledo, & Sánchez, 2021).

El mecanismo de reacción del ataque por sulfatos de fuentes internas será mediante el desarrollo tardío de ettringita mostrado en la ilustración 50. La ettringita es un compuesto inestable a temperaturas superiores de 70°C produciendo que ante este tipo de condiciones durante la etapa inicial de

hidratación del concreto no se logre su formación (dado a un mal manejo del proceso de curado). Si posterior a esto (durante su vida útil), el concreto se somete a condiciones de humedad a temperatura ambiente, se dará paso a la formación de etringita, este proceso se conoce con el nombre de formación de etringita retrasada (DEF – delayed ettringite formation) (Skalny, Johansen, Thaulow, & Palomo, 1996).



*Ilustración 50 Esquema general de ataque por sulfatos.
Fuente: Tomado y adaptado de (Skalny, Johansen, Thaulow, & Palomo, 1996)*

La generación de la etringita por medios internos o externos provocará un aumento en volumen sólido dado a la formación del yeso, así como la expansión, ruptura y ablandamiento del concreto por acción del sulfato. Posteriormente, se presentará una pérdida de la adherencia entre la pasta y los agregados; esto se traduce en una reducción de la resistencia del concreto en conjunto con una la degradación por expansión y fisuración de la masa de concreto.

La taumasita es un compuesto cristalino que presenta una estructura similar a la ettringita. Se forma cuando los sulfatos reaccionan con los componentes del cemento hidratado. A diferencia de la reacción con los aluminatos cálcicos hidratados, en este caso la taumasita se genera mediante la reacción con los silicatos y carbonatos presentes en el concreto, dando lugar a la formación de una sal compleja. Esta reacción provoca principalmente la desintegración del gel CSH al interactuar con los silicatos cálcicos que lo componen. La presencia de taumasita conlleva la pérdida de cohesión del gel CSH y, en casos de abundante formación, puede ocasionar que el concreto se despegue con facilidad y se desintegre incluso con una suave presión (Chinchón-Payá, Torres, Rebolledo, & Sánchez, 2021).

El deterioro superficial causado por el ataque de sulfatos se manifiesta mediante el inicio de daños en las aristas y esquinas afiladas, dando lugar a la formación de micro - fisuras y fisuras que provocan el astillamiento del concreto y su transformación en una sustancia desmenuzable y de consistencia blanda como se muestra en la ilustración 51.



*Ilustración 51 Deterioro acentuado en las aristas del elemento por ataque de sulfatos
Fuente: (W. Mazer, G. Macioski, N. Soto, & E. Baettker)*

Cómo método de prevención ante este tipo de ataques es aconsejable el uso de cementos con bajo contenidos de sulfatos (presentes en el yeso como material retardante), emplear agregados con bajo nivel de sulfatos, controlar temperaturas, vibrado, compactación y curado en las etapas iniciales, usar concretos con baja permeabilidad (con el fin de reducir la velocidad de transporte de los iones de sulfato) y manejar cementos con baja relación agua material cementante. Adicionalmente, es posible como método de control emplear materiales cementicos suplementarios mediante la incorporación de adiciones reemplazando parcialmente el uso del cemento por otros elementos como humo de sílice o el metacaolín; se ha demostrado que su incorporación mejora el desempeño en ambientes con contenidos de sulfatos (Tróchez, Maturana, De Gutiérrez, & Guerrero, 2009).

6.2.2.5 Lixiviación por aguas blandas

Cuando se habla de aguas blandas se hace referencia a aguas con pocas impurezas en su contenido tales como las presentes en algunas industrias, aguas libres de sales, aguas de glaciares, nieve, pantanos y subterráneas. Este tipo de aguas contienen valores de pH cercanos a 7, por lo tanto, al entrar en contacto con el concreto disuelven los compuestos cálcicos del cemento provocando una disgregación o lixiviación del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), esto es, una disminución del contenido de óxido de calcio de la pasta de cemento como se muestra en la ilustración 52 (Vargas & Fernández, 2002).

Los concretos de cemento Portland se ven fuertemente afectados cuando el contenido de CaO se reduce en por encima del 20%; esto provocará como consecuencia la degradación de los demás componentes de la pasta como los silicatos, aluminatos y ferritos. Estos efectos darán origen a una pérdida de resistencia y desintegración del concreto exponiendo o eliminando la capa de pasividad del acero de refuerzo (Cerna Vásquez & Galicia Guarniz, 2010).



*Ilustración 52 Ataque y exposición de acero de refuerzo por aguas blandas.
Fuente: (Cerna Vásquez & Galicia Guarniz, 2010)*

Se cuenta con una situación particular cuando existe presencia de CO_2 en el agua proveniente del dióxido de carbono de la atmósfera, esta será una reacción de ataque sobre el concreto por aguas casi puras ya que su reacción con el agua dará origen a ácido carbónico y por consiguiente se tendrá un ataque por ácidos como se menciona anteriormente.

El proceso de lixiviación por aguas blandas será lento y dependerá de las características del concreto, de la concentración iónica del agua y de la dinámica (aguas estáticas o dinámicas). Al contar con un flujo de agua de alta velocidad se verá incrementada considerablemente la afectación en el concreto (Villar Arribas, 2018).

6.2.2.6 Corrosión del acero de refuerzo

Cuando el acero de refuerzo termina su proceso de fabricación estará sometido a temperaturas de 1200°C para luego pasar a estar a una temperatura

ambiente. Este proceso genera una oxidación inicial sobre el material producto de la interacción inicial con el medio ambiente; como consecuencia, las barras de acero de refuerzo desarrollarán una fina película de oxidación color gris oscuro de un espesor cercano a las 50 micras quien actuará como protección inicial ante procesos de corrosión posteriores (Rondon, 2022).

Posterior a la elaboración del acero de refuerzo pueden generarse capas adicionales de corrosión por efecto de la humedad del medio ambiente, por esto se requiere establecer parámetros límites para el uso de acero con cierto grado de corrosión; en la tabla 4 se establece de una forma cualitativa el grado de corrosión y su recomendación en el empleo como acero de refuerzo para el concreto reforzado.

Cuando el acero es embebido dentro de la masa de concreto se genera un nuevo proceso de oxidación al presentarse una interacción entre el oxígeno del interior de la mezcla de concreto y el acero. Esta oxidación se traduce en una capa fina de óxido sobre el acero conocida como proceso de pasivación la cual actúa como protección ante una corrosión posterior. Adicionalmente se tendrá al concreto interactuando como una barrera física entre el acero de refuerzo y el medio externo gracias al recubrimiento que proporciona un medio alcalino con un pH del orden de 13 (Rolandi, 2020).

Existirá una probabilidad de corrosión adicional en el acero cuando la barrera protectora de este se vea comprometida por la eliminación del recubrimiento del acero de refuerzo, por generación de fisuras que permitan llegar al acero de refuerzo o por la reducción del pH del concreto a valores cercanos a 9 como consecuencia de ataques por ácidos, carbonatación por presencia de CO₂, presencia de aguas blandas o por acción de cloruros, sulfatos u otros iones despasivadores.

Tabla 4: Medición cualitativa de la corrosión en barras de acero de refuerzo

| Estado de la barra | Descripción de la visualización | Recomendaciones previas a su uso |
|--|---|---|
| <p>Barra recién laminada</p>  | <p>Superficie lisa y uniforme color gris oscuro o gris acero, con firmes y delgadas películas adheridas producto de la laminación (laminillas) y sin nada de óxido aparente.</p> | <p>Sin restricción de uso</p> |
| <p>Barra levemente oxidada</p>  | <p>Superficie lisa y uniforme color gris oscuro o gris acero, con firmes y delgadas películas adheridas producto de la laminación (laminillas), pero con algunas zonas manchadas con un polvillo color pardo amarillento, producto de una oxidación superficial por condensación de la humedad del medio ambiente mezclada con elementos de naturaleza orgánica o química poco agresivos. Este polvillo se pierde generalmente con la manipulación.</p> | <p>Sin restricción de uso</p> |
| <p>Barra poco oxidada</p>  | <p>Superficie con zonas mayoritariamente de color pardo rojizo, donde algunas poquísimas costras y laminillas comienzan a soltarse, pero el núcleo, todos los resaltes y los nervios longitudinales se notan relativamente sanos. Las barras presentan pocas, pequeñas e insignificantes picaduras (puntos de corrosión) y prácticamente no pierde óxido suelto por manipulación.</p> | <p>Sin restricción de uso, salvo que en algunos casos se podría requerir una leve limpieza superficial con herramienta manual o mecánica.</p> |

Barra oxidada



Superficie de color pardo rojizo, donde un porcentaje de los resaltes y nervios longitudinales se notan dañados y casi han perdido su forma original. Tiene varias costras y laminillas sueltas y solo unas pocas aún están adheridas, a simple vista presenta herrumbre y varias picaduras y cráteres (puntos de corrosión), pero pierde un poco de óxido suelto por manipulación.

Estas barras requieren obligatoriamente de limpieza superficial manual o motriz enérgica y profunda, y por ello su uso está condicionado a una verificación previa de la masa y características dimensionales de sus resaltes y nervios longitudinales.

Barra muy oxidada



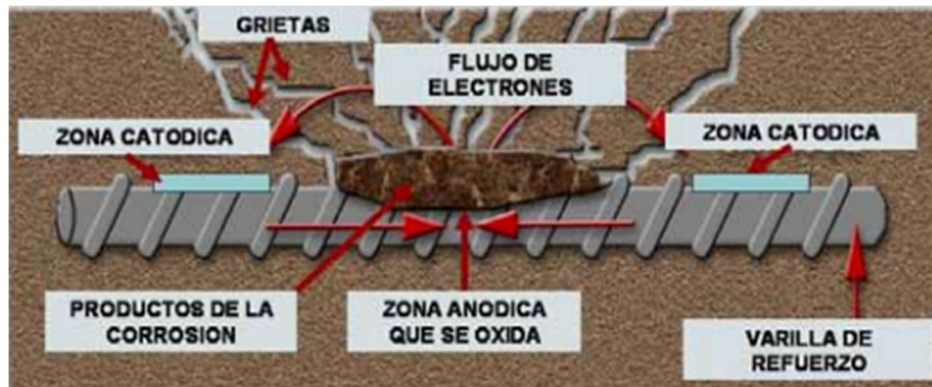
Superficie de color rojizo y en ocasiones con zonas manchadas con matices de otros colores, producto del hollín y de otros agresivos del medio ambiente. La laminilla se ha desprendido en su totalidad y presenta muchas costras, muchas de las cuales se desprenden solas o con escobillado manual. El núcleo, los resaltes y los nervios longitudinales con bastantes cráteres o picaduras. Los resaltes y nervios desaparecen en algunas partes confundidos con los elementos de la corrosión. Las barras pierden bastante óxido y herrumbre por manipulación.

No sería recomendable el uso de estas barras, ya que, al ser manipuladas y tratadas mediante cualquier método de limpieza superficial, es altamente probable una pérdida importante de su masa o de las características dimensionales de los resaltes.

Fuente: Tomado y adaptando de (Rondon, 2022).

El proceso de corrosión del acero al interior del concreto será de tipo electroquímico en donde existirá una transferencia de electrones y iones

producto de la celda electroquímica mostrada en la ilustración 53 en donde se presenta una corriente eléctrica.



*Ilustración 53 Esquema general de celda electroquímica de corrosión
Fuente: (Torres Acosta, Pérez Quiroz, Ramírez Rentarúa, & Martínez Madrid, 2006)*

Como etapa inicial de este flujo se genera una oxidación del hierro; esto es, una pérdida de electrones producto del contacto del acero con el oxígeno y la humedad. Este proceso se puede acentuar por consecuencia del contacto con sustancias corrosivas como cloruros o sulfatos. Posteriormente, los electrones cedidos durante el proceso de oxidación que se encuentran en el acero se combinarán con el agua y el oxígeno por medio del flujo de la corriente eléctrica (producidos por el ánodo y el cátodo) formando iones de oxidrilo quienes a su vez reaccionan con el hierro dando origen al óxido de hierro o herrumbre (Fe_2O_3) (Cerna Vásquez & Galicia Guarniz, 2010).

Una vez que se ha formado el óxido de hierro se producirá una expansión volumétrica que será proporcional a la cantidad de oxígeno en reacción produciendo esfuerzos de tensión en la matriz de concreto y por tanto fisuraciones como se muestra en la ilustración 54. Este cambio en el volumen y la generación de una capa de óxido en el acero trae como consecuencia la reducción del diámetro de la barra de acero (dado a que parte del material reaccionó para formar el óxido de hierro) con lo cual se perderá capacidad del

elemento de concreto reforzado al mismo tiempo que se da una reducción en la adherencia y ductilidad del concreto.

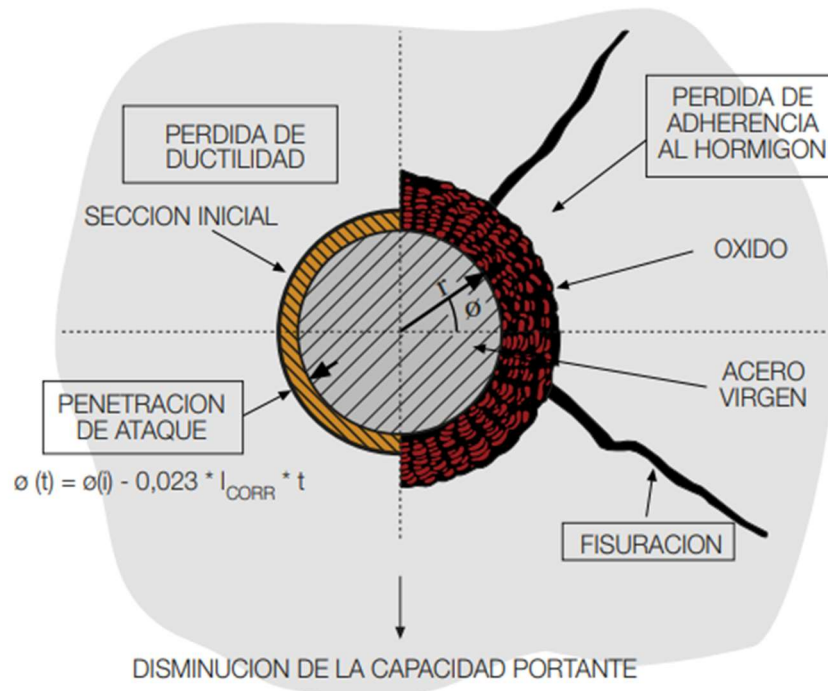
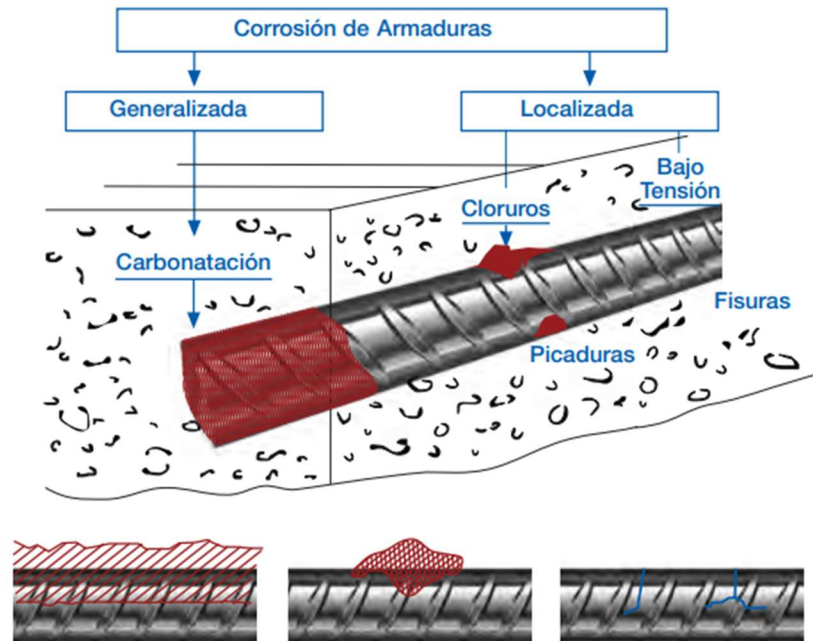


Ilustración 54 Esquema de afectación de la corrosión sobre la masa de concreto
Fuente: (Rondon, 2022)

El fenómeno de la corrosión presentado anteriormente será potenciado por los procesos de difusión de O_2 , CO_2 y iones de cloruro Cl^- , por tanto, será esencial el manejo de la permeabilidad del concreto para reducir la penetración de estas sustancias hasta el acero de refuerzo. Así mismo, importante el manejo de las buenas prácticas de durabilidad del concreto para evitar fisuraciones que propicien el fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo.

De la misma forma será esencial el manejo de un recubrimiento adecuado como se expuso en los ataques químicos anteriores dado a que dejan expuesto el acero de refuerzo eliminando su característica despasivadora.



*Ilustración 55 Tipos de corrosión electroquímica
Fuente: (Rondon, 2022)*

La corrosión al interior del acero de refuerzo puede presentarse tanto de manera generalizada (cuando la armadura se ve comprometida en mayor superficie) como de manera localizada (cuando la armadura se ve comprometida de manera puntual).

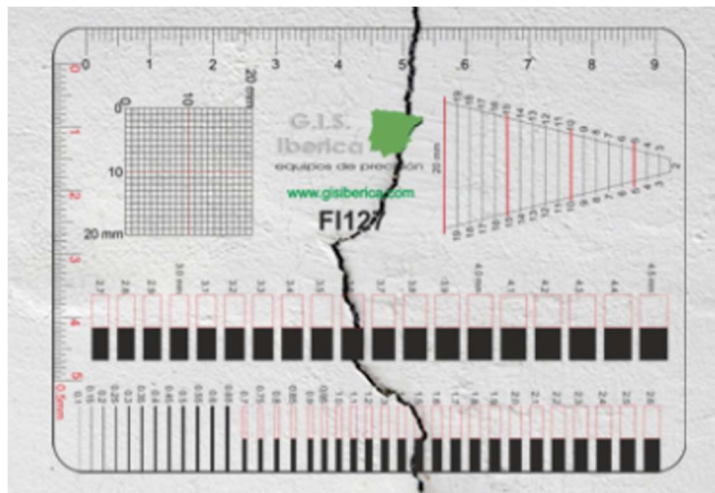
La corrosión generalizada estará asociada al fenómeno de carbonatación descrito en la página 122, allí se presentará un ataque general conforme el frente de carbonatación avanza; por tanto, toda la superficie del acero de refuerzo expuesta al CO_2 presentará procesos de corrosión perdiendo toda la película pasivadora que lo protege, en esta misma categoría se sitúa la corrosión en el acero desarrollada por el ataque de ácidos o la lixiviación por aguas blandas.

Por otra parte, la corrosión localizada como se observa en la ilustración 55 afectará de manera puntual la zona comprometida del acero, esto se debe a la

limitación del oxígeno a penetrar en toda la superficie del acero; es decir, el oxígeno solo podrá estar en contacto con el acero de manera discontinua. Dentro de este tipo de corrosión se sitúan las ocasionadas por cloruros (por la incorporación del ión cloruro en la masa de concreto), por picaduras (por diferencias en la composición del material o defectos en su producción) y por esfuerzos de tensión (cuando se tiene el acero en un medio agresivo bajo esfuerzos tracción, allí se produce una concentración de esfuerzos en el punto localizado del ánodo provocando fallas súbitas; esta es una situación típica del concreto presforzado, esta es una de la razones por las que no se admiten fisuras en esta metodología de diseño).

6.2.3 Mecánicas

Las fallas de causa específica de tipo mecánico se caracterizan por tener origen en la aplicación de cargas sobre los elementos estructurales. A su vez, este tipo de fallas podrán clasificarse según la deficiencia que las origine en estructurales, vibraciones excesivas y abrasiones.



*Ilustración 56 Medición con fisurómetro del ancho de una fisura.
Fuente: (G.I.S. Ibérica, 2023)*

Las manifestaciones de las fallas mecánicas en los elementos de concreto típicamente se reflejan como fisuras, una forma de determinar el espesor de estas es mediante el empleo de fisurómetros como el mostrado en la ilustración 56. Será importante definir un criterio de ancho de fisuración aceptable para los elementos de concreto; este parámetro dependerá del tipo de uso que se le dé a la estructura como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Guía de anchos permisibles de fisuras en estructuras de concreto reforzado

| Condición de exposición | Ancho fisura (mm) |
|--|--------------------------|
| Aire seco o membrana protectora | 0.41 |
| Humedad, aire húmedo y suelo | 0.3 |
| Productos químicos descongelantes | 0.18 |
| Humedecimiento y secado de agua de mar | 0.15 |
| Estructuras de retención de agua | 0.1 |

Fuente: (ACI-224-01, 2008)

Es importante definir como parámetro de entrada la terminología general de clasificación de fisuras según su espesor ya que este definirá el nivel de afectación, por esto, en la tabla 6 se proporcionan espesores de fisuras de referencia en conjunto con el nivel de afectación que representan y su clasificación como microfisura, fisura, macrofisura, grieta, fractura y dislocación.

Tabla 6: Clasificación de fisuras y grietas en función a su ancho y grado de repercusión en las estructuras.

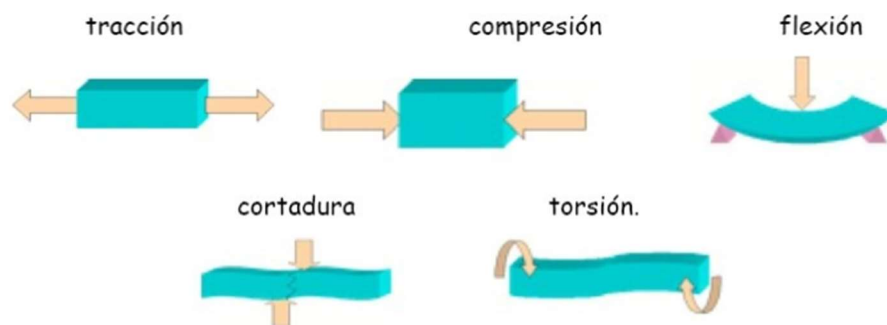
| Clasificación por ancho (e) en mm | | Nivel de repercusión en la estructura |
|-----------------------------------|-------------------|--|
| Microfisura | $e < 0.05$ | Nivel muy bajo |
| Fisura | $0.10 < e < 0.20$ | Nivel bajo: Tener cuidado con ambientes marinos u otros agresivos donde pueda desencadenarse la corrosión del acero. Nivel moderado: Podría existir repercusiones estructurales, se requiere estudio de vulnerabilidad para el diagnóstico y alternativas de reparación y/o reforzamiento en caso lo amerite. |
| Macrofisura | $0.20 < e < 0.40$ | Nivel alto: Podría existir reducción de la capacidad sismorresistente. Se requiere estudio de vulnerabilidad para el diagnóstico, y alternativas de reparación y/o reforzamiento en lo aplicable. |
| Grieta | $0.40 < e < 1.00$ | Nivel muy alto: Podrá existir un compromiso estructural de la edificación. |
| Fractura | $1.00 < e < 5.00$ | Nivel extremo: Se requerirá de especial atención dado al alto grado de compromiso de la estructura y el riesgo de colapso. |
| Dislocación | $e > 5.00$ | |

Fuente: adaptado de (Sotomayor C, 2020)

A modo general es posible clasificar la causa de fallas mecánicas en tres tipos: deficiencias estructurales, vibraciones excesivas y abrasiones.

6.2.3.1 Deficiencias estructurales:

Las deficiencias estructurales tendrán especial relación con la mecánica de materiales; en la ilustración 57 se muestran los principales comportamientos de los elementos sometidos a determinada carga.



*Ilustración 57 Esquema general de esfuerzos internos sobre elementos
Fuente: (Ferro Web, 2016)*

Dentro de las deficiencias estructurales es posible realizar una clasificación en grietas estructurales inducidas por cargas, deflexiones y movimientos excesivos e imprevistos y fracturas y aplastamientos.

6.2.3.1.1 Fisuras y grietas inducidas por cargas:

Para determinar las posibles causas de falla por cargas externas o inducidas será importante conocer la distribución de la trayectoria de cargas y su efecto como esfuerzos internos; en la ilustración 58 se muestra la distribución de manera general de los esfuerzos en las fibras de un pórtico de concreto y sus esfuerzos internos clasificados como compresiones, tensiones y tensiones de corte.

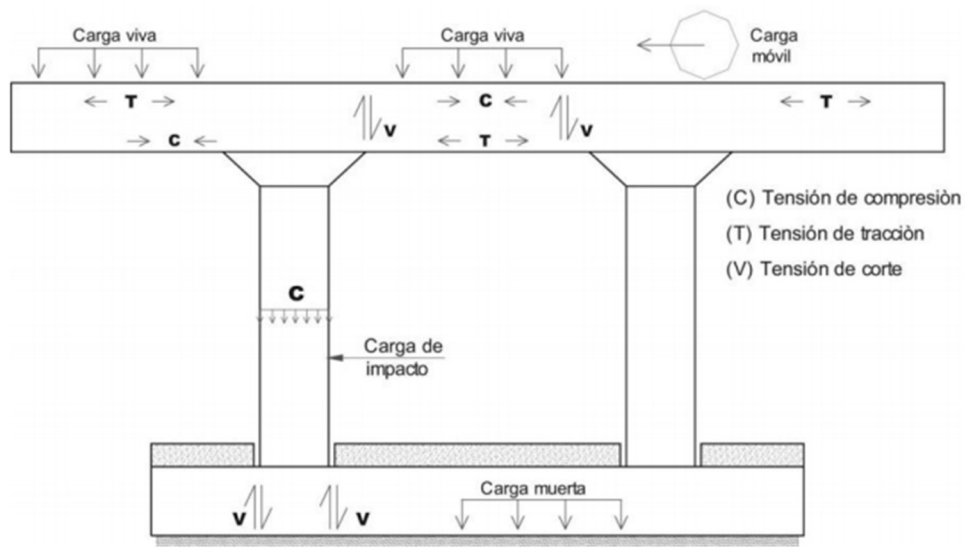


Ilustración 58 Distribución general de esfuerzos internos ante cargas externas.
Fuente: (AIS, 2011)

Las fisuras por cargas inducidas se presentarán en las zonas en donde las fibras del elemento se encuentran en tracción y superan la capacidad máxima del elemento reforzado con determinada cuantía de acero. El patrón de distribución de las fisuras dependerá del tipo de esfuerzo interno por el cual fueron originadas, sin embargo, su origen puede deberse a diversos factores como errores de cálculo, subestimación de los efectos de cargas, deficiencias en el dimensionamiento de la sección transversal del elemento o del refuerzo interno resistente a las tracciones, deficiencias en el posicionamiento del refuerzo interno o por deficiencias en la resistencia del concreto.

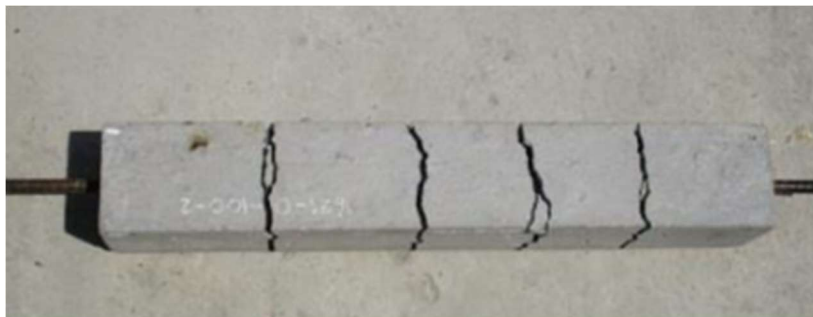
6.2.3.1.1.1 Tracción pura

Las fisuras debidas a la tracción pura tendrán un patrón de distribución perpendicular a la dirección del refuerzo principal como se muestra en la ilustración 59.



*Ilustración 59 Distribución general de fisuras por tracción pura.
Fuente: (Helene & Pereira, 2003)*

El concreto de refuerzo es un material con baja resistencia a la tensión; esta será de alrededor del 10% de su capacidad a compresión, por tanto, se requiere del uso de un material adicional como el acero para tomar estos esfuerzos de tracción. Una vez que la fibra en tracción alcanza el límite de resistencia a tracción del concreto este se fisurará y el acero será el único responsable del trabajo a tensión; es por esto por lo que en algunas metodologías de diseño como la resistencia última se desprecia por completo el aporte del concreto en las fibras a tensión.

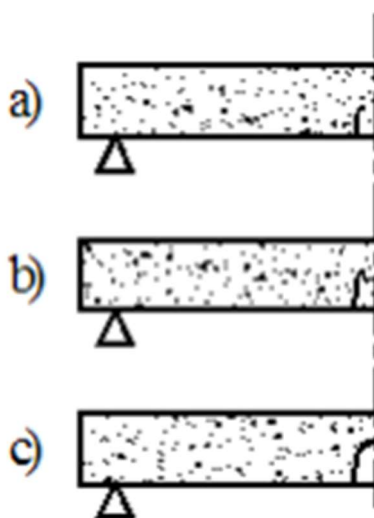


*Ilustración 60 Probeta de ensayo sometida a tracción pura
Fuente: (Mancera Hernández & Rojas Quiroz, 2016)*

Conforme los esfuerzos de tracción aumentan en las fibras extremas se ampliará el espesor de las fisuras formando grietas quienes producen una discontinuidad o interrupción de la transferencia de cargas producto de la pérdida de adherencia en la grieta formada. Posterior a esto, con un aumento de las cargas de tensión se tendrá la falla del elemento por capacidad máxima; este tipo de falla se considera una falla dúctil dado a que permite el desarrollo de la zona de fluencia del acero produciendo un desarrollo progresivo de las fisuras dando espacio a futuras intervenciones por concepto de reparación o reforzamiento.

6.2.3.1.1.2 Flexión

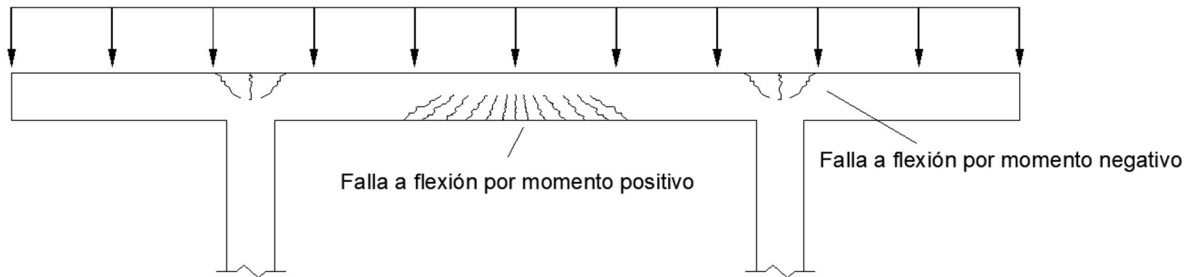
Este tipo de fallas tienen un comportamiento similar al de las grietas por tracción pura, sin embargo, su diferencia radica en la propagación de las fisuras pues ya no se encontrarán únicamente en el tramo que contiene el acero de refuerzo, sino que llegarán hasta el eje neutro o zona donde inician los esfuerzos de compresión del elemento.



*Ilustración 61 Desarrollo de fisuras por flexión
Fuente: (Helene & Pereira, 2003)*

En la ilustración 61 se muestra el desarrollo de las fisuras por flexión. Se parte de un estado de cargas en el que la fibra más extrema de concreto del elemento sometida a tensión alcanza la capacidad máxima ante esta sollicitación e inicia su proceso de fisuración generando grietas

por tracción pura. Seguidamente conforme se produce un aumento en las cargas se generan grietas por flexión; estas no solo cubrirán las zonas cercanas al acero de refuerzo, sino que iniciarán su propagación en la sección del elemento hasta alcanzar el nivel del eje neutro o límite de la zona en tracción desarrollando un patrón como el mostrado en la figura C).



*Ilustración 62 Esquema general fisuras por flexión
Fuente: Elaboración propia*

La localización de las fisuras de flexión corresponderá a las condiciones de apoyo del elemento. En la ilustración 62 se presentan casos generales de condiciones de apoyo de elementos en concreto en conjunto con su distribución de fisuras que obedecen al desarrollo de las fuerzas internas de tensión transitando siempre desde la fibra más extrema en tensión hasta llegar al eje neutro del elemento. Uno de los ensayos más comunes es el ensayo a flexión de vigas como se muestra en la ilustración 63, con este se pretende evaluar las propiedades mecánicas de una viga, esta será en muchos casos un elemento a escala 1:1.



*Ilustración 63 Falla a flexión (fisuras perpendiculares a la dirección del acero longitudinal)
Fuente: (Beltran Riveros , 2011)*

6.2.3.1.1.3 Longitudinales

Las fisuras longitudinales serán aquellas que se disponen a lo largo de la dirección de las barras de refuerzo, estas podrán tener origen en la retracción plástica o en los asentamientos plásticos mencionados en las fallas de carácter físico. Por otra parte, también pueden tener origen en la falta de adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, típicamente esto se debe a errores en los procesos constructivos como la contaminación del acero de refuerzo con aceites, bentonita u óxido en las corrugas quienes impiden la adecuada transmisión de cargas entre el concreto y el acero de refuerzo.

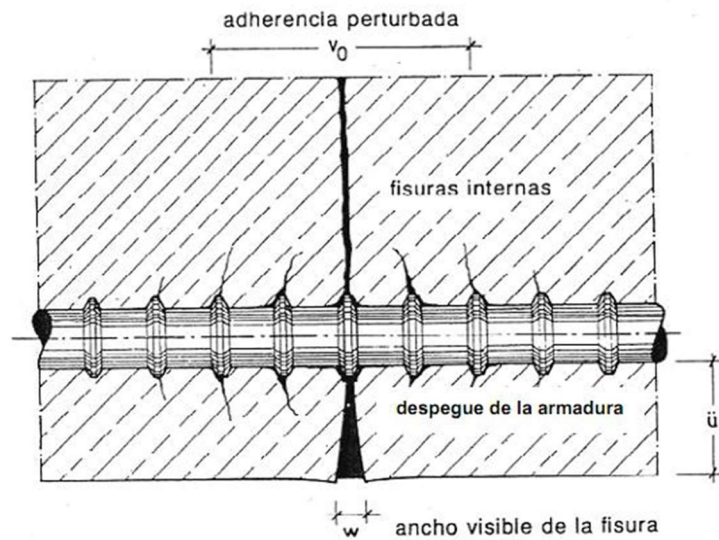


Ilustración 64 Esquema general falla por adherencia
Fuente: (Mallo Feijóo, 2012)

Como acción mecánica originadora de las fallas longitudinales se tienen los altos esfuerzos de compresión producidos al transmitir las cargas de tensión entre las corrugas del acero de refuerzo y el concreto, dichas cargas fracturan y dividen la sección de concreto como se muestra en la ilustración 64; es posible encontrar como fuente adicional de este tipo de fallas las deficiencias en anclajes o en los traslapos entre el acero de refuerzo.

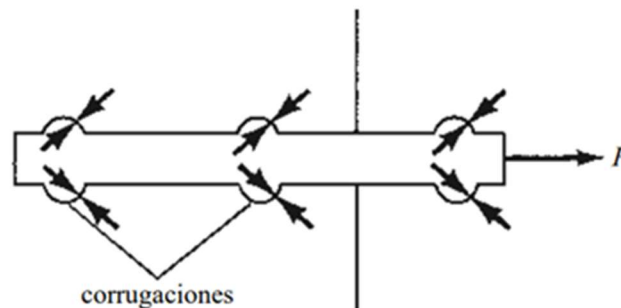


Ilustración 65 Transmisión de fuerzas entre corrugas de acero de refuerzo y concreto
Fuente: (McCormac & Brown, 2018)

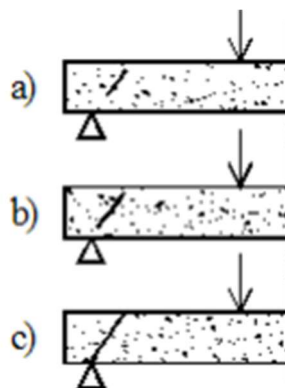
En la ilustración 65 se muestra el esquema de transmisión de fuerzas entre el concreto y el acero de refuerzo, de esta forma se evidencian las compresiones excesivas sobre las corrugaciones del elemento.



*Ilustración 66 Falla longitudinal por adherencia del acero de refuerzo
Fuente: (Cueva del ingeniero civil, 2011)*

6.2.3.1.1.4 Cortante o tracción ortogonal

Dado a que en la distribución de esfuerzos cortantes en una sección rectangular se tiene un punto de esfuerzo máximo en el centro de la sección transversal (zona en donde se tiene el máximo esfuerzo cortante y el mínimo esfuerzo por flexión); es en este punto en donde iniciará el desarrollo de la fisura como muestra el esquema de la ilustración 67, posterior a esto, con el aumento del esfuerzo sobre la sección se prolongará la fisura hasta alcanzar toda la altura de la sección.



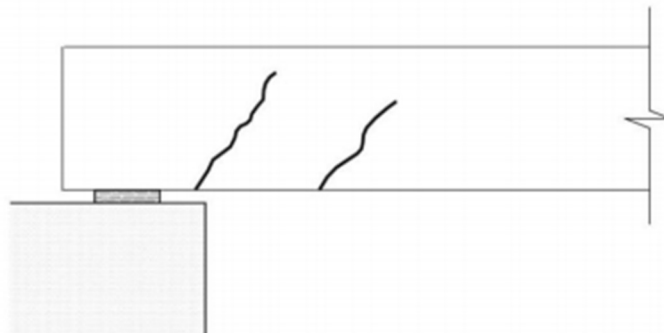
*Ilustración 67 Desarrollo de fisuras por corte
Fuente: (Helene & Pereira, 2003)*

Las fisuras producidas en el elemento de concreto por acción de los esfuerzos de corte tendrán una inclinación de aproximadamente 45° como se muestra en la ilustración 68 (por esta razón se conoce a este comportamiento también con el nombre de tracción ortogonal o tensión diagonal).



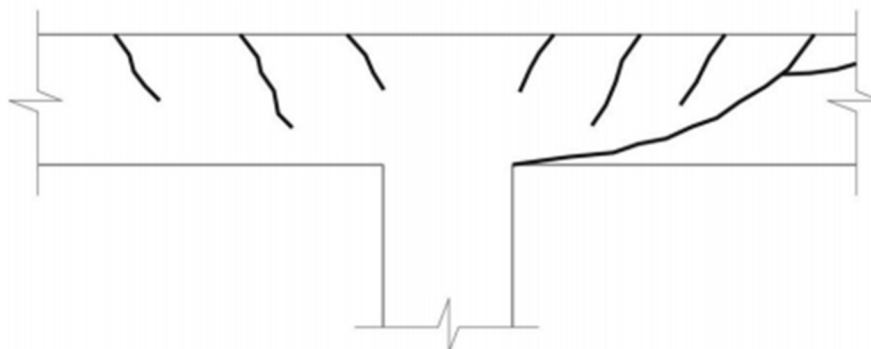
*Ilustración 68 Falla de viga por cortante en proximidades al apoyo
Fuente: (Serrano, 2023)*

Es posible identificar fallas por acción netamente de corte como lo es el caso de la ilustración 69 en donde se tendrá una viga simplemente apoyada y por tanto en la sección de la viga cercana a los apoyos la distribución de las fuerzas internas por flexión serán mínimas mientras que las fuerzas internas por fuerzas de corte serán máximas.



*Ilustración 69 Fisuras por corte en proximidad de apoyo de viga simplemente apoyada.
Fuente: (AIS, 2011)*

Por otra parte, se podrán tener acciones conjuntas de esfuerzos cortantes y de flexión como se muestra en la ilustración 70 en donde se observa una inclinación de las fisuras producidas por flexión.

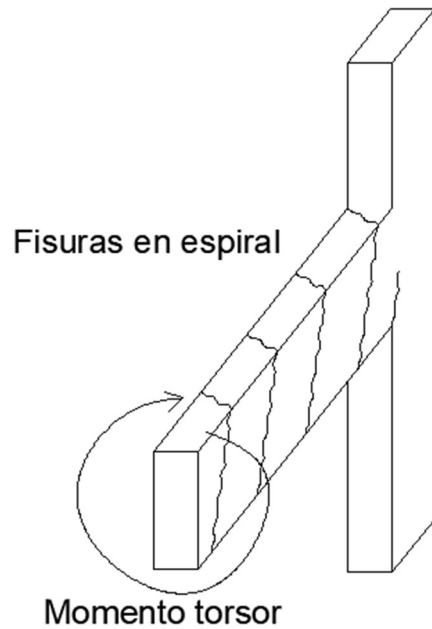


*Ilustración 70 Acción conjunta de fisuras por cortante y flexión
Fuente: (AIS, 2011)*

Las fallas por cortante radican su origen en la deficiencia tanto de la sección de concreto como de la cuantía de acero transversal (estribos, espirales o refuerzo externo) suministrada para resistir las cargas producidas por corte bien sea por la aplicación de cargas distribuidas o por la aplicación de cargas puntuales (caso más crítico); este tipo de fallas se considera como una falla súbita y es indeseable al considerar un diseño dado a su naturaleza de falla de tipo explosiva.

6.2.3.1.1.5 Torsión

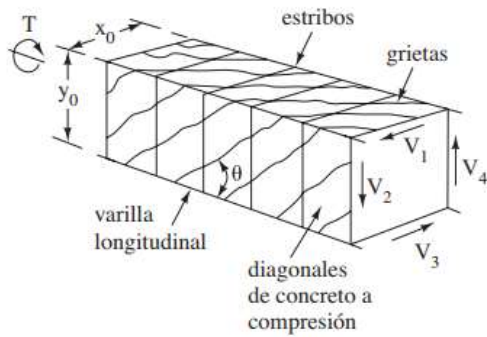
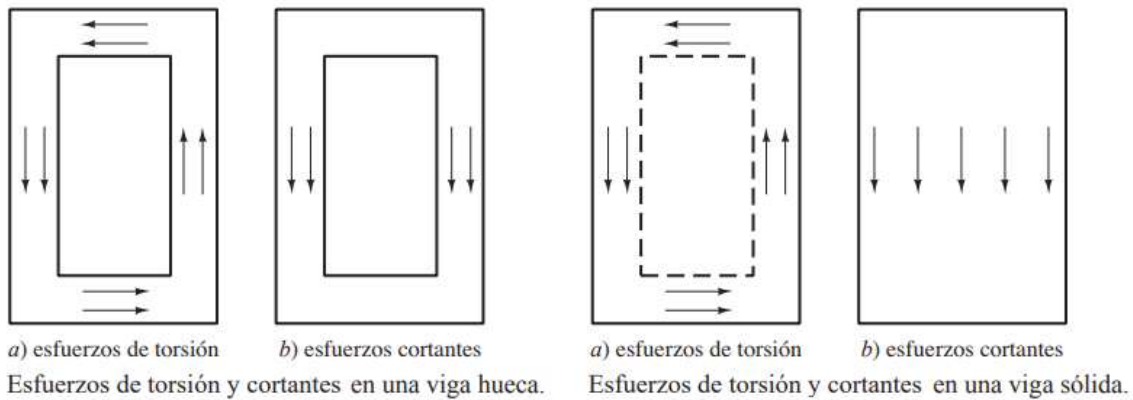
Las fisuras por la acción de efecto torsor será similar a las causadas por los efectos de corte, pero en este caso su patrón de distribución será en espiral de forma continua como se muestra en la ilustración 71.



*Ilustración 71 Esquema general de falla a torsión primaria
Fuente: Elaboración propia*

La acción de los efectos torsores se ve especialmente considerada en elementos como vigas curvas, escaleras de caracol, vigas de puentes, vigas de fachada, vigas que soportan voladizos y en general vigas con cargas excéntricas.

Los esfuerzos por torsión se presentan en todas las caras del elemento con lo cual, en una cara de la sección los esfuerzos se sumarán con las acciones de corte, mientras que en la cara opuesta se restarán como se muestra en la ilustración 72; esta acción contraria a los efectos del corte se concentrará en los extremos de la sección transversal siguiendo un patrón de espiral. En esta misma figura se presenta la equivalencia de la armadura en donde los miembros a tensión estarán representados por el acero de refuerzo y los miembros a compresión serán los puntales equivalentes de concreto como metodología de diseño y equivalencia de la trayectoria de cargas.



Armadura espacial imaginaria
[de la Figura R22.7.6.1(a) del ACI]

*Ilustración 72 Distribución general de esfuerzos de corte y torsores y equivalencia de armadura para diseño de elementos a momento torsor.
Fuente: (McCormac & Brown, 2018)*

Para resistir este tipo de fuerzas se debe proveer a la sección de confinamiento transversal (estribos cerrados o espirales) para interceptar las diferentes componentes verticales de tensión en espiral que atraviesan la sección en conjunto con un refuerzo longitudinal que tome la componente horizontal de la trayectoria en espiral que describe este comportamiento, de manera que se cumpla con la idealización de la armadura espacial imaginaria.

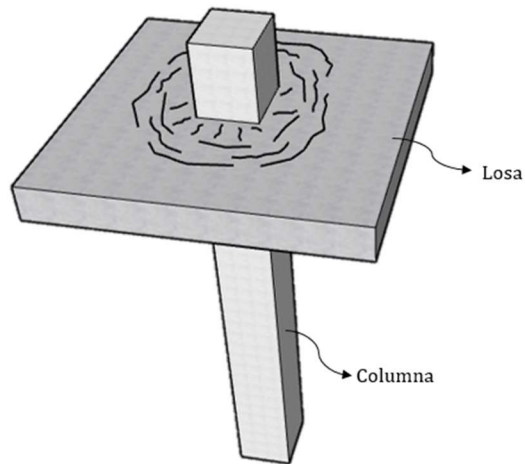


*Ilustración 73 Falla por torsión en pila
Fuente: (Villegas Esparza, 2016)*

Este tipo de falla es de especial interés debido al poco rigor en etapas de diseño que se suministra al estudio del comportamiento de los elementos ante este tipo de cargas. La falla por cargas de torsión conduce a una falla frágil por desgarramiento del elemento, al igual que la falla por cortante se trata de una falla de tipo súbito y explosiva.

6.2.3.1.1.6 Punzonamiento o cortante en dos direcciones

La falla por punzonamiento tiene un comportamiento similar a la falla por cortante, su diferencia radica en la acción del efecto cortante en dos direcciones; al producirse la falla se genera una superficie de fractura con geometría tronco piramidal en el área cargada o área crítica con un ángulo de aproximadamente 45° , esto, al igual que la falla por cortante conduce a una falla frágil por ausencia de capacidad del elemento estructural en la zona como se muestra en la ilustración 74.



*Ilustración 74 Esquema general de falla por punzonamiento
Fuente: (Daños en estructuras de concreto, 2021)*

Este tipo de falla típicamente se produce en uniones entre elementos con una carga axial amplia y elementos con bajo espesor como los sistemas de losa plana o cimentaciones bajo sistemas de zapatas o losas macizas. Esta falla se controla mediante el empleo de espesores adecuados de concreto reforzado en los elementos que reciben la losa; sin embargo, la ausencia de elementos que transmitan las cargas como capiteles, ábacos o vigas son uno de los principales focos de fallas en las estructuras de concreto.

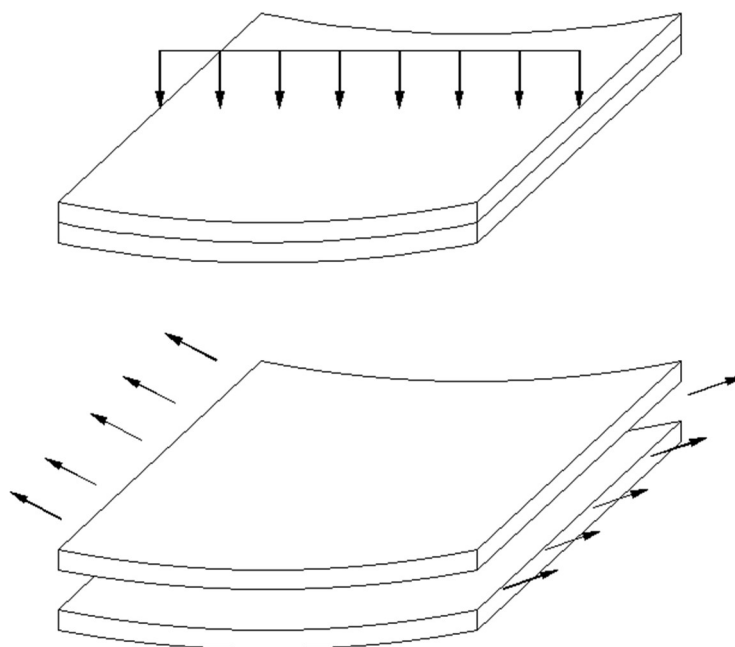


*Ilustración 75 Punzonamiento de columna en placa
Fuente: (Daños en estructuras de concreto, 2021)*

6.2.3.1.1.7 Cizalladura

Esta clase de deficiencia ocurre en partes compuestas de concreto reforzado que consisten en un componente de concreto prefabricado y una capa adicional vertida en el lugar (estos sistemas se pueden evidenciar en prefabricados presforzados, estructuras de puentes o sistemas de losas aligeradas poco convencionales) como se muestra en la ilustración 76.

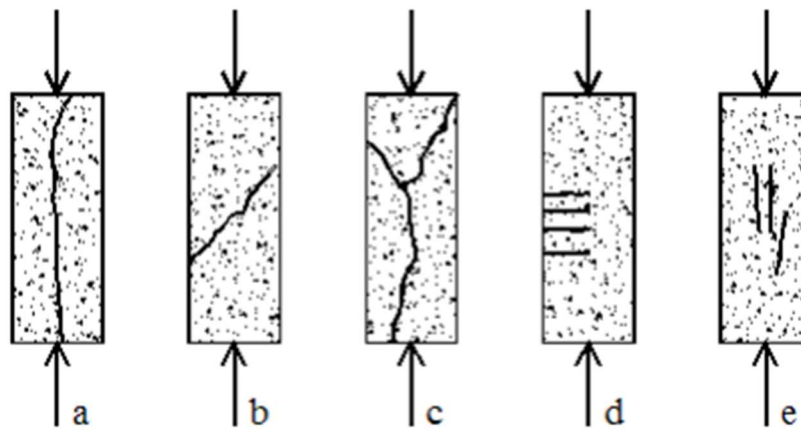
En este caso, es crucial asegurar la resistencia al esfuerzo de cizalladura mediante la utilización de anclajes mecánicos y, ocasionalmente, anclajes químicos; típicamente se trata de anclajes a cortante en conjunto con la utilización de un puente de adherencia entre los concretos de diferentes edades acompañado de una correcta preparación de la superficie, esto con el objetivo de preservar la integridad estructural de ambos elementos asegurando una correcta compatibilidad de deformaciones y por tanto garantizar una correcta transmisión de esfuerzos entre los dos materiales mediante una adherencia entre las capas de concreto (Sánchez, 2002).



*Ilustración 76 Esquema general de falla por cizalladura en sección compuesta de concreto
Fuente: Elaboración propia.*

6.2.3.1.1.8 Compresión simple

Los efectos de la compresión simple son provocados por cargas axiales localizadas perfectamente en el centroide del elemento; en la ilustración 77 la figura (a) muestra el patrón de fisuración por compresión simple o pura, las fisuras estarán orientadas paralelas a la dirección de carga. Existirá una variación en los patrones de fisuración dados por compresión que dependerán de las condiciones de apoyo, esbeltez, restricciones laterales y excentricidades en la aplicación de cargas que generarán las condiciones adicionales que se muestran en la misma ilustración.



*Ilustración 77 Principales fallas por compresión.
Fuente: (Helene & Pereira, 2003)*

En la figura (b) se muestra el patrón de fisuración por compresión en donde existe un rozamiento dado a la limitación de la capacidad de los elementos estructurales para deformarse o desplazarse en dirección transversal con lo cual se genera una distorsión en el trazado de la fisura.

El patrón de fisuración de la figura (c) ocurrirá por la acción de cargas de compresión con algún tipo de excentricidad en conjunto con la acción de los efectos de esbeltez. En la figura (d) se muestra el patrón de fisuración para un elemento sometido a efectos de pandeo, allí se evidencian los efectos de las tracciones en la fibra extrema y la fisuración siguiendo un patrón como el mencionado en la tracción pura dado al comportamiento natural de un pandeo, allí

la fibra extrema estará sometida a tensión mientras que su opuesta estará sometida a compresión. Finalmente, en la figura (e) se muestra un patrón de fisuración muy fina, del orden de 0.05 mm a 0.15 mm paralela al eje principal del elemento en donde no existe coincidencia con la ubicación de la armadura, estas fisuras aparecen en un estado previo a la rotura cuando las cargas están del orden del 90% de la capacidad resistente de la columna (Helene & Pereira, 2003), esta será la falla descrita en la ilustración 78.



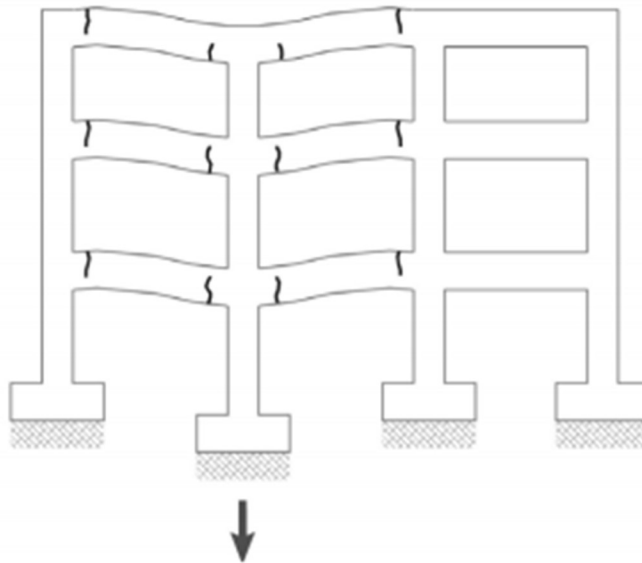
*Ilustración 78 Falla por compresión en columna de concreto reforzado
Fuente: (Arqzon, 2021)*

6.2.3.1.2 Deflexiones y movimientos imprevistos o excesivos

Las fallas por deflexiones y movimientos excesivos hacen referencia a acciones externas fortuitas que se aplican a la estructura y que generan condiciones de sobreesfuerzos en los elementos estructurales para las cuales no fueron provistas; estos efectos se clasifican en fallas por asentamientos del terreno, viento, sismo y explosiones.

6.2.3.1.2.1 Asentamientos del terreno

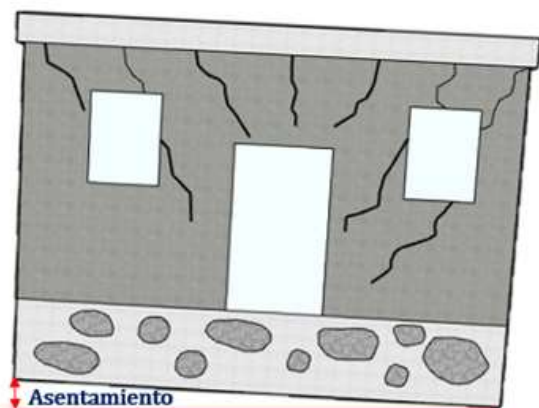
Los asentamientos diferenciales del terreno conforman una de las causas más comunes de falla en estructuras, esta situación provoca movimientos relativos los cuales conducen a un agrietamiento a causa del incremento y redistribución de cargas sobre los elementos. Dado que los asentamientos suelen ser desarrollados progresivamente en una ventana temporal amplia, es posible que los elementos estructurales logren realizar redistribuciones de las fuerzas generadas, por tanto, se tendrán fisuras mínimas de bajo impacto (impacto estético únicamente). Por otra parte, si la estructura no logra realizar una correcta redistribución de los esfuerzos se generarán patrones de fisuración como los mostrados en la ilustración 79.



*Ilustración 79 Fisuración esperada por asentamiento de columna central
Fuente: (AIS, 2011)*

La interacción dada entre la estructura y el suelo es un tema de especial interés entre los diseñadores estructurales del país en especial en estructuras de mediana altura como las edificaciones con sistemas industrializados. Es común encontrar fallas por asentamientos diferenciales en estructuras concebidas con sistemas de cimentación basados en placas o placa pilotes, esto se debe al poco rigor en la evaluación de las excentricidades entre el punto de aplicación de cargas equivalente de las cargas verticales y el centro geométrico de la placa

de cimentación; en este tipo de sistemas no es posible aceptar excentricidades por este concepto.



*Ilustración 80 Falla por asentamiento diferencial en estructura de un piso.
Fuente: (Daños en estructuras de concreto, 2021)*

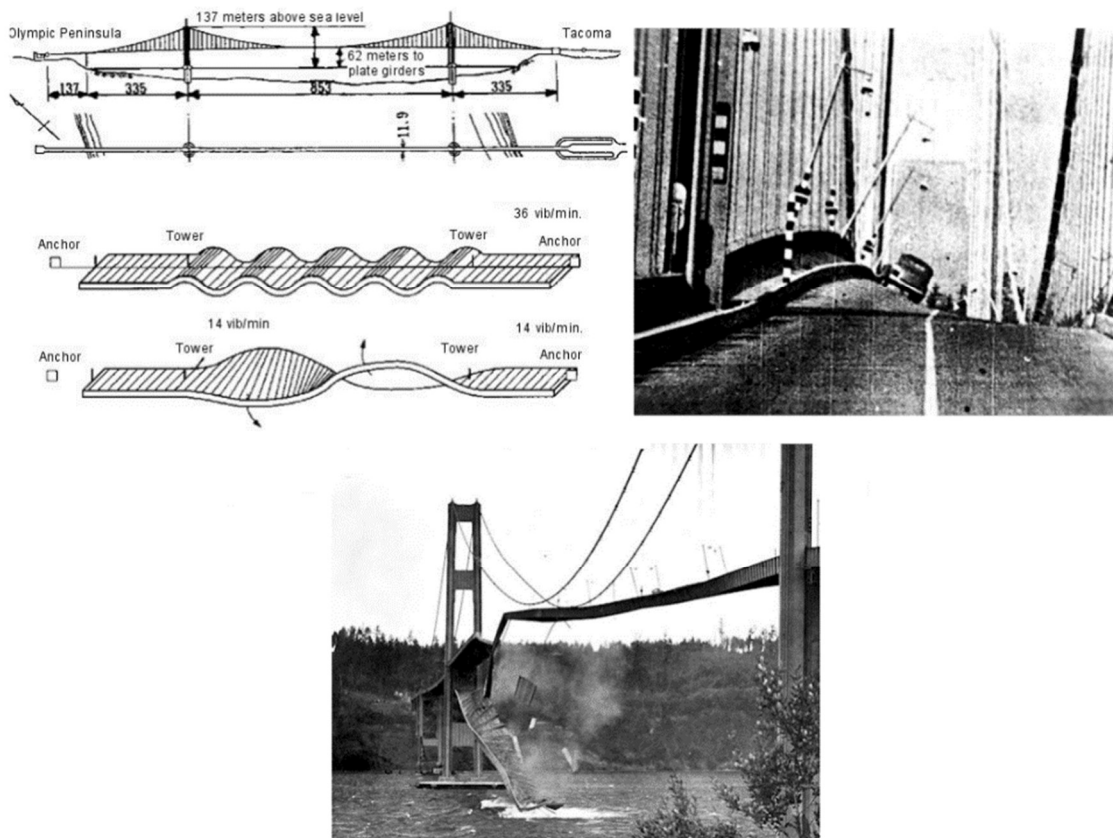
Otra de las posibles causas de este fenómeno es el estudio fallido del suelo en donde se funda la estructura (contemplar condiciones de relleno de suelo, existencia de pozos, niveles freáticos, deformaciones del suelo, erosiones, socavaciones, homogeneidad del suelo o suelos expansivos) o la alteración de este por posibles cambios debidos a construcciones vecinas o variaciones en las condiciones de humedad y de densidad de este.

Durante los procesos de construcción es posible que edificaciones vecinas resulten afectadas por el manejo inadecuado de la contención del terreno; por tanto, será importante contar con una evaluación rigurosa de las cargas contempladas para el diseño de la cimentación de manera que se eviten sobrecargas o excentricidades no previstas durante el diseño o afectaciones a edificaciones vecinas por procesos constructivos manejados de forma errada.

6.2.3.1.2.2 Viento

Las cargas producidas por efectos de viento pueden llegar a ser en ocasiones más críticas que las cargas producidas por otras fuerzas laterales como sismos, esto dado a que son fuerzas que se presentan con más frecuencia. Es importante realizar una correcta estimación de las

magnitudes de estas cargas, con lo cual, se requiere de metodologías propias que describan el comportamiento de los vientos esperados en cada región. Con la actual normativa colombiana NSR-10 se ha logrado realizar estimativos de velocidades de vientos para cada región; sin embargo, es importante anotar la necesidad de realizar un trabajo de diseño con la última actualización al decreto ya que particularmente en casos de evaluación de viento se cuenta con cambios importantes en la metodología que pueden conducir a errores de diseño.



*Ilustración 81 Colapso por viento del Tacoma Narrows Bridge
Fuente: (shippai.org, 2023)*

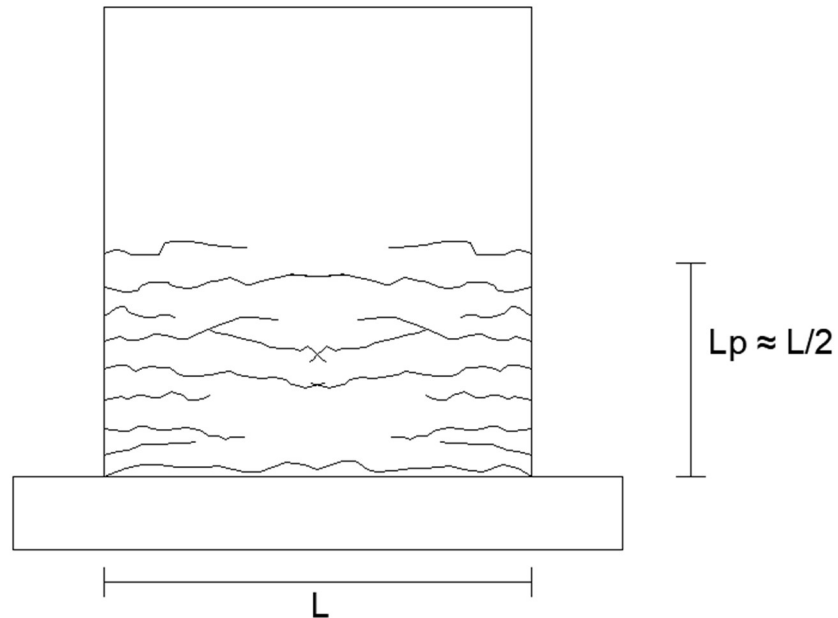
Las cargas laterales por viento no pueden ser tratadas de la misma forma que las cargas por sismo, esto dado a que el sismo será un movimiento en la base que se espera de manera fortuita en menor cantidad de repeticiones que las fuerzas de viento (es por esto por lo que se permite el empleo de coeficientes de disipación de energía de manera que se puedan

reducir las magnitudes de las cargas logrando diseños más económicos) a las cuales la estructura podría estar sometida permanentemente.

Será propio de cada estructura y responsabilidad del diseñador estructural el determinar y establecer el tipo de metodología necesaria para la evaluación de las solicitaciones por sismo (si es propio se deberán realizar análisis con túnel de viento o metodologías detalladas con elementos finitos). Es común observar dentro de los profesionales dedicados al diseño de edificaciones de concreto reforzado la omisión de este análisis para elementos estructurales y no estructurales con lo cual se constituye un foco principal de fallas. De la misma forma, será importante incluir mecanismos de control para los desplazamientos laterales que se puedan generar por este tipo de cargas y que, pese a no afectar directamente al sistema resistente de cargas laterales, podrán afectar elementos no estructurales o el confort de los ocupantes.

6.2.3.1.2.3 Sismo

Las fallas ocasionadas por efectos de sismo han sido el principal enfoque de la ingeniería colombiana en la última década; aquí se destaca especialmente el estudio del comportamiento de edificaciones basados en sistema industrializado (edificaciones de muros estructurales con espesores de muro mínimo de 8 cm hasta los 40 cm con el uso de mallas electrosoldadas y concretos acelerados); este tipo de edificaciones se presenta en el país como una solución económica en término de optimización de materiales y tiempos en la construcción, sin embargo, se tienen irregularidades de especial interés en términos de diseño estructural durante la etapa de concepción de estas edificaciones.



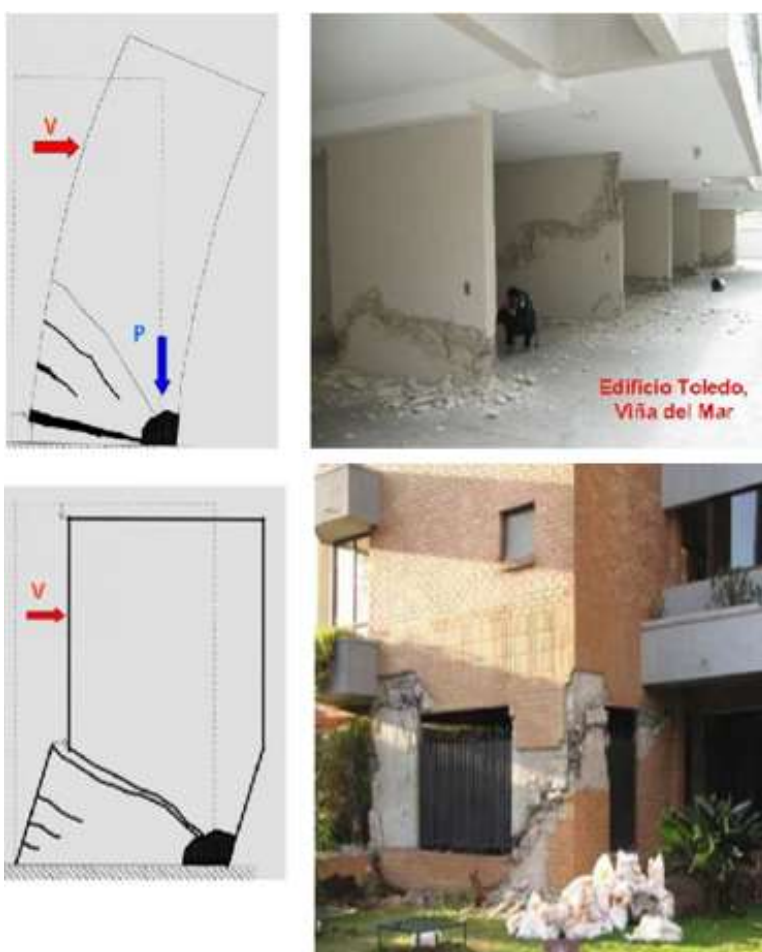
*Ilustración 82 Flexión dúctil en muro de concreto
Fuente: Elaboración propia*

Este sistema inicialmente se crea para edificaciones de baja altura (edificaciones de hasta 5 niveles con muros de entre 8 a 10 cm de espesor), sin embargo, con el auge de la construcción de viviendas de interés social se extrapola dicha metodología de construcción para edificaciones de media altura (edificaciones de entre 20 a 30 pisos de altura) representando un riesgo importante a la seguridad de sus ocupantes debido a que muchas de estas edificaciones carecen de un sistema de resistencia sísmica apropiado dado que los muros estructurales se encuentran reforzados con mallas de refuerzo producidas mediante procesos de trefilado lo cual conduce a la obtención de elementos de acero sin ductilidad.

Los coeficientes de disipación de energía establecidos para este tipo de estructuras toman como punto de partida el empleo de materiales dúctiles mediante los cuales se puedan generar zonas de articulaciones plásticas y por ende disipación mediante la plastificación; en el caso de edificaciones industrializadas, esta zona estará contendida cerca a la base del muro (debido a que el análisis será el equivalente a un elemento en voladizo y por ende su única zona de plastificación posible será su base, posterior a esto será un elemento inestable por la

articulación o rótula plástica generada) en una longitud crítica como se muestra en la ilustración 82.

La falla de estructuras durante eventos sísmicos constituye la principal temática de interés de estudio en edificaciones de concreto en Colombia, esto dado a la fatalidad de eventos previos ocurridos en el país como el sismo del Eje Cafetero ocurrido en 1999 en donde se estima un total de 1000 personas fallecidas (infobae, 2023).



*Ilustración 83 Fallas en muro de concreto durante sismo Chile 2010
Fuente: (Aguiar Falconi, 2015)*

En la ilustración 83 se muestran dos tipos de fallas de muros de concreto ocurridas en el sismo de Chile de 2010. En la primera figura se muestra el patrón de fisuración por flexión

por el desarrollo de articulación en la base del muro, esta falla será de tipo dúctil por lo que permitirá el desarrollo de fluencia del acero de refuerzo en una longitud de plastificación dada (siempre y cuando el refuerzo dispuesto tenga las facultades de entrar al rango inelástico). Por otra parte, en la siguiente figura se muestra un muro de concreto reforzado con una falla a corte, este patrón de falla es de carácter frágil con lo que se produce un efecto de cizallamiento del elemento (este tipo de fallas se debe evitar dado a que se presentan de manera súbita con lo cual será materia de riesgo de colapso inminente de la edificación tanto parcial como global).

6.2.3.1.2.4 Explosiones

Dentro de las cargas debidas a explosiones se pueden distinguir tres tipos generales los cuales caracterizarán su origen en explosiones física, químicas y nucleares. Estos comportamientos serán mejor llamados como detonaciones y se caracterizan por la generación de altos gradientes de presión y temperatura en las zonas expuestas durante relaciones de tiempo muy cortos (casi instantáneas), esto genera velocidades de reacción de la onda explosiva de entre 1500 y 9000 m/s (Pavia Bermudez, 2008).



*Ilustración 84 Explosión de ANFO y clorato de potasio en el club el Nogal, Bogotá año 2003
Fuente: (Anadolu, 2018)*

Este tipo de condiciones no suelen ser tenidas en cuenta durante el diseño y concepción de una estructura convencional dado a que son eventos no esperados durante su vida útil. Sin embargo, existe la posibilidad de que estas eventualidades sucedan en algunas estructuras; esto es de especial interés en edificaciones gubernamentales, edificaciones militares, cárceles, bancos, centrales nucleares entre otras estructuras de alto impacto.

Como mecanismo de prevención de colapso ante este tipo de eventualidades como primera medida se tiene el manejo de la ductilidad de las edificaciones; esto se consigue mediante el empleo de elementos provistos de acero dúctil en cantidades menores a la cuantía balanceada en conjunto con el provisionamiento de confinamientos adecuados; aquí es preciso destacar los lineamientos de detallado de las estructuras con capacidad de disipación de energía especial dados por la norma NSR-10, estos permiten a la estructura incursionar dentro del rango inelástico.

Una de las metodologías para el estudio de colapsos de edificaciones por explosiones implica el análisis de la ruta de falla mediante la generación de articulaciones plásticas en los elementos; este análisis conduce a la conclusión de la efectividad de la redundancia para el control del colapso total de una edificación ante una explosión. La redundancia en una estructura y ante el análisis por líneas de fluencia de una edificación implica la posibilidad de redistribuir cargas hacia otros elementos luego de la pérdida de un miembro estructural, así como la posibilidad de generar una mayor cantidad de puntos de articulación plástica y por ende puntos de disipación de energía gracias a las condiciones hiperestáticas de los elementos.

Existen casos de estructuras que han sido diseñadas para condiciones más extremas que las producidas por una explosión, sin embargo, al verse sometidas a estas acciones resultan en colapso debido a que son cargas de gran magnitud que se aplican a los elementos en tiempos muy cortos; aquellas estructuras que logran soportar este gran incremento en sus cargas pueden sufrir colapsos por los efectos secundarios que implican estas sollicitaciones como las

altas temperaturas por incendios o la penetración de sustancias agresivas a la armadura de refuerzo reduciendo parcial o totalmente la capacidad del elemento.

6.2.3.1.3 Fracturas y aplastamientos

Este tipo de fisuras pueden ser producidas por el apoyo simple entre apoyos, los aplastamientos locales de los miembros, por fracturas y descascaramiento producidos por impactos y desintegraciones dadas por trituración del concreto (Jiménez Alvarado & Merino Requenes , 2021).

Las fisuras en los apoyos simples son producidas por el contacto entre materiales muy rígidos; es aquí donde destaca la importancia de generar zonas de transición entre los apoyos (uso de materiales más flexibles como neoprenos como se muestra en la ilustración 85). Esta falla típicamente ocurre por esfuerzos generados durante los movimientos propios del elemento producidos con los cambios de temperatura; esto conduce a fallas en los extremos del elemento de apoyo. Otra alternativa de fisuración de apoyo es la fisuración en el elemento que se encuentra apoyando; en este caso se presentará un patrón de fisuración en el extremo o recubrimiento de dicho elemento dado principalmente al apoyo concentrado del elemento en su extremo.



*Ilustración 85 Apoyo de viga mediante transición de colchón de neopreno
Fuente: (Global Rubber Corporation, 2023)*

En los apoyos de los elementos existe una gran concentración de esfuerzos, por tanto, debe proveerse del refuerzo adecuado al interior de estos; en los elementos simplemente apoyados se tiene zonas de recubrimiento que no podrán contener acero de refuerzo y que por ende serán zonas focales para la presencia de fisuras incluso por cargas de peso propio.

Por otra parte, en las zonas de apoyo dado los altos esfuerzos concentrados es posible tener aplastamientos locales; esta situación típicamente ocurre en las zonas de anclaje de elementos presforzados en donde es necesaria la presencia de refuerzos adicionales (típicamente en forma de espiral) que permitan la resistencia adecuada de la carga concentrada del presfuerzo de los torones de acero como se muestra en la ilustración 86.



Ilustración 86 Fisuras por aplastamiento local en zona de anclaje de presfuerzo
Fuente: (Construblog, 2023)

También es posible encontrar fracturas por impacto, este tipo de fallas son típicas de estructuras industriales en donde se tienen cargas de equipos móviles y de magnitud importante en donde se deberán tener condiciones de diseño apropiadas para estas.

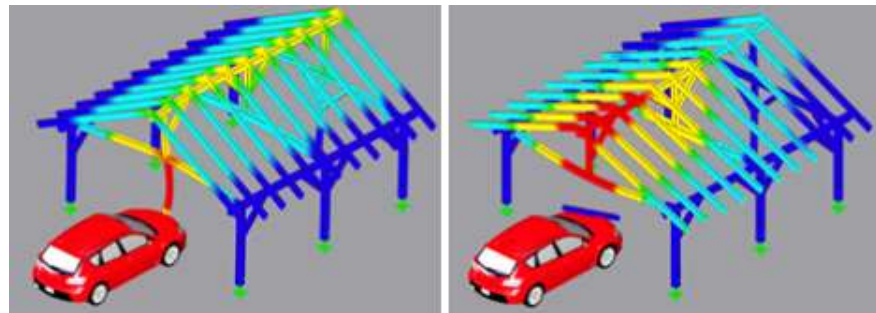


Ilustración 87 Análisis mediante software de remoción de miembro estructural por impacto vehicular.
Fuente: (Dubal, 2019).

Otro escenario de este tipo de cargas se trata de las colisiones; un ejemplo típico de este tipo de solicitaciones es la colisión con

vehículos como se muestra en la ilustración 87. Durante este tipo de eventos existirá la posibilidad de remoción de miembros generando solicitaciones adicionales producto de la redistribución de las cargas sobre los elementos aledaños, de igual forma al caso de cargas presentadas durante detonaciones o explosiones se acentúa el papel de la redundancia estructural como medida principal de mitigación de probabilidad de colapso de la estructura.

Finalmente, es posible encontrar fallas por desintegración ocasionada por trituración en estructuras de concreto sometidas a esfuerzos grandes de compresión concentrados sobre la superficie como se muestra en la ilustración 88, esta situación también suele presentarse en las zonas de anclaje de presfuerzo en elementos de concreto presforzado.



*Ilustración 88 Desintegración del concreto en ensayo de cilindro a compresión
Fuente: (Reyes Estrada, 2013)*

6.2.3.2 Vibraciones excesivas

Las vibraciones se encuentran asociadas a desplazamientos de carácter armónico que al ser excesivas producen el deterioro de la masa de concreto, por ende, al generar fisuras estas estarán permanentemente en estado activo con lo cual se generará un deterioro continuo del elemento induciendo la aparición de más fisuras (Lozano Guevara & Marcas Arrieta, 2022).

Las vibraciones que afectan una estructura pueden tener diversas fuentes que pueden ir desde la afectación por tráfico tanto peatonal como vehicular de vías aledañas, hasta el uso de equipos que emitan vibraciones hasta la construcción de obras civiles vecinas. Existen casos de especial interés cuando las frecuencias de vibración coinciden con las frecuencias naturales de la estructura, con esto, se generarán efectos que amplían la magnitud de los movimientos oscilatorios, este fenómeno se conoce como resonancia y ha sido causa de especial interés de estudios de ingeniería en especial cuando la resonancia ocurre con las vibraciones transmitidas por el suelo; será de especial importancia evitar la resonancia con el suelo dado el potencial de colapso general de la estructura.

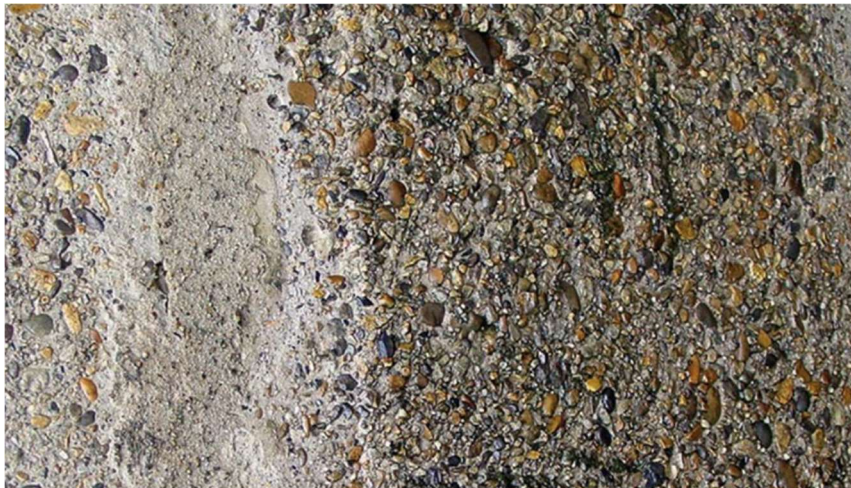
6.2.3.3 Abrasión

La abrasión se trata de un ataque que se da sobre la superficie de concreto por medio del desgaste del área expuesta ante el fenómeno y avanza conforme transcurre el tiempo incrementando la profundidad afectada como se muestra en la ilustración 89; dicho desgaste puede ocurrir a causa de una abrasión por fricción o por erosión.



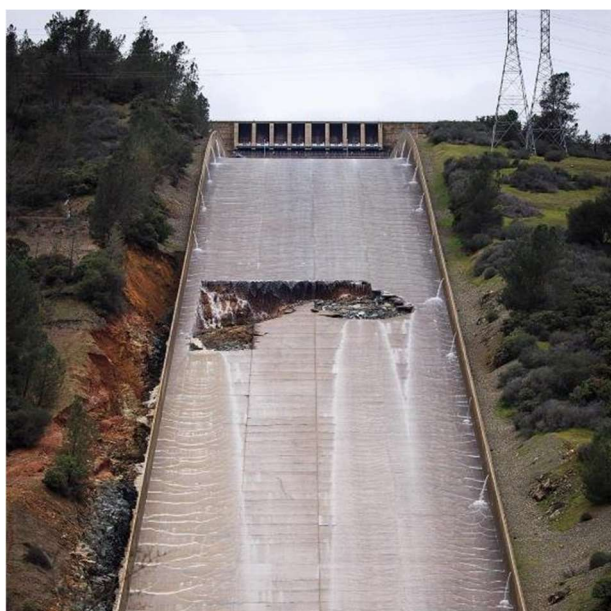
*Ilustración 89 Desgaste por abrasión de superficie de concreto.
Fuente: (Arango Mejía, 2013)*

En cuanto a los desgastes por fricción se tendrá un daño a causa de tráfico peatonal o vehicular ligero o pesado el cual inducirá raspaduras o percusiones sobre la superficie expuesta de concreto como el mostrado en la ilustración 90. Ante este tipo de condiciones será clave el empleo de concreto con agregados grandes y duros ya que su desgaste será menor y por tanto su resistencia y durabilidad será mayor.



*Ilustración 90 Desgaste por abrasión en canal de concreto
Fuente: (Futura America, 2022)*

Adicionalmente podrá existir un desgaste de la superficie de concreto por erosión dado al arrastre de materiales erosivos como rocas o material fino como arenas a velocidades importantes típicos de estructuras hidráulicas (por ejemplo, canales, túneles o pilas de puentes), es de especial interés ya que el mantenimiento de este tipo de estructuras suele ser complejo, por tanto, la detección de estas afectaciones suele ser tardía. Es necesario proveer a la estructura de mecanismos de protección ante estas eventualidades mediante el uso de barreras de viento o revestimientos en roca para reducir el impacto de la erosión y la velocidad de arrastre de los materiales erosivos.



*Ilustración 91 Cavitación de estructura en concreto.
Fuente: (Potem Engineering, 2017)*

Por otra parte, podrá existir un segundo tipo de erosión dada por la generación de presiones negativas sobre una superficie conocida como cavitación; este fenómeno genera huecos y cavidades en el concreto. Las velocidades altas en estructuras hidráulicas tales como presas, canales o vertederos conducen a la separación del agua de la superficie creando zonas de presión baja (succiones)

consiguiendo así la formación de burbujas de vapor, este vapor se condensa produciendo un estallido brusco de las burbujas y formando fallas como la mostrada en la ilustración 91.



*Ilustración 92 Desgaste en la pasta de cemento por cavitación.
Fuente: (Arango Mejía, 2013)*

Se deberá proporcionar un adecuado manejo de este tipo de fallas dada a la importancia de las obras civiles afectadas; la resistencia de estas estructuras ante la cavitación es principalmente la proporcionada por la pasta de cemento como se muestra en la ilustración 92, por ende, será necesario emplear relaciones agua material cementante bajas.

6.2.4 Biológicas

Este tipo de ataque se encuentran relacionados con el desarrollo de organismos que se encuentran en contacto con el concreto. Para la supervivencia de los organismos sobre el elemento de concreto se deberá contar con un hábitat favorable para su crecimiento y reproducción mediante el desarrollo de colonias; esto es posible gracias a la presencia de nutrientes que se podrán obtener de tres tipos de fuentes: el medio ambiente (CO_2 , hidrocarburos, aceites lubricantes o gasolina), sustancias impregnadas en el concreto (materia orgánica o descomposición de un organismo) y

la propia masa de concreto (por sus componentes de cal y minerales de la mezcla de concreto).

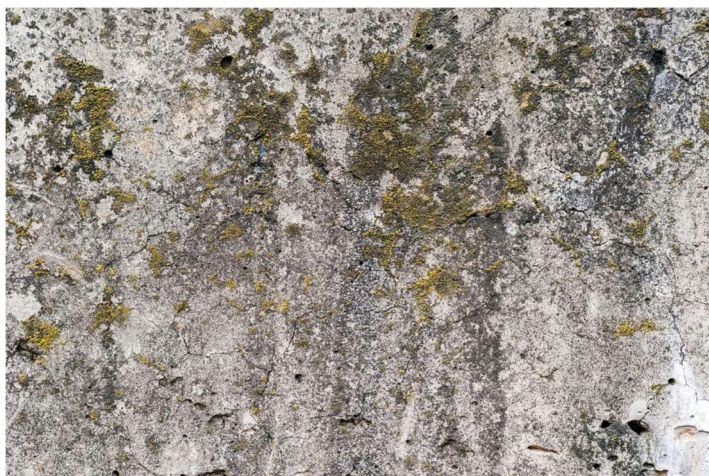


Ilustración 93 Crecimiento de organismos en superficie de concreto
Fuente: (lunnaart15, 2022)

Los organismos representados por macroorganismos y microorganismos de origen vegetal o animal pueden producir degradaciones de cuatro tipos: biofísicos (por ejemplo cuando se promueve la humedad y el daño por ciclos de hielo y deshielo dada la presencia de vegetación), biomecánicos (por ejemplo cuando se tienen sobrecargas sobre un elemento por el desarrollo de vegetación), bioquímicos (por ejemplo cuando se producen sustancias como CO_2 que promueven la contaminación y deterioro por acciones ácidas del concreto) y biológicos (mediante la asimilación de compuestos del material o la excreción de metabolitos ácidos que causan la disolución de la pasta de cemento) (Popayán Apolinario, 2020).

Con anterioridad se han tratado las causas de falla específicas por acciones químicas, físicas y mecánicas, su diferenciación con sus variantes biológicas será la proveniente de este tipo de efectos por la acción pura de algún organismo. Sin embargo, las acciones biológicas serán un parámetro adicional para tener en cuenta dentro del deterioro del concreto; estas podrán ser distinguidas en tres tipos principales: bio-deterioro, bio-degradación de hidrocarburos y bio-corrosión de los metales.

6.2.4.1 Bio-deterioro del concreto

Es el mecanismo por el cual organismos bióticos deterioran el concreto afectando la apariencia o integridad a causa de las actividades vitales de los organismos, estos podrán ser causados tanto por macroorganismos (animales, plantas y musgos) como por microorganismos (bacterias, cianobacterias, líquenes, algas y hongos). El deterioro sobre el concreto podrá darse por acción de mecanismos físicos o químicos según sea el tipo de organismo que interactúe con el material (Allsopp, Seal, & Gaylarde, 2004). En la tabla 7 se mencionan de manera general las afectaciones que sufre el concreto por la interacción de determinado organismo.

Tabla 7: Alteraciones producidas por microorganismos sobre los materiales de edificaciones.

| Microrganismo | Alteración |
|------------------------|--|
| bacteria autótrofa | Costra negra, capa fina negro-marrón, exfoliación, empolvado |
| bacterias heterótrofas | Costra negra, capa fina negro-marrón, exfoliación, cambio de color |
| cianobacterias | Capa fina y láminas de varios colores y consistencia |
| hongos | Manchas y parches de color, exfoliación, picaduras |
| Algas | Capa fina y láminas de varios colores y consistencia |
| líquenes | Costras, parches, picaduras |
| Musgos y hepáticas | Decoloración, parches de color gris verdoso |
| Plantas superiores | Grietas, colapso, desprendimiento de material |

Fuente: (Gaylarde, Ribas Silva, & Warscheid, 2003)

En términos generales, el daño biológico predominante se origina por el deterioro estético causado por la generación de pigmentos orgánicos y la

formación de biopelículas coloreadas que cubren la superficie. Luego, se suma el deterioro físico causado por las fuerzas mecánicas generadas por el micelio y las raíces que se introducen en los poros, provocando la fractura del material. Por último, se produce el deterioro químico como consecuencia directa de los productos metabólicos excretados (Urrego García, 2021). En la tabla 8 se presenta el tipo de interacción (física, química o mecánica) que presenta un microorganismo y su efecto sobre la masa de concreto reforzado.

Tabla 8: Efectos de los microorganismos en el concreto

| Actividad | Efecto | Microorganismo |
|-----------------------------------|---|---|
| Presencia física | Decoloración y retención de agua | Algas, bacterias, hongos, líquenes y protozoos |
| Presencia física | Incremento en el crecimiento de organismos heterótrofos | Algas y bacterias fotosintéticas |
| Encimas hidrolíticas | Rompimiento de componentes | Hongos y bacterias |
| Encimas hidrolíticas | Degradación de aditivos | Hongos filamentosos |
| Crecimiento filamentosos | Degradación del material | Hongos, Actinomycetes, cianobacterias y algas |
| Producción de ácidos | Corrosión | Hongos y bacterias |
| Movilización de iones | Debilitamiento y disolución | Algas, bacterias, hongos, líquenes y protozoos |
| Quelación de iones constituyentes | Debilitamiento y disolución | Microorganismos productores de ácidos orgánicos |

Fuente: (Quintero Martínez, 2010)

6.2.4.2 Bio-degradación de hidrocarburos

Este mecanismo genera sustancias que producen ataques químicos sobre el concreto y es típico de microorganismos que se alimenta de hidrocarburos; al generarse la degradación de estos elementos se producirán con frecuencia sustancias agresivas como dióxido de carbono, metano y sales inorgánicas que entrarán en contacto con el concreto reforzado produciendo los efectos mencionados más atrás por cuenta de la interacción química con el concreto y el acero de refuerzo.

6.2.4.3 Bio-corrosión de los metales

Este tipo de afectación biológica se presenta cuando existen fenómenos de naturaleza electroquímica relacionados con microorganismos los cuales producen un flujo de electrones y por tanto un proceso de oxidación.



*Ilustración 94 Ataque biológico en estructura de concreto
Fuente: (Linex, 2018)*

El ion sulfato proveniente de procesos biológicos como el ciclo del azufre en donde los microorganismos realizan una serie de transformaciones químicas en compuestos de azufre, incluyendo procesos de oxidación y reducción que

a su vez pueden generar sulfatos, es el principal agente de interés en la afectación del concreto reforzado dado a que su interacción produce un fenómeno conocido como bio-corrosión del acero; este fenómeno tendrá origen en una fuente biológica pero su desarrollo será igual al mencionado en la página 131. Un ejemplo de estos microorganismos son las bacterias sulfato-reductoras quienes utilizan el sulfato como aceptor de electrones durante su metabolismo reduciendo el sulfato a sulfuro de hidrógeno y liberando iones sulfato.

Capítulo VII

Técnicas de evaluación de estructuras

Las técnicas de evaluación de estructuras permiten identificar y cuantificar el grado de afectación de una estructura con el fin de elaborar diagnósticos a partir de un proceso investigativo y determinar la magnitud de la intervención en caso de ser requerida, para esto es clave tener presente la finalidad de intervención, es decir, si es necesaria una reparación, una repotenciación o rehabilitación. El ACI 364.1R-19 (2019) propone la secuencia mostrada en la ilustración 95 en donde se presenta un diagrama de flujo para orientar la metodología de evaluación de estructuras en concreto.

Los objetivos de realizar una evaluación de una estructura serán conocer la condición actual de los elementos estructurales, evaluar extensiones de deterioros producidos por causas físicas, mecánicas, químicas o biológicas, verificar la integridad de los elementos, establecer la capacidad de la estructura para soportar cargas (en caso de que se requiera una evaluación de la estructura para soportar cargas mayores, por ejemplo un cambio de uso o modificación de elementos estructurales), determinación de la vida de servicio remanente de una estructura o evaluar el nivel de seguridad de la estructura para determinar intervenciones.

7.1 Metodología para la evaluación de estructuras

La metodología para la evaluación de estructuras propuesta por ACI 364 se basa en la recopilación de información definiendo una segmentación en dos fases; fase de evaluación preliminar y fase de evaluación detallada, esto con el fin de establecer un alcance claro para el proceso de evaluación de una estructura y determinar de esta manera el nivel de daños, deterioros o degradación de esta.

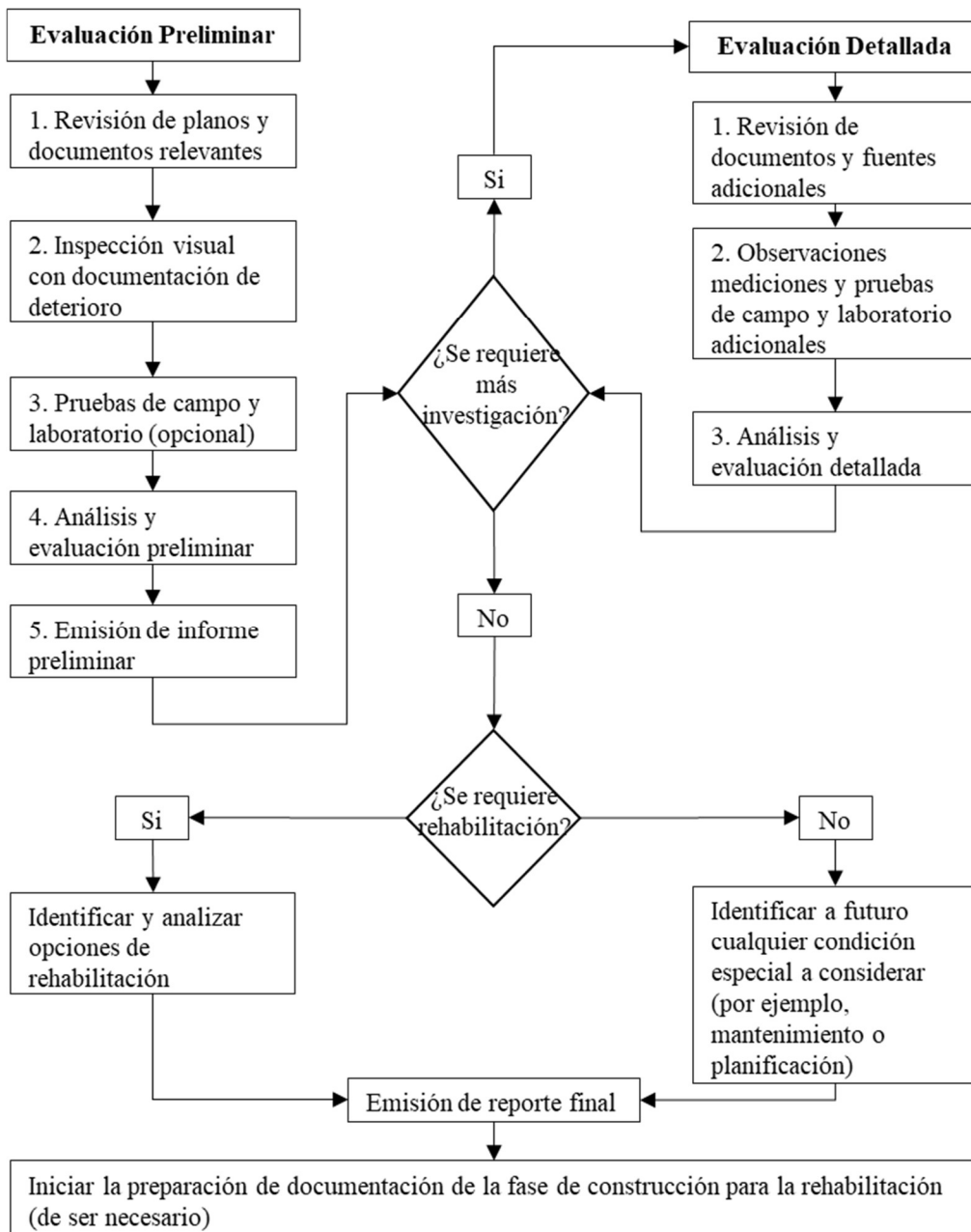


Ilustración 95 Metodología para la evaluación de estructuras
 Fuente: Traducido de (ACI 364.1R-19, 2019)

Se establece entonces un proceso de investigación en donde se realiza una recopilación de datos de todo tipo, estos podrán ser datos de campo, datos históricos e inclusive testimonios de personas que permitan determinar estados previos y actuales de la edificación.

Esta metodología parte inicialmente por la evaluación preliminar en donde se espera la realización de los cinco primeros pasos de evaluación:

1. **Revisión de planos y documentos relevantes:** Se realizará la recopilación de toda la documentación disponible de la estructura, esto contempla memorias de cálculo, fotografías de procesos constructivos, planos de diseños, informes de obra entre otros.
2. **Inspección visual con documentación de deterioro:** Se realizará visita a campo recopilando toda la evidencia posible del estado actual de la estructura, para esto es importante la toma de evidencia mediante notas de deterioros y observaciones claves acompañadas de fotografías o videos; de la misma forma, es importante realizar este tipo de visitas con personal capacitado empleando todas las medidas de seguridad.
3. **Pruebas de campo y laboratorio:** Se realizarán las pruebas requeridas dependiendo de las fallencias observadas con el fin de determinar y cuantificar el estado actual de la estructura; será necesario agotar en primera instancia las intervenciones menos invasivas para la estructura como las técnicas no destructivas.
4. **Análisis y evaluación preliminar:** Tomando las evidencias anteriores se realizará un trabajo de análisis y evaluación con el fin de determinar el grado de afectación de la estructura o si es requerido un análisis más profundo dada a la incertidumbre.
5. **Emisión de informe preliminar:** Mediante el trabajo realizado en los pasos anteriores se emitirá un informe en donde se presenten los resultados de las fallas obtenidas en la estructura en conjunto con las recomendaciones y conclusiones del trabajo preliminar.

Completada esta inspección con la emisión del informe preliminar se deberá establecer la necesidad particular de ampliar la información mediante una evaluación detallada; en caso de requerirla se seguirán los siguientes tres pasos:

1. **Revisión de documentos y fuentes adicionales:** Esta información adicional puede ser requerida para la estructura como un todo o particularmente para un elemento. La necesidad de recopilación de información adicional puede partir del principio del cambio de estrategia de obtención de la información. Es importante, previo a la recopilación de información adicional, realizar una evaluación detenida de los objetivos a cumplir con el procedimiento de investigación, de esta manera se garantiza la eficiencia y direccionalidad en cuanto alcance del trabajo de forma que se eviten los sobrecostos.
2. **Observaciones, mediciones y pruebas de campo y laboratorio adicionales:** Llegado a este punto será clave realizar ensayos que no se limiten únicamente a evidencias de campo, por tanto, se deberá incluir una evaluación cuantificable mediante pruebas de laboratorio. Estas pruebas implicaran entonces el empleo de técnicas semi destructivas en la recopilación y caracterización de las propiedades los materiales y los componentes de la estructura. Es destacable el costo económico de realizar este tipo de procedimientos, por lo tanto, se deberá ser prudente en el momento de planeación y formulación ya que existirán métodos de ensayo que proporcionen información adicional para la determinación de los parámetros de interés que no será requeridos estrictamente aumentando el costo económico de las labores de investigación.
3. **Análisis y evaluación detallada:** Será el proceso final en el cual se juzgará el estado de la estructura basado en el adecuado desempeño para prestar sus funciones. Para esto será necesario evaluar con un criterio justo a la estructura; no será equivalente la comparación de una estructura antigua con los requisitos de una estructura nueva. Una buena guía de consulta según la normativa colombiana es el capítulo A.10 del título A y el capítulo C.19 del título C de la norma NSR-10 (2010); sin embargo, es recomendable realizar estos procedimientos con guías más actualizadas como ACI 562-21 (2021) en donde se establecen coeficientes de reducción de resistencia y combinaciones de diseño propias para la revisión y diseño de estructuras existentes.

Con esta información adicional será prudente establecer la necesidad de intervención de la estructura, por tanto, de ser requerida una intervención se deberán identificar las alternativas con las que se cuenta; en caso contrario, se deberán identificar posibles afectaciones futuras a las cuales se pueda ver sometida la estructura y generar estrategias de prevención.

Como etapa final en cualquiera de los casos presentados anteriormente se realizará la emisión de un reporte final indicando las conclusiones del proceso de evaluación de la estructura en conjunto con las recomendaciones pertinentes. En este tipo de documentos es clave contar con una terminología adecuada y profesional ya que no puede existir cabida a malentendidos entre las partes involucradas en especial cuando se emplean estos conceptos como soportes para procesos de litigios legales.

Durante los procesos de evaluación de la estructura será clave contar con un equipo adecuado que involucre personal con experiencia en conjunto con las herramientas necesarias para la toma de toda la información, estas herramientas típicamente están constituidas por:

- Equipos de toma de material multimedia como cámaras fotográficas o de video.
- Equipos de inspección visual en campo como binoculares, lupas y fisurómetros
- Equipos de medición como cintas métricas y niveles
- Equipos de ayuda visual como lámparas y linternas
- Equipos de toma de datos como tabuladores y organizadores de información mediante formatos de toma de datos en campo
- Elementos de apoyo de registro como cintas de marcaje, colores o tintes distintivos para resaltar puntos de interés de la estructura
- Equipos básicos de seguridad como gafas protectoras, calzado, casco y prendas adecuadas para la protección de extremidades.
- Equipos de apoyo adicionales como escaleras, intercomunicadores, martillos, cinceles entre otros.

Es posible que se requiera el empleo de diferentes técnicas con cierto grado de invasión sobre la estructura para determinar la afectación de algún parámetro específico de la estructura; seguidamente se presenta una guía general de los métodos de ensayo más representativos sobre concreto y acero de refuerzo para la evaluación de sus propiedades tanto no destructivas como semi destructivas tomado y traducido del ACI 364.1R-19 quien a su vez se encuentra basado en el ACI 228.2R (2013) y el ASCE/SEI 11 (2000).

Tabla 9: Métodos de ensayo para determinar condiciones y propiedades del concreto y acero de refuerzo

| Propiedad/Condición | Métodos posibles de ensayo | | Comentario |
|---|--|--|---|
| | Principal | Secundario | |
| 7.2 Técnicas de evaluación sobre el concreto | | | |
| Resistencia a la compresión | * Ensayo de núcleos (ASTM C42/ C42M; ASTM C39/C39M; ACI 214R) | Resistencia a la penetración (ASTM C803 / C803M) ** Resistencia a la extracción del concreto endurecido (ASTM C900) | * Resistencia del concreto en el sitio ** Comparar la fuerza en diferentes lugares por efecto de perforación en prueba de extracción. |
| Resistencia a la compresión relativa | * Número de rebote en concreto endurecido (ASTM C805/C805M) ** Velocidad de pulso ultrasónico (UPV) (ASTM C597) | - | * Número de rebote influenciado por las propiedades casi-superficiales ** Proporciona un resultado promedio mediante el espesor del elemento |
| Resistencia a la tracción | * Resistencia a la tracción por división de probetas cilíndricas de concreto | - | * Determinar la resistencia a la tracción aproximada del concreto |

| | | | |
|--------------------------------|---|--|--|
| | (ASTM C496 / C496M) | | |
| Resistencia a la flexión | Muestreo y ensayo de vigas aserradas (ASTMC42 / C42M) | Prueba de ruptura (Carino and Malhotra 2004) | Limitaciones planteadas por el tamaño de los agregados y su homogeneidad. |
| Densidad | Gravedad específica de las muestras (ASTM C642) | - | Técnica especial que requiere curva de calibración |
| Contenido de humedad | Medidores de humedad (ASTM D6938; ASTM D4263; ASTM F1869; ASTM F2170; ASTM F2420; ASTM F2659) | - | - |
| Módulo estático de elasticidad | Prueba de compresión de núcleos (ASTM C469 / C469M) | - | - |
| Módulo dinámico de elasticidad | Prueba de frecuencia resonante de especímenes aserrados (ASTM C215) | Velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597) Análisis espectral de ondas superficiales (SASW) | Requiere conocimientos de densidad y relación de Poisson (excepto ASTM C215) Los resultados de módulo dinámico suelen ser mayores que el módulo elástico estático |

| | | | |
|---|---|--|---|
| Contracción/Expansión | Cambio de longitud de probetas taladradas o aserradas (ASTM C157/C157M; ASTM C341/C341M) | - | Medida del cambio de longitud residual |
| Resistencia a la penetración de cloruros | * Coeficiente de difusión de cloruro en materiales cementicios (ASTM C1556) | ** Indicador eléctrico de la capacidad de resistencia a la penetración del ion cloruro (ASTM C1202; AASHTO T259) | * Establecer la susceptibilidad relativa del concreto a la intrusión de iones de cloruro ** Determinar la eficacia de los productos químicos selladores, membranas y superposiciones |
| Contenido de aire Contenido de cemento y grado de hidratación Características del agregado (reactividad álcali-agregado; susceptibilidad a la congelación y descongelación) Características y condición de la microestructura de la pasta de cemento | Examen petrográfico de muestras de concreto extraídas de la estructura (ASTM C856 y C457 / C457M) Contenido de cemento | - | Ayudar en la determinación de la naturaleza y grado de daño. Determinación de la calidad del concreto en estado original y actual. |
| Reactividad álcali-sílice (ASR) | Examen petrográfico de muestras de concreto extraídas de la estructura (ASTM C856 y C457 / C457M) | Prueba rápida de Cornell / SHRP (SHRP C-315) | Establecer si se observa deterioro en campo producto de la reactividad álcali-sílice |

| | | | |
|---------------------|---|--|---|
| Carbonatación pH | Fenolftaleína (indicador cualitativo) Medidor de pH | Examen petrográfico Indicadores de pH (ejemplo: papel tornasol) | Se evalúa el valor de protección contra la corrosión de concreto mediante la medición de la profundidad del frente de carbonatación y la susceptibilidad a la corrosión del acero de refuerzo. |
| Daño por fuego | Examen petrográfico de núcleos (ASTM C856) Ensayos de resistencia a la compresión (ASTM C39 / C39M) Resistencia a la tracción por división de probetas cilíndricas de concreto (ASTM C496 / C496M) * Número de rebote (ASTM C805 / C805M) | SASW UPV Impacto-eco Respuesta de impulso | * Permite la demarcación de la superficie dañada |

| | | | |
|--------------------------------------|--|--|---|
| Daños por ciclos de hielo y deshielo | Examen petrográfico de núcleos (ASTM C856) Pruebas de resistencia a la compresión (ASTM C39 / C39M) * Resistencia a la tracción por división de probetas cilíndricas de concreto (ASTM C496 / C496M) | SASW UPV Impacto-eco Respuesta de impulso | La congelación y descongelación pueden causar agrietamiento en el concreto * La resistencia es útil para estimar la resistencia a la tensión del concreto |
| Contenido de iones de cloruro | Solubilidad en ácido (ASTM C1152 / C1152M) Solubilidad en agua (ASTM C1218 / C1218M) | Sondeo específico de iones (SHRP S-328) | El contacto del acero de refuerzo con cloruros propicia la formación de corrosión |
| Permeabilidad al aire | Método de flujo de aire de superficie SHRP Técnica Figg (SHRP S-329) | - | Mide el índice de permeabilidad en el lugar del concreto en la superficie cercana 15 mm. Los resultados varían dependiendo del contenido de humedad del concreto. |
| Resistencia eléctrica del concreto | * Resistencia al flujo eléctrico usando un medidor de resistencia de cuatro sondas | ** Ensayo de resistencia superficial SHRP (SHRP S-327) | * Útil para evaluar la eficacia de las adiciones y componentes del cemento ** Útil para |

| | | | |
|--|---|--|---|
| | | | evaluar la eficacia de selladores |
| Vacíos internos Delaminaciones | Impacto acústico (ASTM D4580 / D4580M) Impulso de respuesta eco-impacto Termografía infrarroja UPV Radar | Radiografía gamma | El éxito depende del procedimiento de ensayo, equipos y personal, así como de las geometrías vacías de la sección |
| 7.3 Técnicas de evaluación sobre el acero de refuerzo | | | |
| Localización del refuerzo | Exposición de refuerzo mediante regatas Pachómetro Radar de penetración terrestre (GPR (ASTM D4748, D6432)) | Rayos X Rayos γ Radiografía | Localización y distribución de acero Recubrimientos del concreto Estimación del tamaño de las barras |
| Reducción del área de la sección transversal del refuerzo | Exposición y medida del diámetro de refuerzo Usar calibrador o medidor de espesor ultrasónico (requiere contacto directo con el acero) | Sondeo intrusivo Radiografía | Observar y medir la reducción del acero Observar la corrosión de los componentes de postensado incrustados Verificar la ubicación y el alcance del deterioro Proporcionar más certeza en los cálculos de |

| | | | |
|---|--|---------------------------|---|
| | | | capacidad estructural |
| Potencial de corrosión | Potencial de media celda (ASTM C876) | - | Identificación y mapeo de la corrosión del refuerzo activo |
| Tasa de corrosión | Polarización lineal (SHRP S-324 y S-330) | Impedancia electroquímica | Tasa de corrosión del acero embebido Tasa influenciada por las condiciones ambientales |
| Ensayo de tracción | Pruebas de tensión de materiales metálicos (ASTM A370 y ASTM E8 / E8M) | - | Prueba de tensión de muestras extraídas |
| Análisis químico | Ensayos de muestra en laboratorio (ASTM A751) | - | Necesario para determinar la soldabilidad o para confirmar el grado de la barra |
| Espesor del recubrimiento protector del acero | Espesor de recubrimiento restante en superficies expuestas (ASTM E376; ASTM D7091; ASTM G14; ASTM G20) | - | Requiere equipo de prueba calibrado |

Fuente: traducido y adaptado de (ACI 364.1R-19, 2019)

Las diferentes técnicas existentes para la evaluación de las propiedades del concreto pueden dividirse en tres tipos dependiendo del grado de afectación que implican sobre la estructura, estas serán; técnicas destructivas, no destructivas y semi destructivas. Seguidamente se brinda un panorama general de las técnicas más comunes en el medio colombiano.

7.4 Técnicas no destructivas

Se trata de pruebas sobre el concreto endurecido que no causan ningún tipo de daño sobre la estructura, sin embargo, se caracterizan por proveer un alto grado de incertidumbre sobre los resultados; algunas de las técnicas más comunes en el medio colombiano son:

- Inspección visual – fotografías
- Mediciones – monitoreo de fisuras
- Esclerómetro o martillo de rebote
- Velocidad de transmisión de pulso de ultrasonido
- Localización de acero de refuerzo – Ferroscan o Pachómetro

7.5 Técnicas semi destructivas

Este tipo de técnicas comprometen la integridad estructural y estética de los elementos en un grado mínimo, el costo económico de su ejecución es mayor al de las técnicas no destructivas, sin embargo, su precisión en los resultados es mucho mayor; las técnicas semi destructivas más destacadas en el medio colombiano son:

- Pistola de Windsor
- Examen petrográfico de concreto endurecido
- Extracción de probetas testigo (núcleos de concreto)
- Extracción de barras de acero
- Verificación de refuerzo mediante regatas
- Determinación de la humedad y densidad del concreto
- Determinación de la adherencia
- Determinación de la carbonatación
- Determinación de corrosión
- Determinación de la permeabilidad

7.6 Técnicas destructivas

Finalmente, las técnicas destructivas se presentan como la última alternativa de evaluación para una estructura dado al grado de compromiso que pueden llegar a tener sobre los elementos estructurales por su potencial riesgo de fallas tanto de servicio como de resistencia (colapso parcial o general de la estructura o deflexiones importantes permanentes en los elementos). Se trata de someter a la estructura a condiciones cercanas a las requeridas durante su vida útil, por tanto, se requiere de un especial cuidado en el diseño de la ejecución de las pruebas de carga garantizando límites y mediciones de seguridad durante el periodo de ejecución; de la misma forma, se deberán establecer de manera clara los criterios de aceptación o rechazo para este tipo de evaluaciones.

Las pruebas de carga son recomendadas únicamente cuando las técnicas no destructivas y semi destructivas no logren ser concluyentes o exista un grado amplio de incertidumbre en sus resultados o se carezca de información documentada de la estructura; según ACI-437R (2019) será recomendable realizar una prueba de carga siempre que se cumplan cada una de las siguientes condiciones:

1. Los resultados de la ejecución de la prueba de carga permitirán una interpretación racional de la resistencia estructural del elemento a ensayar.
2. La influencia de miembros estructurales adyacentes, componentes o estructuras completas puede tenerse en cuenta durante la prueba de carga y al evaluar los resultados de las pruebas. Esta influencia incluye la contabilidad completa de las rutas de carga alternativas que están disponibles en el edificio.
3. La estructura puede ser monitoreada adecuadamente con la instrumentación propia que provea los datos necesarios para realizar una evaluación de la resistencia estructural.
4. Todos los posibles participantes de la prueba y personas aledañas estarán de acuerdo con la ejecución de esta.

De la misma forma esta misma guía establece requisitos generales, recomendaciones, procedimientos de diseño e instrumentación para la ejecución de la prueba, así como criterios básicos de aceptabilidad.

Es importante que durante el diseño de la prueba se establezcan límites de seguridad dentro de los cuales la estructura cuente con condiciones adecuadas de servicio, con lo cual, al exceder dichos límites que deberán estar en permanente monitoreo, se deberá suspender inmediatamente la ejecución del ensayo de manera que se preserven las condiciones de seguridad de todas las personas involucradas (Ortega Llarena, 2006).

De acuerdo con las diferentes técnicas mostradas anteriormente se evidencia la amplia variedad en las alternativas de caracterización de una estructura, es por esto por lo que se deben fijar con claridad los objetivos y alcance del proyecto de manera que se logre determinar las características estrictamente necesarias para la ejecución del análisis; es aquí en donde la experiencia del evaluador cobra importante relevancia.

De la misma forma se enfatiza en la importancia de la generación de un informe final con carácter objetivo en donde se establezcan y dimensionen las propuestas de los pasos a seguir, estos podrán ir desde un monitoreo continuo de fisuras, con el fin de evaluar la actividad de estas (si estas no se encuentren activas, en muchos casos será mejor no intervenir la estructura ya que habrá alcanzado su punto de estabilidad), hasta la evaluación detallada mediante procedimientos analíticos con el fin de proponer alternativas para la preservación, restauración, reparación, rehabilitación, repotenciación o reforzamiento de la estructura según sea el caso y alcance.

7.8 Técnicas para el monitoreo estructural

El monitoreo de estructuras surge con la necesidad de conocer el estado actual de las estructuras; de esta manera, bajo la filosofía de la ingeniería estructural se pretende generar estructuras resistentes, durables y amigables con el medio ambiente. La durabilidad de una

estructura enmarca consigo la intervención de diferentes agentes como lo son el medio integral sobre el cual se encuentra la estructura; el comportamiento de esta, a pesar de que sea la copia exacta de otra edificación, será completamente diferente, por tanto, dada a la variabilidad en los desempeños de la estructuras dependiendo del trato de cada una de estas como un proyecto único e irrepitable, surge la necesidad de obtener información constante sobre el estado de las estructuras.

El monitoreo estructural trae consigo el beneficio de extender la durabilidad, seguridad y el continuo préstamo del servicio para la cual la estructura fue concebida; por tanto, monitorear una estructura de la manera adecuada generará diversos tipos de beneficios, incluso, se podrá hablar de monitoreo en estructuras que aún no estén terminadas, por ejemplo el monitoreo de movimientos de tierras durante la realización de procesos constructivos; de esta manera se tendrá bajo control determinados parámetros de riesgo como lo pueden ser los movimientos, las aceleraciones o los esfuerzos internos.

En materia de identificación de fallas resulta importante conocer sobre las alternativas y técnicas para el monitoreo de estructuras, esto dado a que, en diversos escenarios, posterior a la identificación de una falla, se requiere controlar y medir la afectación de esta, así la estructura en cuestión estará en permanente vigilancia con el fin de conocer su desempeño.

Existen técnicas de monitoreo que puede aplicarse de manera económica; por ejemplo, la medición en campo de fisuras es posible monitorear si la fisura se encuentra activa o no, esto mediante implementos sencillos que logran identificar en periodos de tiempo el avance de esta. Otro tipo de monitoreos simples y típicamente utilizados en el medio colombiano es el realizado para determinar el grado de asentamiento de una estructura; esto se logra mediante mediciones periódica con elementos sencillos como una plomada (elemento que suele ubicarse en la cubierta de la edificación hasta la parte inferior de la misma; esto indica que la estructura deberá ser prevista con elementos de anclaje que permitan el soporte de estos elementos) mediante la cual es posible determinar los desplazamientos de la estructura en un periodo determinado (periodo de frecuencia en el cual se tomen datos). De la misma forma,

posterior a la realización de una intervención de una estructura, será conveniente la permanente supervisión de están esperando comportamientos adecuados.

Por tanto, se determina un papel esencial del monitoreo de edificaciones para las estructuras, sin embargo, es claro anotar que los costos relacionados con estas prácticas no suelen ser bajos, estarán directamente relacionados con la variable que requiera ser controlada o monitoreada; en algunos casos se requerirá de la incorporación de equipo sofisticados y costosos que deberán ser instalados de manera permanente dentro de la edificación, esto quiere decir que no será suficiente con la adquisición de los equipos, todo lo contrario, se deberá disponer de personal capacitado para la operación de los mismos así como de instalaciones designadas únicamente a la contención y almacenamiento de los mismos bajo parámetros estrictos ya que estos equipos suelen ser sumamente sensibles.

Existen otros tipos de instrumentación que pueden ser instalados en la estructura con el fin de establecer un monitoreo y control de esta; seguidamente se exponen algunos de los equipos mayormente utilizados para este fin.

7.8.1 Sensores de deformación

Este tipo de sensores miden las deformaciones mediante un cuerpo elástico que absorbe deformaciones producidas por una carga transformándola en una señal parametrizada mediante un transductor, este tipo de elementos se ubican en las zonas de mayor interés como puntos flexibles de la estructura, cambios de sección o zonas con atención particular para su monitoreo (Vignolo & Vázquez, 2012). Los sensores mayormente utilizados son las galgas extensiométricas, sin embargo, no son los únicos existentes; es posible también encontrar sensores medidores de inclinación, medidores de desplazamiento o medidores de nivel.

7.8.2 Sensores de vibración

Son dispositivos que cuentan con la facultad de convertir movimientos vibratorios proporcionales a un parámetro como la aceleración a señales mediante el uso de transductores. Estos instrumentos por tanto incorporarán acelerómetros, velocímetros o sensores de desplazamiento con el fin de determinar las propiedades dinámicas de la edificación como frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamiento (Hernández Gutiérrez, 2006). La determinación de las propiedades dinámicas de la estructura permite detectar movimientos inusuales o evaluar la respuesta sísmica de una edificación y verificar las condiciones de la estructura después de determinado evento (impacto, explosión, sismo, entre otros).

7.8.3 Sensores de tensión y compresión

Son dispositivos transductores empleados para la medición de cargas aplicadas a elementos estructurales como vigas o columnas, esto mediante la conversión de las deformaciones percibidas por el aparato a una señal eléctrica; los tipos más comunes de sensores son las celdas de cargas neumáticas o hidráulicas permitiendo la evaluación en tiempo real y detección de problemas de sobrecarga sobre los elementos (Domínguez Gómez Trejo , 2017).

7.8.4 Sensores de temperatura

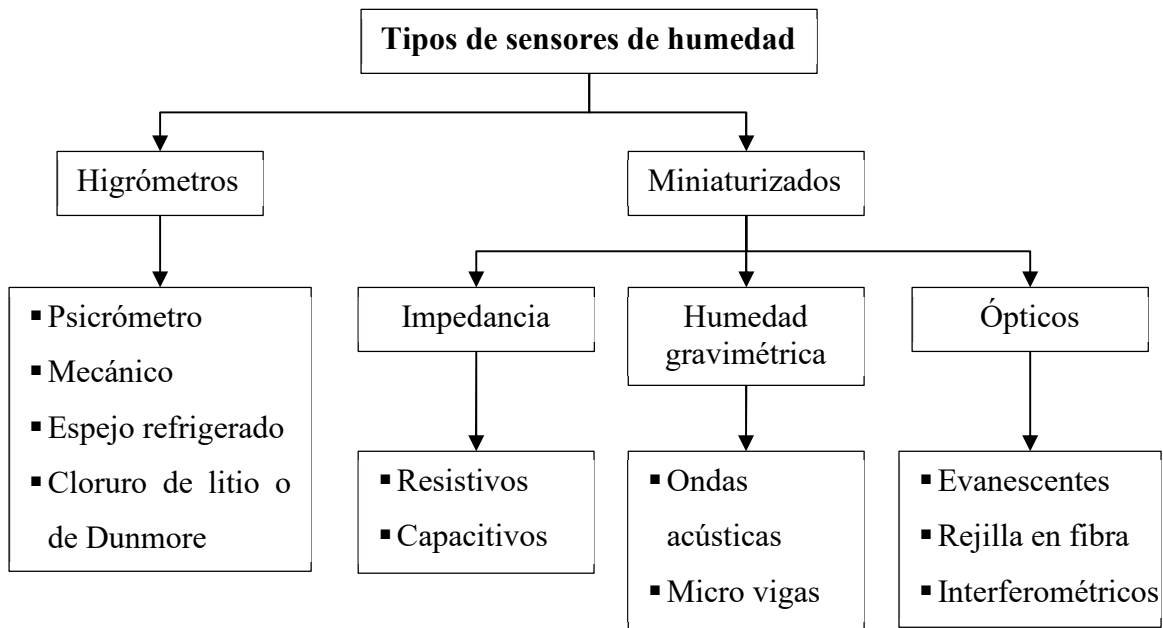
Los sensores de temperatura son dispositivos que cuentan con diferentes características de versatilidad que podrán adaptarse a las necesidades de medición; existen diferentes avances en el medio que permiten el monitoreo de estructuras mediante el seguimiento de parámetros eléctricos (termocuplas, termorresistencia, termistores, diodos o sensores de silicio con efecto resistivo), mecánicos (sistemas de dilatación, termómetros de vidrio con líquidos, termómetros o bimetalicos), de radiación térmica (pirómetros de radiación total, ópticos o infrarrojos) o de funcionamientos alternos (sondas neumáticas, sensores ultrasónicos, termómetros

acústicos, cristales líquidos, sensores flúidicos e indicadores de luminiscencia) (Jimenez Casaverde & Romero Reategui, Trujillo), cada uno de los parámetros mencionados anteriormente contarán con ventajas en función de las condiciones en las que se requiera realizar la medición.

La medición del parámetro de la temperatura cobra especial importancia en procesos de expansión y contracción del material, adicionalmente, suelen ser empleados en procesos de vaciado de concretos masivos en donde la temperatura será un parámetro esencial para garantizar las propiedades mecánicas de la estructura en conjunto con su durabilidad.

7.8.5 Sensores de humedad

El parámetro relacionado con la humedad puede ser medido mediante la incorporación de diversos tipos de instrumentos basados en diversas técnicas como se muestra en la ilustración 96, la diferencia entre los diferentes equipos que pueden emplearse para la medición radica en la tecnología empleada y la precisión de los mismos, por tanto, algunos podrán ser más sensibles que otros a agentes químicos, cambios de temperatura y exposiciones ambientales, será necesario el conocimiento sobre su funcionamiento de manera que se logre realizar una elección adecuada para la medición del parámetro.



*Ilustración 96 Tipos de sensores para medición de humedad
Fuente: basado en información de (Melgar Beato, 2018)*

La medición de la humedad pretende mantener en constante control las condiciones ambientales a las cuales la estructura está siendo sometida, de esta forma, se podrá conocer en tiempo real parámetros que pueden afectar por ejemplo el deterioro de elementos de acero expuestos o reacciones químicas propicias ante una determinada condición de humedad (típicamente relacionadas con la resistencia del concreto), adicionalmente, será propio conocer las condiciones de humedad de una estructura para generar estrategias de mantenimiento preventivo o intervención sobre esta.

7.8.6 Sensores de corrosión

La evaluación de la corrosión en estructuras es un factor de especial interés debido a que es una problemática que afecta la durabilidad; por tanto, conocer y monitorear el estado actual de la estructura mediante el empleo de instrumentación que permita la medición de esta variable es esencial en determinado tipo de estructuras.

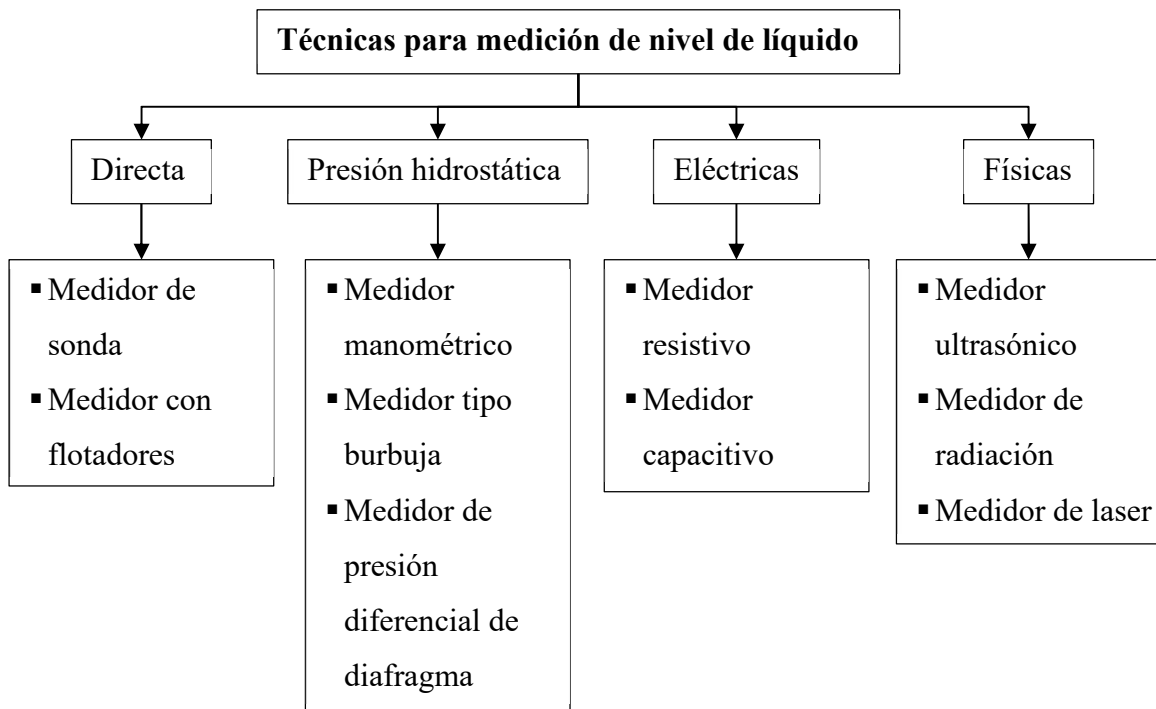
Uno de los principales beneficios del monitoreo de esta variable es lograr delimitar las zonas afectadas al mismo tiempo que se predice la velocidad de corrosión y propagación sobre el acero de refuerzo (afectación de especial interés en estructuras con entornos marinos o industriales sometidos a agentes químicos agresivos); al mismo tiempo, esta estrategia permite establecer la vida residual de la estructura con el fin de generar estrategias de mantenimiento. En estructuras intervenidas será útil la incorporación de este tipo de sensores para determinar y controlar la eficiencia del sistema de reparación empleado.

Los dispositivos empleados para la medición de la corrosión se encuentran basados en las evaluaciones electroquímicas sobre los elementos estructurales. Típicamente este tipo de monitoreos se realiza mediante las estrategias de medición de pulso galvanostático (basan su funcionamiento en la obtención de la resistencia de polarización mediante un análisis de respuesta potencial dado a la aplicación de una corriente continua conocida), medición de potencial de corrosión (técnica no destructiva y cualitativa basada en la medición de la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo de referencia y el acero de refuerzo, sin la circulación de corriente eléctrica entre los dos electrodos), medición del potencial en superficie (se emplean dos electrodos de referencia manteniendo uno en un punto fijo y el otro recorriendo la superficie del elemento a evaluar, posteriormente, se evalúa en puntos determinados el potencial entre los electrodos mediante un voltímetro de alta impedancia), medición de la resistencia de a la polarización lineal (se emplea corriente continua mediante un potencióstato cambiando la polarización del acero de refuerzo de modo que se logre verificar que no se cumpla la ley de Ohm), medición de la resistividad eléctrica del concreto (empleando correlaciones entre la resistividad eléctrica del concreto medido por el método Wenner o de cuatro sondas y la corrosión del acero de refuerzo) y la medición mediante fibras ópticas y sistemas inteligentes (sistemas de medición electroquímica que permiten el monitoreo en tiempo real y sin la necesidad de desplegar equipos complejos ya que puede realizarse a distancia como por ejemplo los sensores de fibra óptica de rejilla de Bragg) (Villao Vera, 2021).

Este tipo de monitoreo deberá ser complementado mediante la incorporación de otros instrumentos que permitan la medición de temperaturas y humedades, variables esenciales para determinar las velocidades de propagación de la corrosión sobre los refuerzos embebidos en los elementos estructurales.

7.8.7 Sensores de nivel de líquidos

El monitoreo de los niveles de líquidos es de especial importancia en estructuras que requieren mantener un control riguroso de los niveles o establecer límites en la aplicación de presiones a los cuales los elementos se ven sometidos. Existen diferentes técnicas que pueden ser empleadas para la medición de este parámetro, en la ilustración 97 se muestran algunas de las técnicas en conjunto con los medidores mayormente empleados.



*Ilustración 97 Técnicas para medición de nivel de los niveles de líquidos
Fuente: Elaboración basada en documento (Cando, 2016)*

7.8.8 Sensores de aceleración sísmica

Este tipo de instrumentos se emplean sobre estructuras con el fin de determinar las afectaciones que un sismo puede provocar, al mismo tiempo permiten la evaluación del comportamiento de la estructura mediante la medición y detección de vibraciones, estas permitirán la identificación de las aceleraciones que al mismo tiempo será proporcionales a las fuerzas aplicadas en la estructura mediante el movimiento de la base (Asencio Rodriguez & Galdos Carrillo, 2022).

La norma NSR-10 en su capítulo A.11, instrumentación sísmica, enuncia los tipos de estructuras a los que se debe proveer con dispositivos como acelerógrafos para su monitoreo. Este tipo de instrumentación suele emplearse en estructuras nuevas teniendo como objeto el conocimiento permanente de las propiedades dinámicas de la estructura tales como su periodo de vibración, este permite determinar los niveles de daño que se puedan presentar en la estructura después de un evento sísmico. La instrumentación sísmica propuesta por NSR-10 a su vez busca mejorar la comprensión de los fenómenos sísmicos, de tal manera que sea posible el mejoramiento continuo de las normativas existentes con el fin de reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones colombianas mediante el aporte de datos a la red nacional de acelerógrafos del INGEOMINAS.

Los equipos descritos anteriormente son solo algunos de los instrumentos disponibles como fuente de datos que permiten la toma de decisiones, sin embargo, la instalación de los equipos anteriores requiere del empleo de técnicas adecuadas para su correcto uso, además, será necesario contar con periodos recurrentes de mantenimiento y calibración de todos los equipos, de tal forma que se cuente con información confiable para el análisis continuo y la toma de decisiones asertivas.

Actualmente, existen diversos mecanismos que permiten monitorear una estructura en tiempo real y a la distancia, de esta manera, en diversos casos en donde se requiera una

inspección constante bastará con contar con dispositivos enlazados a una red con conexión remota, así se podrán realizar entonces análisis de una estructura desde una oficina con el fin de tomar decisiones reactivas para preservar el estado de estructuras con posibles afectaciones o establecer metodologías de mantenimiento o prevención tempranas.

Capítulo VIII

Aplicación de metodologías de investigación de fallas

Se han definido algunas de las causas más comunes de fallas en estructuras de concreto, algunas de sus manifestaciones y sus posibles consecuencias; sin embargo, es necesario contar con una metodología que permita, de manera ordenada y lógica, establecer el problema raíz a través de las manifestaciones que se presentan.

Como se menciona en el Capítulo II, existen tres tipologías de metodologías principales para el proceso de investigación de fallas: metodologías de análisis cualitativo, análisis semi-cualitativo y análisis cuantitativo o físico. El empleo asertivo de cada una de estas dependerá de la experiencia de los profesionales a cargo de la investigación; es por esto por lo que seguidamente se presentará un ejemplo aplicativo en donde se evaluará una problemática de una estructura mediante uso de una metodología de investigación de falla de una estructura.

Es necesario destacar que realizar una guía general aplicativa para todo tipo de estructuras será una labor de extremada complejidad ya que el proceso de análisis será específico para cada uno de los proyectos, por tanto, este capítulo deberá ser tratado como una guía de aplicación de las metodologías de investigación de fallas específicas presentadas a continuación; sin embargo, se resalta que para cada proyecto estas podrán ser aplicadas de manera diferente, incluso, podrá ser más eficiente emplear una combinación de las metodologías para determinar la raíz de las fallas de manera más eficiente como se mostrará en el ejemplo más adelante.

En la ilustración 98 se presenta un diagrama de flujo general para la investigación de fallas de una estructura. Allí se muestran los pasos a seguir para el análisis de las causas de falla mediante la aplicación de procesos investigativos, de manera que sea posible establecer una revisión a unos estados límite que otorguen una justificación lógica sobre el estado actual de

la estructura. A partir de este veredicto se podrán determinar estrategias para la “cura” o “tratamiento” de la “enfermedad” de la estructura.

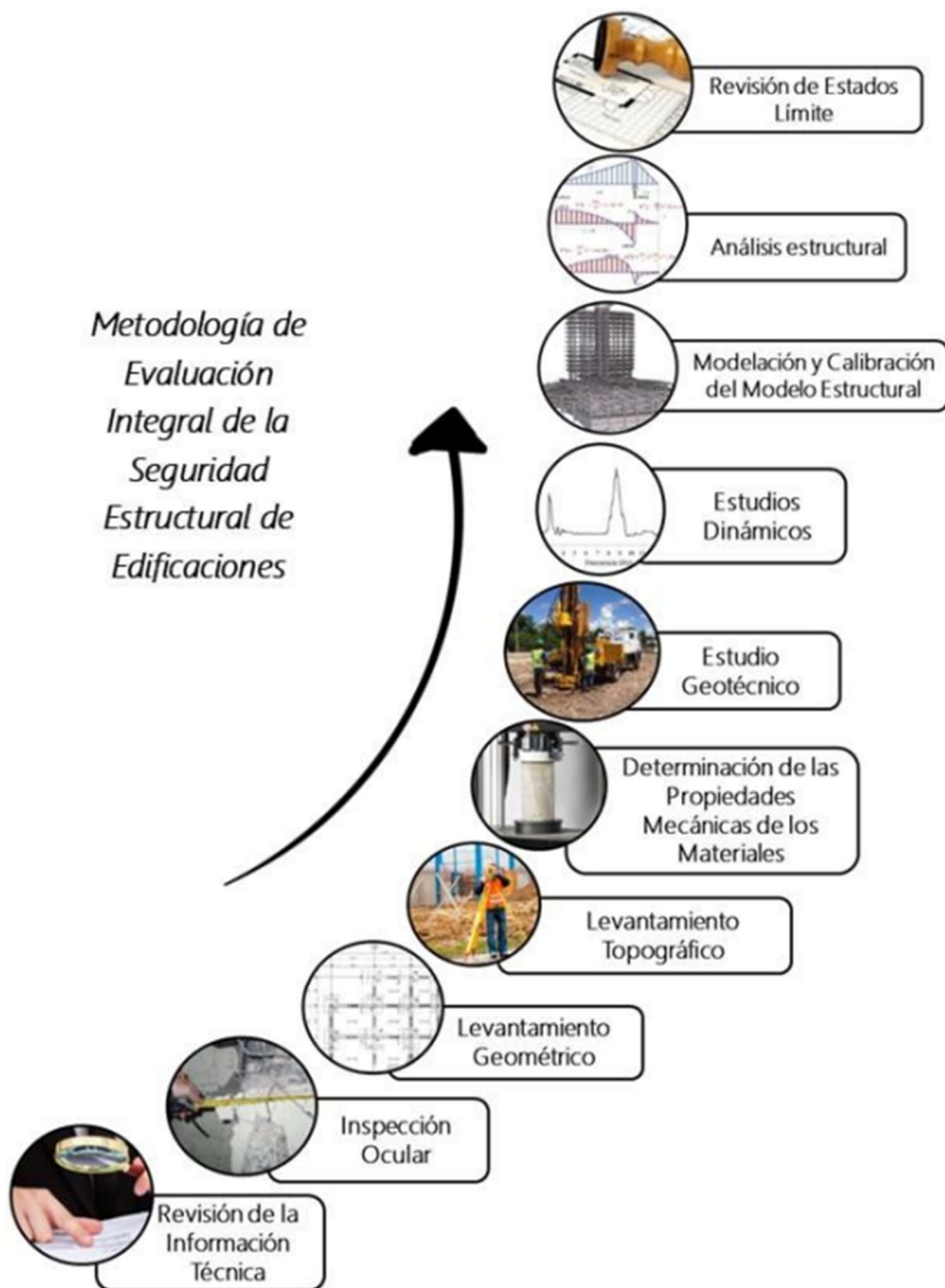


Ilustración 98 Diagrama de flujo de metodología general para la evaluación de estructuras
Fuente: (Razo Carrasco & García Domínguez, 2020)

Seguidamente se presenta un caso de análisis de una estructura de concreto realizado por Vilca y Obregón (2023) en donde se aplicará a manera de síntesis las metodologías para investigación de fallas.

8.1 Descripción del problema

Vilca y Obregón en su trabajo de tesis (Evaluación estructural sísmico de las instalaciones de la gerencia de ingeniería de la entidad prestadora de servicio de saneamiento, Tacna 2022) realizan el análisis de una estructura de concreto ubicada en Tacna ciudad de Perú.

El propósito de la investigación radica en conocer el estado de la estructura dada su antigüedad (edificación construida en los años 80); adicionalmente, las condiciones actuales de la estructura son inadecuadas para la correcta operación de este dado al riesgo de seguridad que presenta la estructura de dos pisos al verse sometida a un eventual evento sísmico.

La importancia de esta investigación radica en el uso de la edificación en cuestión dado a que se trata de instalaciones en donde se desarrollan importantes proyectos sociales de especial interés para el desarrollo de la población dado a su alto impacto económico y social.

Para el desarrollo de la investigación de la estructura se empleará una combinación de las metodologías de investigación de falla mencionadas anteriormente con el fin de ejemplificar estas de la mejor manera.

8.2 Desarrollo de la metodología

Para la investigación se propone partir inicialmente por la ejecución de una metodología cualitativa mediante la formulación de un diagrama de flujo que permita involucrar análisis cuantitativos o físicos como ensayos a los materiales y análisis mediante software especializado de cálculo estructural. En la ilustración 99 se muestra el diagrama de flujo propuesto como metodología para la investigación del caso.

De acuerdo con el diagrama de flujo propuesto, inicialmente se partirá por el propósito de la investigación; para este caso será la evaluación del estado actual de las instalaciones de la gerencia de ingeniería y obra de la entidad promotora de servicio de saneamiento de Tacna. Será clave mantener este hito en cuenta ya que a lo largo del desarrollo de la metodología se buscará información hasta que pueda ser evaluado de la forma más objetiva.

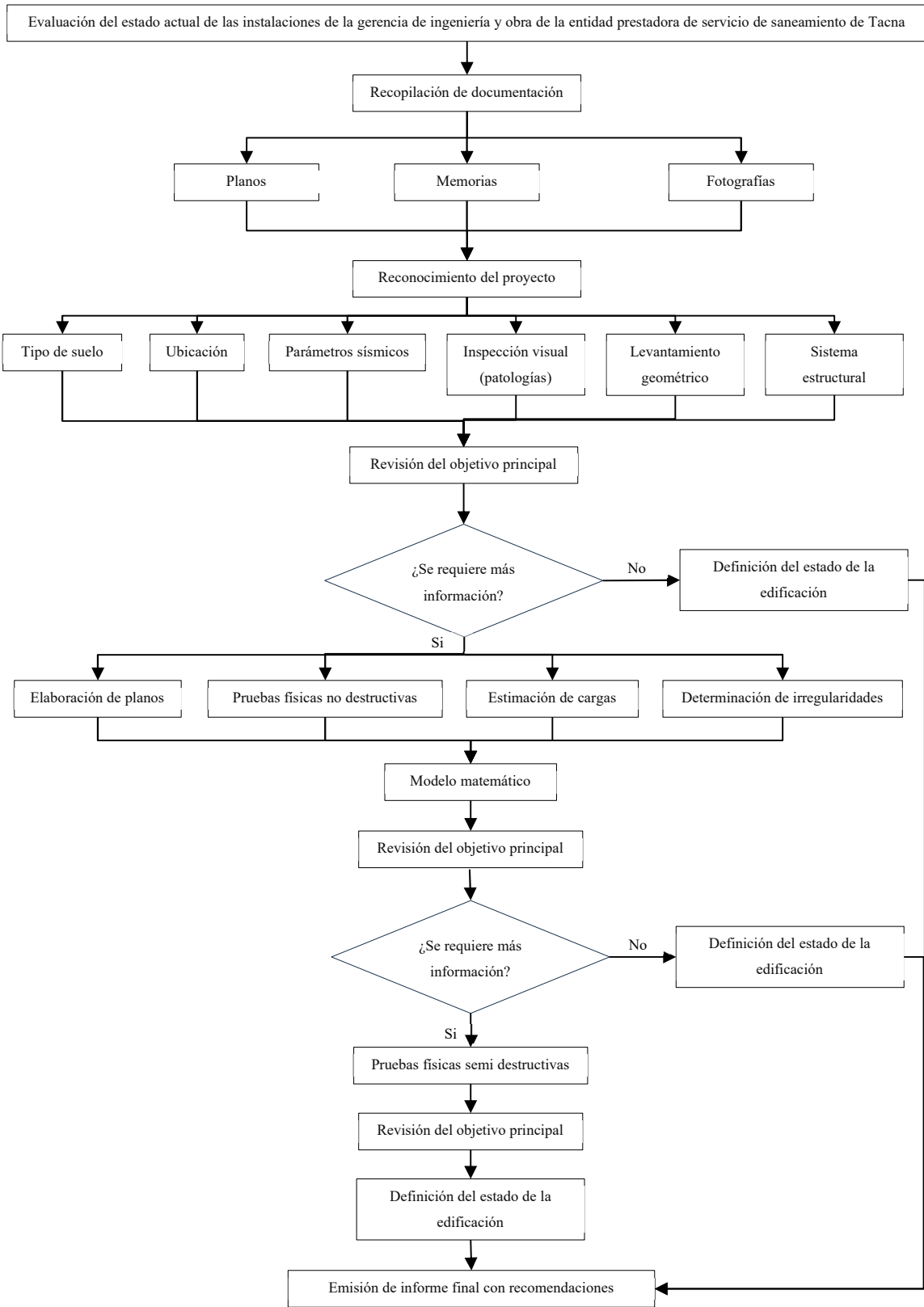


Ilustración 99 Diagrama de flujo para investigación del estado de la estructura
 Fuente: Elaboración propia

La investigación de acuerdo con la metodología planteada anteriormente propone la recopilación de documentación; aquí se hace referencia al trabajo investigativo de reunir información referente a planos de diseño, memorias de cálculo, fotografías del proceso constructivo o de épocas anteriores que revelen el estado en el cual se encontraban los elementos, así como cualquier evidencia que pueda ayudar a determinar el mismo mediante técnicas de análisis no destructivos.

Los autores de la investigación mencionan que dada la antigüedad de la estructura esta tarea no ha podido ejecutarse pues no se cuenta con esta información, por tanto, se continua con el flujo del diagrama hacia el proceso de reconocimiento de la estructura.

El reconocimiento de la estructura hace referencia a realizar un proceso de acercamiento a la edificación con el fin de reconocer el proyecto, esto implica generar una ubicación espacial del proyecto mediante una metodología de investigación cualitativa como lo es el diagrama de flujo encaminado a la búsqueda y cumplimiento del objetivo principal del alcance de la investigación; para esto se debe identificar la ubicación, el tipo de suelo, los parámetros sísmicos asociados a la ubicación, el sistema estructural de la edificación, una inspección visual y finalmente un levantamiento geométrico de los elementos principales; seguidamente se proporcionará un pequeño resumen de la información presentada por Vilca y Obregón en su trabajo investigativo.

8.2.1 Ubicación

La estructura se encuentra localizada en calle Alto Lina N° 2230, Provincia y Departamento de Tacna, Perú.

8.2.2 Tipo de suelo

El tipo de suelo correspondiente a la ubicación del proyecto es una arena densa, con granulometría gruesa a media o una grava arenosa medianamente densa. Este tipo de

suelo describe un perfil de tipo S2 o intermedio el cual según la norma técnica E0.30 de diseño sismorresistente del reglamento nacional de edificaciones de Perú equivale a suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte V_s de entre 180 m/s a 500 m/s.

8.2.3 Parámetros sísmicos

De acuerdo con la norma técnica peruana (NTP) E0.030-2018 la región geográfica en donde se ubica el proyecto es costa; este sector se clasifica como zona 4 dentro de la norma asignando un factor Z o factor de zona de 0.45 en fracción de la gravedad; este se refiere a una magnitud de la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años.

Según la norma NTP E0.030-2018 en las tablas N° 3 y N° 4 para las condiciones del proyecto se tendrá un periodo corto de 0.60 segundo, un periodo largo de 2.0 segundos y un factor de suelo de 1.05; estos valores contribuirán a la determinación de un espectro de diseño de la zona.

Adicionalmente se ubicará la estructura de acuerdo con el uso que se le da a esta en donde se tendrá una clasificación con categoría C cuyo factor de uso será 1.0.

8.2.4 Inspección visual (patologías)

Para realizar la inspección visual existen metodologías como la propuesta por FEMA (2015) en donde se expone una guía para identificar los posibles riesgos sísmicos posteriores a un evento de esta categoría mediante técnicas no destructivas. Esta técnica describe los pasos necesarios para planificar y organizar una inspección con el fin de obtener la información más relevante sobre la estructura a evaluar. Adicionalmente permite la aplicación de la metodología de investigación cualitativa por medio de las listas de verificación mencionadas en la página 27; estas listas se

convierten en un elemento muy valioso para el apoyo de una investigación ya que han sido creadas mediante la experiencia de la Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos.

Dentro de los aspectos principales que se evalúan en estas listas de chequeo se pretende identificar el sistema estructural de la edificación, los materiales de construcción, el estado de las conexiones, los elementos que presentan vulnerabilidad o afectación por el evento entre otros aspectos.

La inspección visual propuesta por FEMA P-154 (2015) otorga una guía para la clasificación y evaluación de los daños presentados en la edificación basado en la gravedad de estos. Adicionalmente, esta metodología cualitativa gracias a las bases experimentales con las cuales ha sido desarrollada logra proporcionar recomendaciones para las acciones a tomar según el nivel de riesgo obtenido en la investigación; con esto, se convierte en una metodología de reacción rápida lo que permite identificar potenciales de falla y preservar la seguridad y la vida. Es necesario ser prudente en la aplicación de este tipo de metodologías dado a la limitación de un método cualitativo explicado anteriormente, por tanto, en diversas situaciones se deberán emplear metodologías de investigación más sofisticadas para la toma de decisiones.

Esta herramienta está desarrollada pensando en ser de rápida ejecución y por tanto empleada en las primeras horas después de un desastre provocado por un sismo; aquí se evidencia su limitación principal a la hora de evaluar criterios de comportamiento avanzados como el desempeño de una estructura ante un sismo de diseño, tarea que se pretende determinar en el presente análisis, por tanto, seleccionar la metodología de inspección visual rápida propuesta por FEMA para la evaluación de esta tarea no sería lo más conveniente dadas sus limitaciones.

Durante las labores de inspección visual desarrolladas por Vilca y Obregón se tomaron evidencias fotográficas mediante las cuales se generaron anotaciones sobre el estado de la estructura, así como su configuración geométrica general.

La inspección visual y por tanto la aplicación de la metodología cualitativa en la investigación de la estructura permitió la identificación de patologías presentadas en la estructura tales como humedades, eflorescencias con presencias de sales y desprendimientos de pintura. Estas eflorescencias se encontraron principalmente en muros y columnas del primer nivel de la estructura en donde también se presenta descascaramiento de la pintura en la parte inferior y media, particularmente se encontró esta afectación en los elementos que se encuentran en las zonas externas de la estructura.

Al hacer la inspección detallada de la causa de esta falla enmarcadas con un patrón de eflorescencias, que según Vilca y Obregón son consecuencia del empozamiento de agua lluvia y la cercanía de áreas verdes a la estructura a la altura media del primer piso (pág. 44), se tiene que estas eflorescencias están dadas por lixiviación de aguas blandas sobre la superficie de concreto mencionadas en la página 130.

Según Broto (2006) la manifestación de las eflorescencias se da mediante manchas blancuzcas que afectan el aspecto exterior y deterioran el material al mismo tiempo que para este caso pueden generar los desprendimientos de la pintura observados. A su vez, en su obra Broto menciona como mecanismos para evitar las eflorescencias el aislamiento de las capas de concreto del contacto con el agua lluvia, para esto podrán emplearse materiales de polietileno generando capas aislantes.

Finalmente, para tratar este tipo de problemáticas una vez ya han aparecido las manifestaciones en forma de manchas como es el caso, se recomienda el uso de limpiadores, por lo general se emplea el uso de agua a presión, sin embargo, puede requerirse el uso de agentes químicos disolventes teniendo la precaución de que una

vez removidas estas eflorescencias con los agentes sean retirados por completo dado a que pueden ser fuente de futuras eflorescencias por su alto contenido en sal. Adicionalmente, una vez tratada la superficie se deberá proteger mediante algún elemento aislante o el uso de pinturas antihumedad.

Es aquí en donde se evidencia la especial importancia por parte del equipo de investigadores en el reconocimiento de diversas causas de falla, con el fin de encaminar de la mejor manera un proceso y selección de metodología de investigación de falla ya que esta definirá el éxito o fracaso del proceso investigativo, por tanto, para el reconocimiento de la afectación patología por eflorescencias será suficiente en este caso particular con el uso de una metodología cualitativa y unas técnicas de análisis no destructivas. Dado a que el objetivo principal de la investigación no es el reconocimiento de esta patología, será necesario continuar con la aplicación de la metodología orientada a la investigación de esta estructura.

En las evidencias presentadas por la inspección visual no se hace referencia a fisuras encontradas en los elementos principales, por tanto, se descarta la presencia de sobrecargas debidas a peso propio, cargas concentradas o cargas no previstas por el uso de la estructura.

8.2.5 Sistema estructural

El sistema estructural empleado en la edificación en cuestión es un sistema combinado en donde se emplean muros de mampostería confinada y pórticos de concreto reforzado.

8.2.6 Levantamiento geométrico

Como etapa final del primer acercamiento en la metodología planteada se genera un levantamiento geométrico de los elementos principales de la estructura; estos datos

serán útiles en la determinación de las dimensiones mínimas con las cuales deberá contar la estructura de acuerdo con el desempeño sísmico que se busque. Por otra parte, estas dimensiones geométricas definirán la rigidez de la estructura en caso de que deban realizarse análisis más detallados.

Una vez evaluados los parámetros anteriores se procede a revisar el objetivo principal, de esta manera, basado en el objetivo principal (evaluar el estado de la instalación de la gerencia de ingeniería y obra de la entidad prestadora de servicio de saneamiento de Tacna inclinado hacia el comportamiento ante eventos sísmicos) se genera la primera toma de decisiones; ¿se requiere más información?, la pregunta deberá ser respondida afirmativamente dado a que la información recopilada anteriormente no es suficiente para determinar y concluir con el objetivo principal del proyecto.

Se deberá entonces continuar con la investigación de la estructura mediante la elaboración de planos As-Built (planos que corresponden a la información sobre el estado final de la estructura), pruebas físicas no destructivas, estimación de cargas y determinación de irregularidades; es aquí en donde interviene la aplicación de la metodología de investigación propuesta como una unión entre las diferentes metodologías planteadas anteriormente. Quiere decir entonces que la metodología cualitativa empleada hasta el momento, será de especial utilidad para llegar hasta este punto y para continuar apoyando la investigación gracias a las cualidades de un análisis mediante un diagrama de flujo (se tendrá en todo momento una secuencia lógica y un alcance definido para la aplicación y seguimiento de la investigación), sin embargo, será necesaria la intervención de una metodología de análisis física o cuantitativa, de esta manera, integrando de manera lógica con la metodología de diagrama de flujo, se desarrollará una metodología única para este proyecto en donde se otorguen los beneficios de investigación de las dos metodologías.

Como se evidencia en el flujo de la metodología se parte de los procesos más sencillos, de modo que no se requiera mayor intervención sobre la estructura; en este punto se busca

obtener más información mediante análisis matemáticos y el empleo de ensayos poco invasivos.

8.2.7 Elaboración de planos

Mediante la información obtenida anteriormente sobre el levantamiento geométrico el autor de la investigación realiza planos que reflejan la información sobre las dimensiones de los elementos principales, esta tarea es de vital importancia para la elaboración de un modelo matemático en etapas posteriores.

8.2.8 Estimación de cargas

Obtenidas las dimensiones de los elementos principales y mediante el conocimiento y recopilación de fotografías e información sobre el uso de la estructura se deberán estimar las cargas muertas y vivas aplicadas sobre esta; por tanto, será esencial contar con conocimiento sobre acabados, cargas móviles, dinámicas, entre otras como se ha mencionado en el presente documento.

8.2.9 Pruebas físicas no destructivas

La determinación de las pruebas físicas a emplear es una labor que requiere de bastante experiencia del equipo profesional dado a que una inadecuada selección de estas podrá llevar a sobrecostos o estimaciones erróneas en el proyecto.

Para este caso, el autor seleccionó el empleo del esclerómetro para la determinación mediante prueba no destructiva de la resistencia del concreto. Sin embargo, como metodología adicional para la revisión del comportamiento de la estructura sería interesante el empleo del Ferroskan para establecer los recubrimientos del acero de refuerzo, la cantidad de barras y zonas de confinamientos empleadas en los elementos principales. De esta manera se logra determinar por medio de los ensayos de

esclerometría que la resistencia del concreto reforzado f'_c es del orden de 174.6 kg/cm².

8.2.10 Determinación de irregularidades

El autor de la investigación realiza el trabajo de determinación de las irregularidades de la estructura desde el punto de vista de comportamiento sísmico de acuerdo con la norma peruana E 0.30, se encuentra que la estructura cuenta con irregularidades en altura y en planta, en donde su irregularidad en planta será por concepto de torsión con categoría extrema; esto está prohibido según el código peruano de construcción sismorresistente E 030 para estructuras con la categoría de uso y ubicación como la que se encuentra en investigación.

Paralelo a la determinación de las irregularidades se deberá construir el modelo matemático de la estructura con el fin de evaluar el comportamiento estructural de los elementos (esto es posible debido a la información de la estructura obtenida anteriormente); de esta manera se genera la evaluación mediante un análisis estático y dinámico encontrando que la rigidez que ofrecen los elementos es adecuada para controlar las derivas según la normatividad de Perú.

Siguiendo el diagrama de flujo se llega a la segunda toma de decisiones en donde posterior al análisis del modelo matemático empleado se cuestiona por la necesidad de información adicional. Para responder al alcance del proyecto no será necesario emplear información adicional ya que se logró determinar el comportamiento frente a derivas de la estructura; sin embargo, será prudente de acuerdo con el objetivo inicial del proyecto, determinar la capacidad de los elementos estructurales para resistir las cargas de sismo. Por tal motivo se continuará con la investigación de la estructura de manera hipotética con el fin de ejemplificar con claridad el empleo de la metodología de investigación propuesta.

Dado a que la resistencia del concreto arrojada por la prueba de esclerometría proporciona valores de resistencia bajos se sugiere realizar pruebas físicas adicionales. Sabiendo que el

objetivo principal de la investigación no ha podido ser resuelto con la información anterior será necesario emplear en la investigación una información adicional condicionada por la aplicación de la metodología de investigación de fallas de tipo físico o cuantitativa.

La información adicional se basará en los datos obtenidos de pruebas físicas semi destructivas mostradas en el Capítulo VII como la extracción de núcleos para determinar con mayor certeza la resistencia del concreto y la elaboración de regatas para establecer la configuración del acero estructural dentro de los elementos principales, al mismo tiempo se deberá extraer una probeta de acero estructural para evaluar las propiedades mecánicas de este.

Una vez obtenidos los resultados de la resistencia tanto del concreto como del acero de refuerzo se procederá al trabajo de oficina en donde se determinará la capacidad de los elementos de concreto al mismo tiempo que se evalúa dicha capacidad con las solicitaciones generadas. Como se menciona en capítulos anteriores, al realizar este tipo de investigaciones sobre estructuras antiguas no se podrá realizar una comparación de las prestaciones de la estructura frente a la normativa actual comparándola con una estructura nueva como se explica en la página 179.

Seguidamente, en concordancia con la metodología establecida en un principio, se revisará el cumplimiento del objetivo principal; en este caso se dará por cumplido ya que mediante los análisis anteriores se consigue evaluar el estado actual de la estructura en cuestión, por tanto, se procederá a definir mediante el soporte investigativo generado el estado actual de la edificación.

Finalmente, producto de la investigación de la estructura se emitirá un informe con las características mencionadas en la página 77 en donde se mencionen las patologías encontradas, sus causas y sus alternativas de reparación; es decir, se emitirá un “diagnóstico” detallado de la “enfermedad” encontrada en la estructura.

Mediante el empleo de la metodología anterior se pretende ejemplificar el uso particular de las metodologías de investigación de fallas para la evaluación de esta estructura y el objetivo particular definido por el alcance del proyecto. En este análisis, gracias al método empleado se logra determinar “enfermedades” presentes en la estructura como las eflorescencias relacionándolas con sus causas debidamente justificadas, así como problemas raíces representados en la baja resistencia del concreto reforzado determinado por las pruebas de esclerometría. De la misma forma para la “enfermedad” detectada durante el proceso de investigación y “diagnóstico” se encuentra un posible “tratamiento” con el fin de recuperar o “aliviar” la estructura.

Es importante destacar que el enfoque de las metodologías de investigación de fallas presentadas en el presente trabajo pretende “diagnosticar con la enfermedad” a la estructura en cuestión para establecer una “cura” o “tratamiento” siguiendo un procedimiento lógico y debidamente justificado por medios ingenieriles de manera que se logre preservar la estructura bajo parámetros de seguridad.

Capítulo IX

Caso de estudio: colapso del puente Los Grillos

La transversal de Cusiana es un importante corredor vial que comunica los municipios de Sogamoso (Boyacá) con Aguazul (Casanare), propuesto como solución a una vía alterna que a lo largo de la historia ha presentado constantes dificultades a nivel de operatividad por su inestabilidad del terreno. Este sector se caracteriza por su permanente humedad dada a la alta tasa de lluvias y escorrentías de la ladera hacia la vía, como consecuencia se presenta un grado alto de movimientos de masa de tierra que incrementan la accidentalidad como se muestra en la ilustración 100.



*Ilustración 100 Derrumbe en la vía sector Peña de Gallo
Fuente: (García Castillo, Murcia Forero, & Torres Romero, 2020)*

El nuevo corredor vial cuenta con una longitud aproximada de 110 km que atiende a la necesidad de una reducción en materia de accidentalidad y un aumento en términos de rendimientos económicos ya que logra un reajuste de cerca de 1.50 horas en trayectos de recorrido. La iniciativa conocida como corredores arteriales complementarios de competitividad promovió la construcción de la transversal Cusiana mediante la construcción

de 14 viaductos en conjunto con las obras complementarias requeridas (obras de mejoramiento de suelo, obras hidráulicas, obras de estabilización entre otras). Los viaductos construidos como parte de este corredor vial son:

1. Puente La Conguta (Longitud 88 m) – Localizado en el km 76 + 415 m.
2. Puente La Leonera (Longitud 181 m) – Localizado en el km 80+350 m – sufrió afectaciones en sus juntas que fueron reparadas por la concesión.
3. Puente Los Grillos (Longitud 262 m) – Localizado en el km 81+250 m– colapsó el 20 agosto de 2023.
4. Puente La Chigüirera (Longitud 110 m) – Localizado en el km 85+700 m.
5. Puente La Orquídea 1 (Longitud 110 m) – Localizado en el km – Km 86+510 m – colapsó 29 octubre 2019.
6. Puente La Orquídea 2 (Longitud 92 m) – Localizado en el km 86+740 m.
7. Puente Nuevo 3 (Longitud 103 m) – Localizado en el km 81+450 m.
8. Puente El Verbeno (Longitud 42.5 m) – Localizado en el km 82+560 m.
9. Puente Chorro Blanco (Longitud 263 m) – Localizado en el km 81+600 m.
10. Puente La Granja (Longitud 235 m) – Localizado en el km 87+640 m.
11. Puente La Cascada (Longitud 96 m) – Localizado en el km 89+300.
12. Puente Cusiana (Longitud 86 m) – Localizado en el km 90+131.
13. Puente la Frontera (Longitud 53 m) – Localizado en el km 91+228.
14. Puente Peña de Gallo (Longitud 360 m) – Localizado en el km 53+000 m.

Fuente: (INVIAS, 2012)

De los puentes mencionados destaca especialmente el puente La orquídea 1 dado a su colapso presentado en el año 2019 como se muestra en la ilustración 101. Este puente se inauguró en el año 2011 y se puso al servicio desde el año 2013 representando una inversión económica importante en materia de infraestructura del país. Dicho puente se encontraba inhabilitado desde el año 2017 por diversas fallas estructurales (Redacción Economía, 2019). Posterior a este suceso INVIAS decide invertir esfuerzos en materia de mantenimiento y control de la zona.



*Ilustración 101 Colapso puente La Orquídea 1
Fuente: (Martha Cifuentes, 2019)*

De la misma forma es de especial interés el puente La Leonera dado a las intervenciones realizadas por efecto del desacople de las juntas como se muestra en la ilustración 102 según informó INVIAS.



*Ilustración 102 Desacople de juntas en puente La Leonera
(Prensa Libre, 2022)*

Finalmente, como foco de interés se tiene el puente Los Grillos dado a su colapso presentado el día 20 de agosto del 2023. Este caso es de especial interés por la recurrente falla de la infraestructura ubicada en este corredor vial. Dado a que se trata de un suceso reciente no se cuenta con información oficial relacionada con el colapso de la falla, por esta razón, pertinente al tema del presente documento y a la constante preocupación de la ingeniería nacional, se presenta un análisis de la falla aclarando que no se pretende llegar a un veredicto sobre lo sucedido, únicamente se encaminará el ejercicio investigativo omitiendo todo tipo de suposiciones dado a la sensibilidad del asunto.

Para el desarrollo del procedimiento investigativo se propondrá una metodología de investigación de falla basada en una combinación de las metodologías expuestas en el Capítulo II y representada por la ilustración 103.

Como se observa seguidamente, la metodología consistirá en la ejecución de análisis cualitativos como el planteamiento de un diagrama de flujo, en donde se incorporan técnicas de análisis no destructivas como el reconocimiento visual y la evaluación mediante fotografías, en conjunto con la recopilación de toda la documentación existente relacionada con diseños, estudios, contratos e impactos tanto sociales como medioambientales.

En adición, una vez completadas las técnicas de análisis no destructivas, será necesario continuar con la evaluación mediante análisis semi destructivos para la determinación de todas las propiedades físicas, inclusive será propio determinar todas las afectaciones químicas sobre la matriz del material de construcción (concreto, acero de refuerzo, acero en torones de presfuerzo).

Una vez establecidas y determinadas todas las propiedades físicas, de acuerdo con la metodología planteada, será propio continuar el análisis mediante la metodología cuantitativa, en donde se determine mediante análisis estructural el estado actual de la estructura (refiriéndose tanto al tramo de puente colapsado como al que continua en pie). Es

importante este análisis ya que permitirá la determinación de la causa específica de falla con el fin de establecer soluciones socioeconómicas para la región afectada.

Finalmente, será esencial realizar análisis mediante metodologías físicas y mediante el uso de técnicas de análisis destructivas equivalentes a pruebas de cargas sobre los segmentos del puente que no colapsaron, esto siempre que la estrategia de solución para dar continuidad a la conectividad de las regiones se base en la reconstrucción del tramo de puente colapsado.

Quiere decir entonces que la estrategia planteada para la determinación y evaluación de la falla para esta estructura involucrará todas las tipologías de metodologías para la investigación de fallas presentadas anteriormente en conjunto con todas las clases de análisis sobre la estructura (no destructivos, semi destructivos y destructivos), esto debido al gran impacto de esta obra de infraestructura y al alcance de la investigación misma.

Mas adelante, se aporta con los primeros pasos investigativos para el desarrollo de esta metodología en cuanto a recopilación de información existente y antecedentes ya que, debido al hermetismo y a la delicadez del asunto en cuestión, no se dispone gran cantidad de información abierta al público. Es importante resaltar que la ejecución particular de esta investigación requerirá de involucrar profesionales expertos a fines en diferentes campos, no solo en ingeniería estructural; será necesaria la intervención de especialistas en temas hidráulicos, hídricos, geotécnicos, geológicos, topográficos, contractuales, ambientales entre otros.

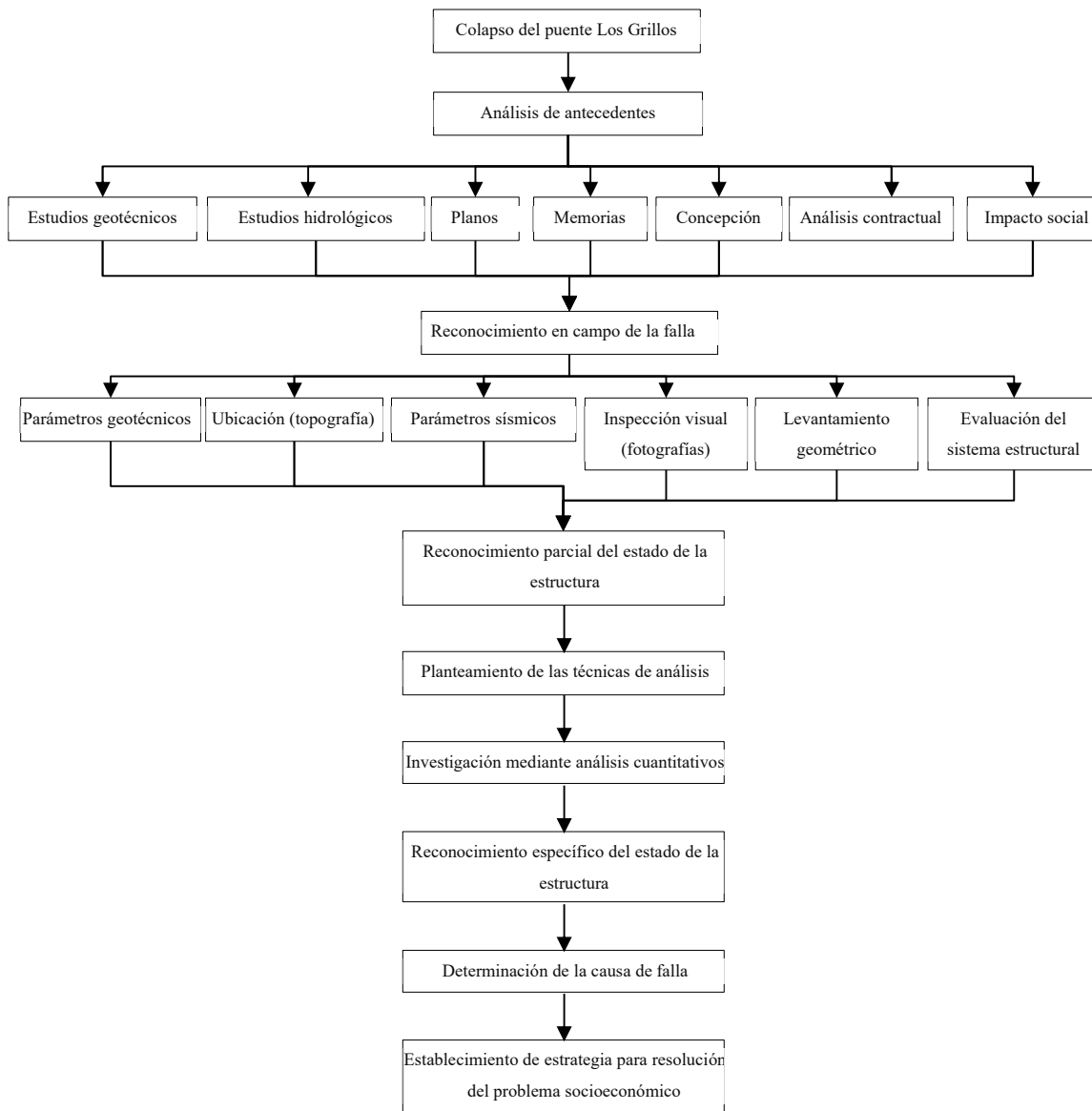
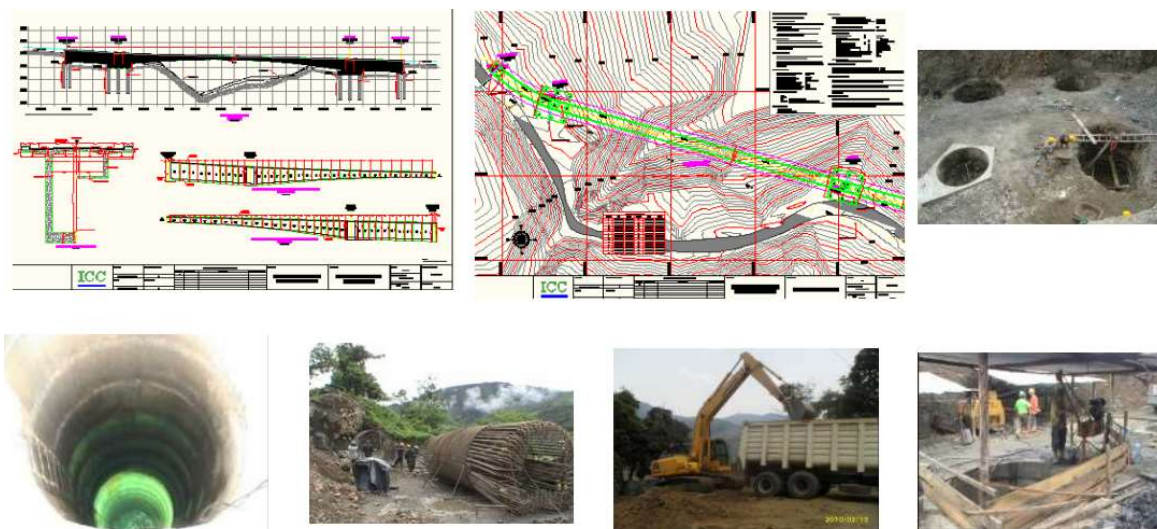


Ilustración 103 Diagrama de flujo para el planteamiento general de estrategia de evaluación para el caso de colapso del puente Los Grillos

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al reconocimiento de la estructura en conjunto con sus antecedentes se tiene la siguiente información; el puente los Grillos contaba con una longitud de 262 m, este se encontraba ubicado en el corredor vial Sogamoso – Aguazul entre Boyacá y Casanare, concretamente ubicado en el kilómetro 81.08 y el kilómetro 81.34. Su construcción fue desarrollada por el consorcio Gestión Vial Nacional compuesto por Conconcreto,

Constructora MC Cusiana y Horacio Vega Cárdenas, por su parte, el INVIAS tenía a su cargo el mantenimiento de este. Algunas de las evidencias de su diseño y proceso constructivo se aprecian en la ilustración 104.



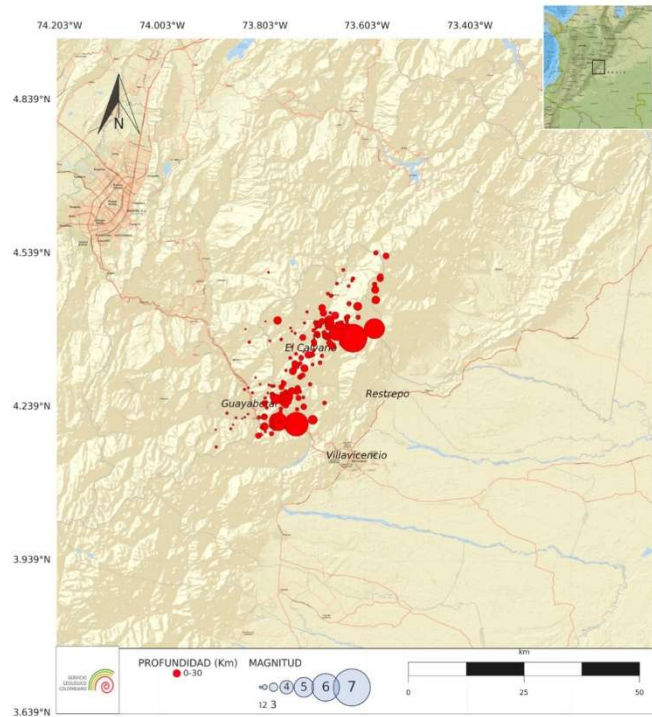
*Ilustración 104 Construcción puente Los Grillos
Fuente: (INVIAS, 2011)*

En su trabajo “Análisis del contexto regional sobre la incidencia de las inestabilidades geotécnicas en el sector Peña de Gallo en la vía del Cusiana del municipio de Pajarito (2020)” Gracia, Murcia y Torres realizaron un análisis de geotecnia en donde encontraron que la composición del suelo “en pendientes altas de laderas, las lluvias con régimen monomodal de 8 meses de duración características del sector son detonantes ante el fenómeno de deslizamiento de tierras” (pág. 11). A su vez, mediante el análisis realizado logran establecer que la amenaza por remoción en masa es de carácter alto y muy alto en porcentajes 99 % del área de intervención (destacando que este estudio fue realizado para sectores aledaños a la ubicación del puente Los Grillos – vía Cusiana), con lo cual dada la normativa colombiana se establece que el sector debe ser intervenido con el fin de mejorar la estabilidad, procurando el mejoramiento o la protección de las condiciones geológicas y geomorfológicas.

Por su parte Concreto (2023) mediante un comunicado oficial comenta que durante la etapa constructiva del proyecto se evidenciaron movimientos de tierra de gran magnitud con potencial riesgo de afectación a las estructuras del corredor vial, por lo cual se tomó la decisión de ejecutar estudios geológicos que ayudarán al control y estabilización de la zona mediante la ejecución de algunas de las obras de contención otorgadas por dicho análisis.

El 17 de agosto de 2023 se registra una serie de sismos comprendidos entre los 0.7 y los 6.1 grados en la escala de Richter a profundidades menores de 20 km con localización en el departamento del Meta en los municipios de El Calvario y Villavicencio como se muestra en la ilustración 105 (Servicio Geológico Colombiano, 2023). Dado al suceso se registraron desprendimientos de rocas en la vía entre Bogotá y Villavicencio, con lo cual Coviandina anunció el cierre de dicho tramo y, por tanto, se incentivó el uso de corredores alternativos para acceder al departamento del Meta.

Dado al cierre de la vía principal al llano se incentiva el uso de vías alternas; una de estas comprende el uso del puente Los Grillos; el puente registra su colapso el día 20 de agosto de 2023, sin embargo, al momento de la falla este se encontraba temporalmente deshabilitado debido a una emergencia producida en el puente Quebrada Negra ubicado en el km 84 de esta misma vía.



*Ilustración 105 Distribución del evento sísmico en los departamentos de Meta y Cundinamarca.
Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2023)*

La anterior información corresponderá por tanto a una etapa muy temprana de investigación en materia de información técnica, como consecuencia será necesaria la recopilación en campo de la mayor cantidad de evidencia para lograr continuar con la metodología propuesta, en este punto es eficaz sacar provecho de tecnologías como el uso de drones para la toma de fotografías panorámicas ya que la accesibilidad a la zona es compleja; en la ilustración 106 se muestra la condición del puente posterior a su colapso.



*Ilustración 106 Colapso de puente Los Grillos
Fuente: (El Tiempo, 2023)*

Dada la visita a campo y enmarcado a la importancia del asunto será propicia la toma de muestras de todos los materiales de construcción del puente que hagan parte del sistema estructural, esto con el fin de establecer todas propiedades mecánicas representativas; sin embargo, este análisis deberá contar con una caracterización propia del suelo con el fin de determinar posibles factores incidentes sobre la estructura asociados a un posible movimiento de masa provocado por la reciente actividad geológica.

En la recopilación de evidencias, se evaluarán las condiciones de la falla involucrando posibles hipótesis sobre la misma, será posible entonces determinar el factor detonante de la falla. Un claro indicio de partida será la identificación según la evidencia de una falla dúctil o una falla súbita del puente; de la misma forma será esencial el estudio detallado del diseño estructural y los procedimientos constructivos empleados.

Las magnitudes presentadas por los sismos en días previos plantean la hipótesis de la falla estructural causada por estas aceleraciones en la base; sin embargo, es clave anotar que los registros de aceleraciones presentados por el sismo del 17 de agosto de 2023 no son equivalentes a un sismo de diseño para este tipo de estructuras.

Se cuenta con el precedente de movimientos de masa sobre este importante corredor vial (incluso sobre la etapa de construcción), por tanto, deberá estudiarse la falla del puente desde etapas tempranas del proyecto, es fundamental estudiar la concepción de este dado a que la zona en donde se localiza se conoce como una zona geológicamente activa, condición que pudo influir en el colapso de la estructura.

Por tanto, la investigación del colapso del puente Los Grillos será una tarea de suma relevancia que establecerá las posibles causas de falla de la estructura, representará entonces un aporte significativo al crecimiento de la ingeniería nacional como voz de alerta en materia de desarrollo de infraestructura previendo sucesos catastróficos mediante el análisis detallado de riesgos desde etapas de concepción.

La constante preocupación de la ingeniería nacional en materia de inversión pública en infraestructura ha sido creciente dado a los antecedentes de colapsos y fallas presentadas en puentes tanto de tránsito vehicular como de tránsito peatonal. Existe un amplio registro de fallas que han afectado la infraestructura de Colombia, en la tabla 10 se muestran algunos de los puentes en conjunto con su causa de falla registrados en el periodo comprendido entre los años 1986 hasta el año 2000 recopilado por Muñoz Díaz (2002).

Como conclusión de su trabajo Muñoz (2002) menciona que, restando los casos de colapso de puentes por atentados terroristas, la causa más frecuente de fallas, con el 35% de los casos presentados en el análisis, está dada a los efectos de socavación de las pilas o estribos, por esta razón se hacen necesarios esfuerzos en materia de estudio y formulación de metodologías para el análisis de socavación general y local al igual que estudios detallados y racionales a la hora de la concepción de una estructura.

Tabla 10: Registro de colapso de puentes en Colombia desde el año 1986 hasta el año 2000

| Fecha colapso | Nombre del puente | Causa del colapso |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1986 | Cobaria | Socavación |
| 04-may-1993 | El Limón | Fallo Catastrófico |
| 03-oct-1993 | Samaná | Deficiencias Estructurales |
| 26-may-1994 | Guillermo León Valencia | Socavación |
| 27-may-1994 | Barranca de Upía | Socavación |
| 06-jun-1994 | Los Ángeles | Deficiencias Estructurales |
| jul-1994 | Río Casanare | Socavación |
| jul-1994 | Río Carare | Socavación |
| 29-nov-1994 | Río Pató | Socavación |
| 11-nov-1994 | San Luis | Socavación |
| 16-jun-1995 | El Secreto | Socavación |
| 20-jun-1995 | Heredia | Deficiencias Estructurales |
| 1995 | Avirama | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Itaibe | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Juntas | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Naranjal | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Nolasco | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Moras | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Cohentando | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Ricaurte | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Simbola | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Capri | Fallo Catastrófico |
| 1995 | La Troja | Fallo Catastrófico |
| 1995 | El Guajiro | Socavación |
| 1995 | Itaibe | Fallo Catastrófico |
| 1995 | Nolasco | Fallo Catastrófico |
| 07-ene-1996 | Pescadero | Deficiencias Estructurales |
| 18-ene-1996 | Purnio | Falta de Mantenimiento |
| abr-1996 | Sabandija | Socavación |
| ago-1996 | Rio Sevilla | Sobrecarga e Impacto |
| 19-nov-1996 | Jorge Gaitán Duran | Socavación |
| 02-oct-1997 | Maizaro | Deficiencias Construcción |
| 1997 | La Granja | Atentados Terroristas |

| | | |
|-------------|-------------------------|----------------------------|
| 1997 | La Conguta | Atentados Terroristas |
| 1997 | Villartega | Atentados Terroristas |
| 1997 | Matanzas | Fallo Catastrófico |
| 15-abr-1998 | Recio | Deficiencias Estructurales |
| 04-oct-1998 | Apure | Sobrecarga e Impacto |
| 02-dic-1998 | Viao | Atentados Terroristas |
| 12-abr-1999 | Tasido | Atentados Terroristas |
| 16-sep-1999 | Argelino Durán Quintero | Sobrecarga e Impacto |
| 01-nov-1999 | La Gómez | Socavación |
| 1999 | Peatonal | Deficiencias Estructurales |
| 1999 | Peatonal | Deficiencias Construcción |
| 21-mar-2000 | Cubugón | Atentados Terroristas |
| 10-abr-2000 | La Honda | Atentados Terroristas |
| abr-2000 | El Caminito | Atentados Terroristas |
| abr-2000 | Costa Rica | Atentados Terroristas |
| 20-may-2000 | Pontón Cachuca | Atentados Terroristas |
| 12-jun-2000 | Colorado | Atentados Terroristas |
| 01-jul-2000 | Guaduas - Cabezas | Socavación |
| 09-jul-2000 | Pontón | Atentados Terroristas |
| ago-2000 | Pénjano | Atentados Terroristas |
| 15-sep-2000 | Pontón Tolima | Atentados Terroristas |
| sep-2000 | Tobasía | Socavación |
| oct-2000 | Molino Viejo | Atentados Terroristas |
| 2000 | Tobia-Grande Puerto | Deficiencias Construcción |
| 2000 | únete | Socavación |
| 10-feb-2001 | Río Negro | Atentados Terroristas |
| feb-2001 | El Mango | Atentados Terroristas |
| feb-2001 | Paso a desnivel | Atentados Terroristas |

Fuente: (Muños Díaz, 2002)

Adicionalmente, en los últimos años se han presentado fallas emblemáticas de puentes como las mostradas en la tabla 11 con las cuales la preocupación colombiana sobre el desempeño de la ingeniería nacional ha incrementado, planteando diferentes interrogantes orientados

hacia la confiabilidad y buen desempeño de los profesionales vinculados al área de la construcción.

Tabla 11: Colapsos representativos de puentes en Colombia

| Fecha colapso | Nombre del puente | Localización | Afectación | Observación |
|----------------------|--------------------------|---|--------------------------|---------------------------------------|
| 20-ago-23 | Puente los Grillos | Boyacá – Casanare (Transversal del Cusiana) | Daños materiales | Puente 262 metros, inaugurado en 2015 |
| 12-abr-23 | El Alambrado | Quindío – Valle | Dos muertos y 15 heridos | Construido en 1984 |
| 20-ago-22 | Caño Caimán | Vía San Marcos-Majagual | Daños materiales | |
| 26-nov-18 | La Pala | Vía al llano | 5 muertos y 1 herido | |
| 15-ene-18 | Chirajara | Vía al llano | 9 muertos y 8 heridos | Colapsa durante construcción |
| 16-feb-16 | Guayepo | Vía que comunica San Jorge con La Mojana | Daños materiales | |
| 23-ago-16 | Charte | km 91 vía Monterrey-Yopal | 9 heridos | |
| 01-feb-15 | Puente Cantón Norte | Bogotá - Carrera 11 calle 103 | 42 heridos | Falla durante prueba de carga |
| 04-ago-14 | Los Garzones | Vía Montería-Cereté | 29 heridos | Falla durante vaciado de placa |

Fuentes: (Criterio, 2023); (Infobae, 2023); (El Universal, 2022); (El Tiempo, 2018); (Portafolio, 2018); (INVIAS, 2016); (El Tiempo, 2016); (El Espectador, 2020) y (Portafolio, 2014)

Es destacable el amplio número de fallas presentadas en estructuras de infraestructura como puentes, es aún más preocupante que dichas estructuras no lleguen siquiera a cumplir su etapa de vida útil o tan siquiera lleguen a ponerse al servicio antes de su colapso, eventos que muchas veces no solo se traducen en pérdidas económicas, sino que trasciende a pérdidas de vidas humanas y afectaciones en la flora y la fauna de los ecosistemas. Es de vital importancia

la acción e intervención de agentes reguladores que generen medidas de control para evitar futuras tragedias.

Capítulo X

Contribución, conclusiones y recomendaciones

Se genera un documento explicativo de las metodologías para investigación de fallas de estructuras de concreto orientado al análisis y divulgación de información, logrando establecer una aproximación sustancial entre la industria de la construcción nacional y la filosofía principal de la ingeniería estructural.

Es importante el conocimiento sobre todas las metodologías existentes para el análisis e investigación de fallas debido a que la mejor estrategia metódica para el análisis de una estructura, por lo general, será la combinación de varias de estas metodologías siendo única para la evaluación de cada proyecto; por tanto, es esencial el conocimiento de las ventajas y desventajas de cada una de las tipologías de análisis de falla debido a que estas determinarán el éxito de la investigación.

Es esencial por parte de los evaluadores contar con el conocimiento sobre las causas generales y específicas de falla, de esta manera se logrará un diagnóstico adecuado y una correcta aplicación de las metodologías de identificación de fallas. La experiencia y criterio de los evaluadores será de esencial importancia al momento de seleccionar la mejor metodología para investigación de falla aplicable para el proyecto; esta determinará la eficiencia en los procedimientos evaluativos. En los casos de falla no se podrá atribuir la responsabilidad a una única causa de falla; esta será un acumulado de varias causas de falla que desencadenan un tren de falla.

Es evidente el trabajo adicional que se requiere en el ámbito nacional en el área de las patologías estructurales dada la escasa formación de profesionales en el campo de la investigación de fallas de estructuras, por tanto, se presenta un escaso conocimiento en la materia y se resalta la necesidad de incorporar formaciones específicas en los profesionales

orientado a la identificación temprana de patologías estructurales. Dicho desconocimiento contribuye a muchas de las tipologías de fallas de estructuras, siendo evidente que en su mayoría las fallas generadas se producen por errores humanos, bien sea por escasa formación y conocimiento del comportamiento de los materiales dada la escasa capacitación particular del ingeniero en temáticas básicas como el diseño o construcción o por conocimiento escaso de la mecánica estructural y comportamiento del material.

Así mismo, es preciso anotar la responsabilidad de la ingeniería estructural en materia de preservación de la vida, es necesario destacar la importancia de la ética profesional y del impacto que tiene una obra civil para la calidad de vida de la sociedad en especial en países en vía de desarrollo como Colombia en donde la intervención de estructuras por fallas resulta en tareas de extrema complejidad dada la limitación en los recursos.

Existe en el país una necesidad latente de implementación de organismos que contribuyan a la divulgación y análisis de los casos de fallas nacionales, de esta manera las lecciones aprendidas no se limitaran a aquellas asociaciones herméticas nacionales o asociaciones formales internacionales con escaso reconocimiento en el gremio de la ingeniería del país, sino que se lograrán transmitir a todos aquellos involucrados en las actividades de construcción; esto contribuirá a evitar errores comunes que por falta de conocimiento se cometen en el día a día en la industria de la construcción. Así mismo, será de especial interés el fomentar el acceso a construcciones formales que garanticen el cumplimiento de los mejores estándares en la construcción en pro de la seguridad y de la vida. Una de las principales preocupaciones en el país no tratada en el presente documento es la construcción informal en donde se hace complejo evaluar la durabilidad con las buenas prácticas de la construcción; para esta tarea difícil es aconsejable el empleo de las recomendaciones emitidas por el comité 400 del AIS vulnerabilidad sísmica y evaluación de daños (Comité AIS 400, 2023).

Finalmente, se hace evidente la necesidad de complementar mediante la ampliación del presente documento con la adición de trabajos de investigación de metodologías de fallas en

estructuras diferentes al concreto, estos deberán basarse en el uso de los materiales más típicos de la construcción nacional como la guadua, la mampostería, el acero, la tapia o el bahareque, de manera que se cuente con un documento completo y provechoso para la industria colombiana.

Como campo de trabajos adicionales a el presente documento, se podría aportar con las diferentes alternativas de técnicas de reparación y reforzamiento para estructuras de concreto, de esta manera se generará un documento sólido para la identificación y tratamiento de fallas. Será importante destacar la acción del documento como guía orientadora mas no como solución de diseños de reparaciones o reforzamientos dada a la especial caracterización y tratamiento de cada una de las estructuras.

Referencias

- Aceros Arequipa. (16 de Diciembre de 2022). *Errores en procesos constructivos: ¿cómo evitarlos?* Obtenido de <https://www.construyendoseguro.com/errores-en-procesos-constructivos-como-evitarlos/>
- ACI 228.2R. (2013). *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI 305R-20. (2020). *Guide to hot weather concreting*. American Concrete Institute.
- ACI 306R-16. (2016). *Guide to cold weather concreting*. American Concrete Institute.
- ACI 318-19(22). (2022). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI 364.1R-19. (2019). *Guide for Assessment of Concrete Structures before Rehabilitation*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI 437R-19. (2019). *Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings*. American Concrete Institute.
- ACI 562-21. (2021). *Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures - Code and Commentary*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI-221.1R-98. (2008). *Report on Alkali-Aggregate Reactivity (Reapproved 2008)*. American Concrete Institute.
- ACI-224-01. (2008). *Control of Cracking in Concrete Structures (Reapproved 2008)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Aguiar Falconi, R. (28 de Julio de 2015). *El mega sismo de Chile 2010 y lecciones para Ecuador*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/280495058_El_mega_sismo_de_Chile_de_2010_y_lecciones_para_Ecuador
- Aguilar Chávez, L. A., Rodríguez Medina, M. A., Poblano Ojinaga, E. R., Alvarado Tarango, L., & Pinto Santos, J. A. (2023). *Análisis de fallas usando dfmea, árbol de fallas y redes bayesianas*. Juárez, chihuahua: IPSUMTEC6.

- AIS. (2011). *Guía de patologías constructivas, estructurales y no estructurales. Guía técnica para inspección de edificaciones después de un sismo*. Bogotá: FOPAE.
- AIS. (2018). *Guía técnica para la inspección de edificaciones después de un sismo*. Bogotá: Asociación colombiana de ingeniería sísmica.
- Allsopp, D., Seal, K. J., & Gaylarde, C. C. (2004). *Introduction to Biodeterioration*. New York: Cambridge University.
- Alonso, M., & Flor Laguna, V. (2013). Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio. *ALCONPAT*, 1-16.
- Alva Ortega, M. (2019). *Determinación y evaluación de patologías del concreto en el reservorio del sistema de agua potable en la localidad de Cochaongo, distrito de Yungay, provincia de Yungay, Region Ancash -2017*. Chimbote: Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote.
- Alvarado Flores, F. L., & Escudero Panduro, H. (2021). *Evaluación de patologías y su influencia en una propuesta de mantenimiento de las edificaciones de concreto armado en el distrito de Juan Guerra, provincia y departamento de San Martín*. Tarapoto: Universidad Científica Del Perú - UCP.
- Álvarez Torres, W. F., & Vargas Calvo, A. D. (2023). *Inclusión en el contenido curricular de la escuela técnica de formación bomberil de Villavicencio del comportamiento de los materiales de construcción cuando son sometidos a altas temperaturas*. Villavicencio: Universidad Piloto de Colombia.
- Amaya Arciniegas, M. A. (2021). *Modelo Meso-Mecánico del Proceso de Fractura del Concreto Simple*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Amaya Pico, M. (2017). *Alternativa de Continuidad en Puentes con Vigas de Concreto Prefabricado*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- An Ingenieros y Consultores. (2021 de abril de 2021). Obtenido de <https://www.anic.com.mx/post/asentamientos-en-suelos>
- Anadolu, G. S.-A. (23 de Agosto de 2018). Tribunal colombiano condenó a la Nación por atentado a club en Bogotá.
- Andersen, B., & Fagerhaug, T. (2006). *Root Cause Analysis*. Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality.

- Arango Mejía, S. (27 de Octubre de 2013). *Patología del concreto "Causas de daños en el concreto"*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/SergioPap/patologia-del-concreto-causas-de-daos-en-el-concreto>
- Arévalo Mejía, J. E., & Sobero Alania, M. C. (2020). *Incumplimiento con la calidad adecuada en los procesos constructivos de obras de edificación, caso de estudio de centro comercial*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Argos. (03 de Junio de 2022). *Fallas en estructuras de concreto*. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/fallas-en-estructuras-de-concreto/>
- Argos. (07 de Junio de 2022). *Tres aspectos importantes para la remoción de las formaletas en una edificación*. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/remocion-formaletas-en-una-edificacion-1-1/>
- Arkiplus. (17 de Enero de 2016). *Fallas estructurales de edificios*. Obtenido de <https://www.arkiplus.com/fallas-estructurales-de-edificios/>
- Arone Huallpa, A. M. (2022). *Evaluación de patologías del concreto y vulnerabilidad sísmica en una vivienda autoconstruida del siglo XXI – Moquegua, 2020*. Moquegua: Universidad José Carlos Mariátegui.
- Arqa. (05 de Agosto de 2020). *Patología de las construcciones: desprendimientos de cerámicos*. Obtenido de <https://arqa.com/empresas/novedades/patologia-de-las-construcciones-desprendimientos-de-ceramicos.html>
- Arqzon. (29 de Septiembre de 2021). *Fallos más comunes en columnas de concreto*. Obtenido de <https://arqzon.com.mx/2021/09/29/fallos-mas-comunes-en-columnas-de-concreto/>
- ASCE. (2018). *Guidelines for Failure Investigation*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- ASCE/SEI 11. (2000). *Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Asencio Rodriguez, C. H., & Galdos Carrillo, E. W. (2022). *Monitoreo de la salud estructural en viviendas de albañilería confinada y sensores de aceleración sísmica en el distrito de Puente*. Lima: Universidad César Vallejo.

- ASTM C 289 - 07. (2016). *Método de Ensayo Estándar para Reactividad potencial Alcali-Sílice de Agregados*. Montgomery: ASTM International.
- ASTM E2713-18. (2018). *Standar Guide to Forensic Engineering*. American Society for Testing and Materials International.
- Atao Huamán, J. W. (2020). *Comportamiento en Flexocompresión de Columnas y Muros Estructurales de Concreto Armado: Estado del Arte*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
- Audeves Pérez, S., Solís Carcaño, R., Álvarez Romero, S., & Martínez Álvarez, A. (2013). *Causas de fallas constructivas presentadas en proyectos viviendas*. Mérida: Compilación artículos de administración y tecnología para la arquitectura, diseño e ingeniería 2013 - Universidad de Autónoma de Yucatán.
- Basset Salom, L. (2023). *Proceso de diagnóstico y técnicas de inspección en estructuras de hormigón*. València: Universidad Politecnica de Valencia.
- Becker, E. (2009). *Seminario Internacional sobre Construcción de Pavimentos de Hormigón Durables*. Bogotá.
- Beltran Riveros , A. A. (2011). *Uso de fibras de carbono como reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Benítez, P., Rocha, E., & Rodrigues, F. (2020). Estrategias para la inspección óptima de estructuras de hormigón armado sujetas a corrosión. *Revista de Ciencia Tecnología e Innovación Vol2 +INGENIO*, 46-58.
- BibLus. (14 de Noviembre de 2022). *Tipos de errores de diseño y responsabilidades*. Obtenido de <https://biblus.accasoftware.com/es/tipos-de-errores-de-diseno-y-responsabilidades/>
- Blanco, M. (2012). Criterios fundamentales para el diseño sismoresistente. *Universidad de Venezuela U.C.V Vol 27 N°3*, 71-84.
- bloggauta wordpress*. (30 de Marzo de 2011). Obtenido de www.bloggauta.wordpress.com/2011/03/30/colapso-de-un-edificio-en-shanghai-volcamiento/
- Breuge, K., & Beek, T. A. (2017). Envelhecimento de estruturas de concreto antigas e modernas - Observações e pesquisas. *Revista de la Asociación Latinoamericana de*

- Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción ALCONPAT*, 57-72.
- Broto, C. (2006). *Enciclopedia Broto de Patologías de la Construcción*.
- Burgos, E., & Sigüenza, E. O. (2022). *Modelado de estructuras con ETABS*. Antiguo Cuscatlán: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas UCA.
- Cando, D. (2016). *Diseño e implementación de un soporte de medidor de nivel de agua a través de un sensor ultrasónico para pasos deprimidos*. Universidad tecnológica israel.
- Carrión Zamora, N. (2016). *Evaluación de la incidencia de las irregularidades 4P, 4A y 1A en el comportamiento estructural de edificaciones mediante un análisis no lineal modal pushover*. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Casado Sánchez, C. M., Sanz, J., Muñoz Díaz, I., & Poncela Méndez, A. (2011). Control de Vibraciones en Pasarelas Peatonales. *Dyna*, 318-327.
- Casas Figueroa, L. H. (2018). *Humedades*. Cali: Universidad del Valle - Programa Editorial.
- Castillo Ninatanta, J. L. (2019). *Factores intrínsecos del concreto premezclado que producen la fisuración en su proceso de fraguado*. Trujillo: Universidad Privada Antenor Orrego.
- Castro Castañeda, M. J. (2022). *Estructura para la Defensa desde el Papel del Investigador en el Sistema Penal Acusatorio*. Bogotá: Universidad Libre.
- Ccallo, R. (2016). *Comportamiento y capacidad de muros estructurales de hormigón armado frente a solicitaciones sísmicas*. Escola De Camins.
- Cerna Vásquez, M., & Galicia Guarniz, W. (2010). *Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material*. Trujillo: Universidad Privada Antenor Orrego.
- Chacon Sierra, J. S., & Lopez Garcia, G. A. (2021). *Patologías del concreto en estructuras años 80 a los 90*. Bogotá: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Chavez Bocanegra, B. A., & Vasquez Ruiz, K. R. (2021). *Análisis económico del uso de la fibra macrosintética Sikafiber Force-60 mediante el software sika®fiber save para losas industriales de concreto*. Trujillo: Universidad Privada Del Norte.

- Chinchón-Payá, S., Torres, J., Rebolledo, N., & Sánchez, J. (2021). *Evaluación del estado de elementos estructurales del Mercado de Legazpi: Ataque por sulfatos al hormigón y corrosión de las armaduras*. *Informes de la Construcción*, Vol. 73, 561, e380.
- CILA. (2019). Determinación del límite de endurecimiento a fatiga (fel) de mezclas asfálticas elaboradas con residuos de concreto y demolición. México: Congreso Iberoamericano Del Asfalto.
- Cirilo Manzanares, C. (2013). *Revisión de estados límite en estructuras*. Mexico D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Colpari Pozzo, M. H. (2020). *Uso de inteligencia artificial para la detección automatizada de fisuras en estructuras de hormigón armado*. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Comité AIS 400. (2023). *AIS 410-23: Evaluación Y Reducción De La Vulnerabilidad Sísmica En Viviendas De Mampostería*. Bogotá: Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica.
- Concreto. (23 de Agosto de 2023). *Comunicado oficial Consorcio CC - MP - HV Cusiana en relación al colapso de un tramo del puente "Los Grillos"*. Obtenido de https://www.instagram.com/p/CwQYddIL1iX/?utm_source=ig_web_copy_link&igshid=MzRIODBiNWF1ZA==
- Constro Facilitator*. (21 de Noviembre de 2019). Obtenido de <https://constrofacilitator.com/concrete-delamination-causes-and-how-to-avoid-it/>
- Construblog. (2 de Julio de 2023). *WoldPress*. Obtenido de construblogspain.files.wordpress.com/2013/09/dsc03059-large.jpg?w=940&h=704
- Cortez Chamorro, J. D., & Orellana Chicaiza, W. A. (2021). *Evaluación del comportamiento estructural de conexiones semirrígidas unión viga - columna sometida a flexión mediante el análisis por elementos finitos*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito.
- Criterio. (22 de agosto de 2023). *Los \$5 mil millones que se perdieron en la caída del puente Los Grillos*. Obtenido de <https://diariocriterio.com/colapso-puente-los-grillos-pajarito-casanare/>

- Cuásquer Viveros, M., & Moreno Cortés, A. L. (2021). Estudio sobre los diagramas de flujo en la resolución de problemas matemáticos. *Revista UNIMAR V 39*, 45-55.
- Cueva del ingeniero civil*. (25 de Abril de 2011). Obtenido de <https://www.cuevadelcivil.com/2011/04/grietas-por-fallo-de-adherencia-por-la.html>
- Culma Rodríguez, C. C., & Forero Osorio, C. (2021). *Guía metodológica para el reconocimiento in situ de patologías del concreto*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Daños en estructuras de concreto*. (28 de Marzo de 2021). Obtenido de <https://www.libreingenieriacivil.com/2021/03/danos-en-estructuras-de-concreto-armado.html>
- Decoloración del concreto*. (2017). Obtenido de Toxement: https://www.toxement.com.co/media/3420/decoloracio-n_concreto.pdf
- Díaz Saucedo, T. G. (2021). *Metodología de evaluación para el riesgo de socavación de puentes patrimoniales de arco mampostería*. Aguascalientes: Universidad autónoma de Aguascalientes.
- Dlupal. (3 de Julio de 2019). *Software de análisis y dimensionamiento de estructuras*. Obtenido de Carga de impacto de un automóvil de pasajeros en una cochera: <https://www.dlupal.com/es/soporte-y-formacion/soporte/base-de-conocimientos/001579>
- Domínguez Gómez Trejo , S. E. (2017). *Vivienda Emergente y Sustentable con Sistemas Estructurales de Bambú*. Jalisco: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.
- Edgar Vacas, N. (2016). *Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Alcali -Silice en hormigón*. Barcelona: Escola de Camins UPC BARCELONATECH.
- Edilton Rodrigues, N. F. (2021). *Comparativa en resultados de diseño de una estructura de concreto basada en reglamentos NTC-CDMX, ACI-318 y diseño por desempeño*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Effio Reátegui, M. A., & Quiñones Ticse, I. J. (2021). *Propuesta de sistema constructivo de losas industriales sin juntas de contracción, reforzadas con fibras metálicas y aditivo*,

- minimizando su retracción y cambio volumétrico, en Lima.* Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Eitb.eus.* (5 de Julio de 2012). Obtenido de <https://www.eitb.eus/es/noticias/internacional/detalle/918677/informe-fukushima--el-accidente-fue-desastre-hecho-hombre/>
- El Comercio.* (17 de Julio de 2015). Obtenido de <https://elcomercio.pe/sociedad/ica/colapso-puente-que-unia-canete-y-chincha-fotos-noticia-1826575/?ref=ecr>
- El Espectador. (30 de Agosto de 2020). *Ejército, demandado por colapso de puente en el Cantón Norte.* Obtenido de <https://www.elespectador.com/judicial/ejercito-demandado-por-colapso-de-puente-en-el-canton-norte-article/>
- El País.* (4 de Agosto de 2020). Obtenido de https://elpais.com/elpais/2020/08/05/album/1596626628_206818.html#foto_gal_9
- El Tiempo. (23 de Agosto de 2016). *Gobierno Nacional buscará alternativas a incomunicación de Casanare.* Obtenido de <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/colapso-puente-sobre-el-rio-charte-45576>
- El Tiempo. (27 de noviembre de 2018). *Cinco muertos por caída de estructura en obras de vía al Llano.* Obtenido de <https://www.eltiempo.com/bogota/cinco-muertos-por-caida-de-una-torre-en-el-puente-de-via-al-llano-298188>
- El Tiempo. (21 de Agosto de 2023). *Visita al puente 'Los Grillos'.* Obtenido de https://www.instagram.com/p/CwNtgWSI4rS/?utm_source=ig_web_copy_link&igshid=MzRIODBiNWFIZA==
- El Universal. (21 de Agosto de 2022). *Colapsa puente Caño Caimán: incomunicados comunidades del San Jorge y La Mojana.* Obtenido de <https://www.eluniversal.com.co/regional/sucre/colapsa-puente-cano-caiman-incomunicados-comunidades-del-san-jorge-y-la-mojana-JE7035597>
- Enrique. (20 de septiembre de 2017). *Twitter.com - @_kiketter.* Obtenido de https://twitter.com/_kiketter/status/910633015566409728
- FEMA P-154. (2015). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook - Third Edition.* California: Federal Emergency Management Agency.

- Ferro Web. (14 de Febrero de 2016). *Tipos de esfuerzos físicos*. Obtenido de <https://ferroweb.wordpress.com/2016/02/14/n/>
- Futura America. (21 de 03 de 2022). Obtenido de <https://futuraamerica.com/anti-abrasion-control-desgaste/>
- G.I.S. Ibérica. (26 de Junio de 2023). Obtenido de <http://www.gisiberica.com/fisurometros/FI127.html>
- Gagg, C. R. (2020). *Forensic Engineering The Art And Craft Of A Failure Detective*. New York: Taylor & Francis Group.
- Galán García, I. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- García Castillo, D. F., Murcia Forero, J. A., & Torres Romero, C. E. (2020). *Análisis del contexto regional sobre la incidencia de las inestabilidades geotécnicas en el sector Peña de Gallo en la vía del Cusiana del municipio de Pajarito*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Gaylarde, C., Ribas Silva, M., & Warscheid, T. (2003). Microbial impact on building materials: an overview. *Matériaux et Constructions, Vol 36*, 342-352.
- Global Rubber Corporation. (4 de Julio de 2023). Obtenido de <https://apoyosdeneoprene.com/>
- Godoy, L., Elaskar, S., Francisca, F., Montoro, M., Rossana, C., Espinosa, S., & Ameijeiras, M. (2019). *Efectos de desastres naturales y accidentes sobre infraestructura y medio físico en sistemas de almacenamiento y transporte de petróleo*. Córdoba: revista facultad de ciencias exactas, físicas y naturales, vol. 6, no. 2, septiembre 2019.
- Guerrero Corona, D. (2022). *Efectos del fuego sobre el hormigón armado. Metodologías para la evaluación y criterios para la rehabilitación de edificaciones*. Santiago: Universidad Andrés Bello.
- Hanampa Mamani, J. M. (2021). *Evaluación cualitativa y cuantitativa de la vulnerabilidad sísmica estructural de una infraestructura educativa a porticada de concreto armado*. Lima: Universidad peruana unión.

- Helene, P., & Pereira, F. (2003). *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón Reparación, Refuerzo y protección*. Sao Pablo: CYTED, Red Rehabilitar.
- Hernández García, J., & Zapata Villa, J. E. (2023). *Eficacia de la aplicación de las normas en materia urbanística por parte de las curadurías y las administraciones municipales, a partir del caso del edificio Space de Medellín*. Pereira: Universidad Libre De Pereira.
- Hernández Gutiérrez, D. (2006). *Sensor de vibraciones con fibra óptica*. Mexico D.F.: Instituto Politecnico Nacional.
- Herrador Barrios, M. F. (2002). *Modelo de comportamiento aplicable a hormigones de edad avanzada afectados por la reacción álcali - silicatos: desarrollo teórico y calibración experimental*. La Coruña: Universidad da Coruña.
- Herrera Gaspar, A. E., & Silva Silva Santisteban, R. (2021). *Análisis técnico-económico entre un muro de gaviones y un muro de suelo reforzado como solución de estabilidad de taludes en la carretera Choropampa*. Lima: Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas.
- Higuera Flórez, H. C. (2016). *Simulación multifásica y multifase del ensayo de migración del ión cloruro en el concreto (NT Build 492) teniendo en cuenta los fenómenos de adsorción e interacción iónica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Holcim Colombia S.A. (2011). Obtenido de Concretos de baja retracción: el presente en pisos industriales y el futuro en pavimentos viales: <https://docplayer.es/21445004-Concretos-de-baja-retraccion-el-presente-en-pisos-industriales-y-el-futuro-en-pavimentos-viales>
- Huacho Ochoa, A. A. (2021). *Control de fisuras por retracción en estado plástico en pavimentos de concreto mediante fibras de polipropileno, Cotabambas, Apurímac 2021*. Huancayo: Universidad Continental.
- Huergo, I., & Hernández, H. (2020). *Control pasivo de vibraciones verticales inducidas por personas en puentes peatonales*. Obtenido de Facultad de Ingeniería, UNAM: www.redalyc.org/journal/404/40465092003/html
- IMCYC. (2013). Fisuras en el concreto ¿Síntoma o enfermedad? *Construcción y tecnología*, 20-23.

Industry Sufer. (05 de Diciembre de 2022). *Causas comunes de errores en el diseño estructural*. Obtenido de <https://industrysurfer.com/blog-industrial/construccion/causas-comunes-de-errores-en-el-diseno-estructural/>

industry surfer. (12 de Mayo de 2023). Obtenido de www.industrysurfer.com/blog-industrial/construccion/que-es-el-agrietamiento-del-hormigoncausas-y-prevencion-de-grietas/

Infobae. (13 de Abril de 2023). *Primera hipótesis respecto a la caída del puente El Alambrado en el Quindío*. Obtenido de <https://www.infobae.com/colombia/2023/04/14/primera-hipotesis-respecto-a-la-caida-del-puente-el-alambrado-en-el-quindio/>

infobae. (30 de Junio de 2023). *Terremoto en el Eje Cafetero: se cumplen 24 años del sismo que paralizó al Quindío*. Obtenido de <https://www.infobae.com/america/colombia/2023/01/25/terremoto-en-el-eje-cafetero-se-cumplen-24-anos-del-sismo-que-paralizo-al-quindio/>

INVIAS. (2011). *Transversal de Cusiana*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/servicios-al-ciudadano/proyectos-invias/corredores-para-la-prosperidad/598-transversal-cusiana/file>

INVIAS. (09 de Agosto de 2012). *La Transversal del Cusiana cada vez más cerca de ser una realidad*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/sala/noticias/779-la-transversal-del-cusiana-cada-vez-mas-cerca-de-ser-una-realidad>

INVIAS. (19 de Febrero de 2016). *INVÍAS apoya solución de emergencia en Puente Guayepo, San Marcos*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/sala/noticias/2511-invias-apoya-solucion-de-emergencia-en-puente-guayepo-san-marcos>

IStock. (3 de Marzo de 2023). Obtenido de <https://www.istockphoto.com/es/foto/estructuras-y-vigas-de-techo-de-hormig%C3%B3n-armado-quemado-despu%C3%A9s-de-un-incendio-gm1470218334-501144170>

- Jiménez Alvarado , E. A., & Merino Requesnes , M. E. (2021). *Evaluación Integral del Estado Situacional del Puente Transversal Piura sobre el Canal Vía Del Distrito De Sullana – Provincia De Sullana – Piura – Perú*. Piura: Universidad Nacional de Piura.
- Jimenez Casaverde, J. L., & Romero Reategui, F. J. (Trujillo). *Diseño de un sistema electrónico de medición de temperatura para la madurez de concreto que cumpla con norma ASTM C 1074*. 2016: Universidad Privada Antenor Orrego.
- La Capital*. (28 de Abril de 2021). Obtenido de <https://www.lacapital.com.ar/la-region/armstrong-el-tanque-agua-se-averio-y-deja-funcionar-siempre-n2657041.html>
- La fatiga de los puentes. (23 de Agosto de 2019). *Revista Ideele N°279*.
- La Terraza, J. (26 de septiembre de 2013). *Rand Engineering & Architecture, DPC*. Obtenido de <https://randpc.com/blog/retainingwalls/>
- Lengua Fernández, M. A. (2013). *Procedimientos constructivos erróneos en edificios de concreto armado*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Lewis Rodríguez, C. J. (2019). *Evaluación de morteros cementicios de reparación por el método del bloque de Baenziger*. Guatemala: 2019.
- Linex*. (20 de julio de 2018). Obtenido de <https://www.linex.mx/agentes-biologicos-aceleran-corrosion-del-concreto/>
- López, A., Pérez, J., Terán, J., & Arroyo, M. (2023). *Metodología para la determinación de las reacciones álcali-sílice (RAS)*. Querétaro: Secretaría de infraestructura, comunicación y transporte: publicación técnica No 727.
- Lozano Guevara, A. M., & Marcas Arrieta, M. M. (2022). *Estudio de criterios de diseño para estados límite en condición de servicio para elementos de concreto armado*. Lima: Pontificia Universidad Católica Del Perú.
- lunnaart15. (15 de Junio de 2022). *Freepik*. Obtenido de https://www.freepik.es/fotos-premium/fondo-textura-hongo-o-moho-sucio-hormigon-aspero_28336453.htm
- Mallo Feijóo, D. (8 de Septiembre de 2012). *Introducción a la fisuración del hormigón*. Obtenido de <http://diegomallof.blogspot.com/2012/09/introduccion-la-fisuracion-del-hormigon.html>

- Mamani Apaza, A. J. (2023). *Metodología de apuntalamiento con cedula 40 para demolición de columnas en la universidad nacional de Moquegua – 2021*. Moquegua: Universidad José Carlos Mariátegui.
- Mancera Hernández, Y. C., & Rojas Quiroz, J. S. (2016). *Separación de fisuras en elementos de SRFC solicitados a tracción par acción para barra número 4 a número 4 y resistencia de concreto resistencia de concreto 21, 28, 35 o 21, 28, 35 y 42 MPA*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- MARCA. (11 de Septiembre de 2022). Obtenido de <https://www.marca.com/tiramillas/actualidad/2022/09/11/631db5a7051f0f001fee74bc-directo.html>
- Marcas Arrieta, M. M. (2022). *Estudio de criterios de diseño para estados límite en condición de servicio para elementos de concreto armado*. Lima: Pontificia Universidad Católica Del Perú.
- Márquez Espinoza, J. M. (2021). *Eficiencia estructural de muros de contención de suelos mecánicamente estabilizados con geosintéticos y gaviones, en las laderas de la quebrada Huaycoloro*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Márquez Peñaranda, J. F., Vergel Ortega, M., & Jácome Carrascal, J. L. (2021). Determinación del error inducido al usar una relación esfuerzo-deformación lineal en el cálculo del momento de fluencia de una sección de viga de concreto reforzado. *Revista boletín REDIPE 10 (7)*, 414-422.
- Martha Cifuentes. (2019 de Octubre de 2019). *El puente La Orquídea en vía Sogamoso-Aguazul, colapsó y no hay responsables*. Obtenido de <https://marthacifuentes.com/portada/2019/10/30/el-puente-la-orquidea-en-via-sogamoso-aguazul-colapso-y-no-hay-responsables/>
- Martínez Forero, M. F., Patiño León, L. R., & Barreto Castillo, W. M. (2020). *Agentes ambientales en construcciones en bambú guadua, metodología de intervención, mantenimiento y prevención*. Bogotá: Universidad La Gran Colombia.
- Maskrey et al. (1993). *Los desastres no son naturales*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

- Mayorga Mayorga, J. (2016). *Evaluación de patologías en estructuras de concreto armado afectadas por corrosión y acción del medio ambiente*. Juliaca: Universidad Alas Peruanas UAP.
- McCormac, J., & Brown, R. (2018). *Diseño de concreto reforzado*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Melgar Beato, J. A. (2018). *Diseño y fabricación de acondicionadores para sensores de humedad*. Escuela técnica superior de ingeniería y sistemas de telecomunicación.
- Meneses Martínez, N. (2012). *Evaluación de la reacción de carbonatación en los estudios de las fases de conglomerados con cemento portland*. Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona – Universidad Politècnica De Catalunya – UPC.
- Milanesi, C. A. (2013). *Estudio de la reactividad alcalina potencial de algunas rocas dolomíticas de la argentina frente a la reacción álcali-carbonato*. Buenos Aires: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Ministerio del Trabajo. (2014). *Guía trabajo seguro en excavaciones*. Bogotá: Ministerio Del Trabajo Comisión Nacional De Salud Ocupacional Del Sector De La Construcción.
- Monje Penagos, M. (2022). *Estado del conocimiento en patología de puentes vehiculares en Colombia*. Neiva: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Monteiro Ramos, V. I. (2013). *Characterization of the potential reactivity to alkalis of Portuguese aggregates for concrete*. Oporto: Universidade do Porto.
- Morales Caballero, J. (2016). *Mapas conceptuales para facilitar la aplicación de normas en la determinación de los efectos del viento*. Mérida, Yucatán: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Moreno, E., Domínguez Lara, G., Cob Sarabia, E., & Duarte Gómez, F. (2004). *Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración*. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Moreno, S. (2010). *Determinación de la profundidad de carbonatación y penetración de cloruros mediante experimentación empleando procesos de difusión en varios diseños de hormigón*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica Del Litoral.
- Muñoz Díaz, E. E. (2002). *Estudio de las causas de colapso de algunos puentes en Colombia*. Bogotá.

- Murillo, C. (2004). *Análisis de las causas que dieron origen a los daños estructurales, en las edificaciones del Estado de Puebla, provocados por el sismo del 15 de junio de 1999*. Universidad de las Américas Puebla.
- Nina Escobar, G. M. (2022). *Evaluación de vulnerabilidad sísmica aplicando métodos cualitativos y cuantitativos en la institución educativa emblemática Santa Rosa, Puno - 2022*. Lima: Universidad César Vallejo.
- Norabuena Espinoza, J. T., & Barrientos Huaypar, J. A. (2022). *Análisis de la disposición de los cables presforzado del sistema de postensado exterior para el reforzamiento estructural del Puente Saihua - Apurimac*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- NSR-10. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismorresistente*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- NTC 174. (2000). *Especificaciones de los agregados para concreto*. Bogotá: ICONTEC.
- Oe, M., Takebayashi, Y., Sato, H., & Maeda, M. (2021). *Mental Health Consequences of the Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima Nuclear Disasters: A Scoping Review*. International Journal of Environmental Research and Public Health.
- Ortega Llarena, A. J. (2006). *Utilización de pruebas de carga en la determinación de posibles problemas en losas de techo de concreto*. Guatemala: Universidad Del Valle De Guatemala.
- Ortiz Soto, D. (2022). *Pérdida por interrupción de negocios establecidos en edificaciones a causa de los sismos del 7 y 19 de septiembre de 2017 en México*. Ciudad De México: Universidad Nacional Autónoma De México.
- Pavia Bermudez, F. J. (2008). *Resistencia aportada por el diseño sismo-resistente en estructuras de concreto reforzado sometidas a carga de explosión*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Peña Mondragón, F. (2010). Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 83*, 43-63.
- Perez Chavez, N. (2021). *La implementación de la metodología welding procedure specification (wps) incrementa la calidad de la fabricación de estructuras metálicas en la empresa cocymet del sur s.a.c*. Lima: Universidad Privada Del Norte.

- Pérez Quiroz, J. T., López Miguel, A., Téllez Martínez, J. S., Maura, A. O., & Terán Guillén, J. (2023). *Estudio del comportamiento del concreto sometido a alta temperatura*. Queretaro: Comunicaciones secretaría de infraestructura, comunicaciones y transporte-Publicación técnica No 726.
- Popayán Apolinario, A. (2020). *Determinación y evaluación de las patologías del concreto del canal de Regadio Mellisho – Turuc Punta, entre las progresivas 3 +000 km al 4 +000 km del distrito de Amashca, provincia de Carhuaz, departamento de Ancash*. Huaraz: Universidad Católica Los Ángeles Chimbote.
- Portafolio. (5 de Agosto de 2014). *Investigarán desplome de puente en Montería*. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/investigaran-desplome-puente-monteria-65970>
- Portafolio. (2018 de enero de 2018). *Coviandes anuncia que hará su propio estudio del puente Chirajara*. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/coviandes-anuncia-que-hara-su-propio-estudio-del-puente-chirajara-513799>
- Potem Engineering. (14 de Febrero de 2017). Obtenido de https://twitter.com/potem_eng/status/831722975770578944/photo/1
- Prensa Libre. (20 de Abril de 2022). *Daño en las juntas metálicas del puente La Leonera causó demoras en la movilidad entre Boyacá y Casanare*. Obtenido de <https://prensalibrecasanare.com/casanare/44822-daso-en-las-juntas-metblicas-del-puente-la-leonera-causu-demoras-en-la-movilidad-entre-boyacb-y-casanare.html>
- Puma Visa, M. S., & Aycachi Huareccallo, J. W. (2020). *Obras cimentadas sobre rellenos no controlados en los distritos de alto de la alianza y ciudad nueva*. Tacna: Universidad Privada De Tacna.
- Qin, D., Gao, P., Aslam, F., Sufian, M., & Alabduljabbar, H. (Junio de 2022). *Science Direct*. Obtenido de A comprehensive review on fire damage assessment of reinforced concrete structures: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521003582>
- Quintero Martínez, Á. M. (2010). *Biodeterioro del concreto: estado del arte y análisis con microscopía electrónica de barrido*. Bogotá: Universidad de los Andes.

- Razo Carrasco, D. G., & García Domínguez, O. (2020). Evaluación integral de la seguridad estructural de edificaciones existentes dañadas por sismos de gran magnitud. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 104*, 51-71.
- Redacción Economía. (30 de Octubre de 2019). Colapsó el viaducto en la Transversal del Cusiana.
- Reyes Estrada, P. (2013). *Desarrollo de gráficos para el control de calidad del concreto hidráulico*. Toluca: Universidad autónoma del estado de México.
- Rivva L , E. (2006). *Durabilidad y Patología del concreto*. Lima: Instituto de la construcción y gerencia.
- Rodríguez Sánchez, C. F. (2020). *Determinación y evaluación de patologías del concreto en las estructuras de cabecera del sistema de agua potable del centro poblado Unchus, distrito de independencia, provincia de Huaraz, departamento de Ancash*. Huaraz: Universidad Católica Los Ángeles Chimbote.
- Rolandi, A. C. (2020). *Películas formadas en presencia de iones silicato para mitigar la corrosión de acero de construcción*. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Roman Celi, D. M. (2019). *Correlación entre la deformación y la resistencia a la compresión uniaxial en rocas*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Rondon, C. (2022). *Manual de Armaduras de Refuerzo para Hormigón Fabricación - Instalación - Protección*. Santiago de Chile: Aceros AZA S.A.
- RPP. (29 de junio de 2019). Obtenido de <https://rpp.pe/peru/actualidad/huanuco-centro-de-salud-y-viviendas-colapsaron-por-falla-geologica-en-sillapata-fotos-noticia-1205872>
- Rupay Taipe, F. (2022). *Análisis comparativo de cimentaciones superficiales, diseñadas aplicando el método de los esfuerzos admisibles con el método de los estados límites en el hotel Holiday Inn Express*. Huancayo: Universidad Nacional Del Centro Del Perú.
- Saavedra Guzmán, R. A. (2019). *Análisis de algunas causas de falla y defectos de las estructuras*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Sánchez Colmanarejo, J. I. (2022). *Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación eléctrica. Propuesta metodologica para el analisis de riesgos en los*

- sistemas temporales durante la fase final de la construcción y el comisionado.* Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia (España). Escuela Internacional de Doctorado. Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales.
- Sanchez Mena, D. R. (2022). *Análisis y diseño estructural de vigas de hormigón armado.* La Paz: Universidad Mayor De San Andrés.
- Sánchez, D. (2002). *Durabilidad y Patología del concreto.* Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto - Asocreto.
- Sandoval, A. (2012). *Estimación de la socavación en puentes para su uso en el cálculo del riesgo físico.* Universidad Nacional Autónoma De México.
- Sanjuan Barbudo, M. Á., & Castro Borges, P. (2001). *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto.* México, D.F: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Seclen Falen, L. A. (2019). *Patología y terapéutica en estructuras de concreto armado de instituciones educativas públicas del distrito de Pimentel.* Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio De Mogrovejo.
- Semana.* (19 de Octubre de 2013). Obtenido de <https://www.semana.com/nacion/articulo/debate-edificio-space/361588-3/>
- Serrano, B. (18 de Julio de 2023). *Instituto Valenciano de la Edificación.* Obtenido de http://xsapps-api.xtremesoft.net/media/ive/content/posts/renhata/consejos/fichas/CNS/vigas_hormigon_fisuras_inclinadas.pdf
- Servicio Geológico Colombiano. (18 de Agosto de 2023). *Reporte de réplicas del sismo ocurrido el 17 de agosto.* Obtenido de <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Reporte-de-replicas-del-sismo-ocurrido-el-17-de-agosto.aspx>
- shippai.org. (20 de Junio de 2023). *Colapso del puente de Tacoma.* Obtenido de <https://www.shippai.org/fkd/cf/CA0000632.html>
- Skalny, J., Johansen, V., Thaulow, N., & Palomo, A. (1996). *DEF: Una forma de ataque por sulfatos.* España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

- Sotomayor C, C. (15 de Marzo de 2020). *Entendiendo a las fisuras y grietas en las estructuras de concreto*. Obtenido de <http://www.consultcreto.com/publicaciones.html>
- Souza, R. B. (2006). *Susceptibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos - método de ensaio acelerado*. Sao Paulo: Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo.
- Torres Acosta, A. A., Pérez Quiroz, J. T., Ramírez Rentarías, A. J., & Martínez Madrid, M. (2006). *Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales*. Sanfandila: Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte, publicación técnica No 287.
- Treval C. Powers, R. A. (1953). *Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing*. Portland Cement Association.
- Tróchez, J., Maturana, H., De Gutiérrez, R., & Guerrero, C. (2009). *Desempeño de mezclas cementicias binarias y ternarias basadas en metacaolín y humo de sílice*. Cali: Universidad del Valle.
- Tryana Sembiring, M. (2022). Analisis Permasalahan Menggunakan Cause and Effect Diagram, Fault Tree Analysis dan Afinity Diagram Proses Produksi Stasiun Persiapan Tulangan pada PT. X. *Volume 5 Issue 2 – 2022 TALENTA Conference Series: Energy & Engineering (EE)*. TALENTA Publisher Universitas Sumatera Utara.
- Unidad de Puentes LanammeUCR. (2020). *Inspección especial del puente sobre la quebrada Salitral ruta nacional N.º 27: Evaluación de la condición del tablero del puente debido a los desprendimientos de concreto en las juntas de construcción*. San José: Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.
- Uría Arraya, A. E. (2020). *Análisis no lineal de la mecánica de la fractura y simulación numérica de las características post fisuración del pavimento rígido reforzado con fibras de polipropileno*. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés.

- Urrego García, D. M. (2021). *Mecanismos de degradación de concreto mediados por la simbiosis entre Leucaena leucocephala y Aspergillus niger establecidos en estructuras urbanas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Vagelis G, P., & Costas G, V. (1991). Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. *University of Patras, Greece*, 1333-1338.
- Vargas, A., & Fernández, J. (2002). Aplicación de una metodología para evaluar la agresividad del agua hacia estructuras de concreto. *Revista Geológica de América Central*, 125-132.
- Vignolo, G., & Vázquez, J. (2012). Diseño, simulación y ensayo de un sensor de deformación paralelo de alta ganancia. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 3751-3763.
- Vilca Yucra, D. F., & Obregón Pari, C. K. (2023). *Evaluación estructural sísmico de las instalaciones de la gerencia de ingeniería de la entidad prestadora de servicio de saneamiento, Tacna 2022*. Tacna: Universidad Privada de Tacna.
- Villao Vera, R. A. (2021). *Actualidad de las técnicas de análisis de corrosión en estructuras de concreto reforzado*. E-IDEA Journal of Engineering Science.
- Villar Arribas, K. (2018). *Durabilidad del hormigón bajo la acción combinada de procesos de lixiviación y hielo/deshielo*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Villegas Esparza, B. E. (2016). *Investigación columnas y ejercicio estructuras de concreto reforzado (teoría plástica)*. Ciudad de México: Instituto politécnico nacional escuela superior de ingeniería y arquitectura.
- W. Mazer, G. Macioski, N. Soto, & E. Baettker. (s.f.). *Determinação do teor de íons sulfato em estruturas de concreto*. In: *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014, Florianópolis*. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014.
- Zapana Zapata, L. M. (2021). *Análisis de los errores más comunes de expedientes técnicos en infraestructuras civiles en base a estudios de sus expedientes y su afectación en su ejecución*. Cajamarca: Universidad Privada Del Norte.