

## **PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN: UNA PERSPECTIVA BASADA EN EL RIGOR CIENTÍFICO, EL JUICIO EXPERTO Y LA EXPERIENCIA IBEROAMERICANA**

Alfredo URICH<sup>1,2,3</sup>, Carlos RODRÍGUEZ A.<sup>1,2,4</sup>, Gustavo IZAGUIRRE<sup>1,5</sup>,  
José Luis BEAUPERTHUY<sup>1,3</sup>, Liana ARRIETA<sup>1,2,6</sup>, Oladis TROCONIS<sup>1,2,7,8</sup>,  
Riad BUJANA<sup>2</sup>, Rosa MALAVÉ<sup>1,6</sup>, Sergio VALLE<sup>1,9</sup>

---

### **RESUMEN**

Este artículo ofrece una visión integral de la Patología de la Construcción como una especialidad esencial de la ingeniería y arquitectura para garantizar la sostenibilidad y seguridad de las obras civiles. Se describe la evolución histórica de esta disciplina, con especial énfasis en la trayectoria de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción (ALCONPAT) desde su fundación en 1991. Se analiza la importancia de una metodología diagnóstica rigurosa, el valor del "ojo clínico" o juicio experto del patólogo y la relación sistémica entre causas, efectos y consecuencias de los daños. Finalmente, se presentan y analizan diversos casos prácticos, desde asentamientos y corrosión en ambiente marino hasta daños por incendios y suelos expansivos, que sirven como lecciones aprendidas para ilustrar el rigor técnico de la especialidad y su contribución a la mejora de la calidad y durabilidad de las infraestructuras en Iberoamérica.

### **ABSTRACT**

*Construction pathology: a perspective based on scientific rigor, expert judgment, and Ibero-American experience.*

This article provides a comprehensive overview of Construction Pathology as a vital specialty in engineering and architecture, aimed at ensuring the sustainability and safety of civil works. The text describes the historical evolution of the discipline, with a specific focus on the history of the Latin American Association for Quality Control, Pathology, and Construction Recovery (ALCONPAT) since its foundation in 1991. It analyzes the importance of a rigorous diagnostic methodology, the value of the pathologist's expert judgment (or "clinical eye"), and the systemic relationship between causes, effects, and consequences of structural damage. Finally, various practical case studies are presented and analyzed, ranging from settlements and marine corrosion to fire damage and expansive soils, serving as lessons learned to illustrate the technical rigor of the specialty and its contribution to improving the quality and durability of infrastructure in Latin America.

---

*Palabras claves:* Patología de la construcción, diagnóstico estructural, durabilidad, lecciones aprendidas, ALCONPAT.

*Keywords:* Construction pathology, structural diagnosis, durability, lessons learned, ALCONPAT.

---

### **1. INTRODUCCIÓN**

La patología de la construcción es la rama de la ingeniería y la arquitectura que estudia los síntomas, las causas y los mecanismos de degradación de las obras civiles con el fin de diagnosticar, pronosticar y proponer soluciones. Aunque el estudio de las fallas es tan antiguo como el acto de construir, el término comenzó a adoptarse formalmente en el ámbito técnico iberoamericano hace poco más de cinco décadas,

adaptando el concepto médico al estudio de la "salud" de las construcciones.

Bajo esta premisa, el objetivo de este trabajo es presentar una perspectiva integral de la patología de la construcción como especialidad, fundamentada en el rigor científico, el juicio experto y el intercambio técnico en sociedades especializadas, validando este enfoque mediante el análisis crítico de las lecciones aprendidas en una selección de casos de estudio.

---

<sup>1</sup> ALCONPAT-Ve

<sup>2</sup> Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat - Comisión de Infraestructura

<sup>3</sup> B.R.S. Ingenieros, C.A.

<sup>4</sup> Centeno-Rodríguez y Asociados

<sup>5</sup> Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Central de Venezuela

<sup>6</sup> Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado

<sup>7</sup> Universidad de Texas at San Antonio, U.S.A.

<sup>8</sup> Centro de Estudios de Corrosión (CEC), Universidad del Zulia

<sup>9</sup> Universidad de Carabobo

En primera instancia, se indaga sobre el origen y el uso del término “patología” aplicado a la industria de la construcción, así como su adaptación y divulgación como una disciplina esencial de la ingeniería y la arquitectura. Posteriormente, se presenta una reseña histórica de ALCONPAT Internacional, analizando su impacto en la consolidación de una metodología consensuada para el diagnóstico, a través del intercambio y la actualización constante del conocimiento.

El cuerpo del artículo desarrolla la metodología y el campo de acción del patólogo, producto de la experiencia acumulada y referencias de reconocimiento global. Seguidamente, se expone un análisis de casos prácticos de diversa naturaleza, donde se detalla la aplicación de este método y las lecciones derivadas de cada intervención. Finalmente, se discute la relevancia de la durabilidad en la construcción, aspecto aún subestimado en la fase de proyecto y la necesidad de fortalecer la educación y divulgación en esta área.

Los casos de estudio presentados fueron seleccionados por su relevancia técnica y representatividad dentro de esta disciplina. El análisis de estas experiencias se desarrolla de la siguiente manera: se inicia con el estudio de la calidad del concreto en una obra en construcción, empleando ensayos no destructivos y núcleos extraídos en sitio (Caso 1); a continuación, se analiza una falla por aplastamiento del concreto en un tanque en construcción mediante un diagnóstico por inspección visual (Caso 2); posteriormente, se examina el asentamiento de cimentaciones en un edificio residencial a pocos años de su construcción (Caso 3); seguido del análisis de los efectos y soluciones para un incendio en un edificio residencial (Caso 4). La casuística continúa con el estudio del ataque de sulfatos en un tanque anaeróbico de una planta licorera (Caso 5); y la evaluación e intervención en las bases de una estructura de acero afectada por corrosión, utilizando el método de elementos finitos (Caso 6). Finalmente, se expone un caso complejo de rehabilitación de un muelle marino afectado por corrosión (Caso 7); la auditoría de seguridad y patología viales para la mitigación de “puntos negros” (Caso 8); y el proceso de evaluación y rehabilitación en un conjunto de viviendas de interés social (Caso 9).

Con este trabajo se pretende ofrecer un instrumento de consulta que posicione a la patología de la construcción como una disciplina fundamental para la preservación sistemática y profesional del patrimonio construido.

## 2. ORIGEN Y USO DEL TÉRMINO PATOLOGÍA EN EL ÁMBITO DE LA CONSTRUCCIÓN

La Patología de la Construcción, también conocida como Patología de Obras Civiles, del Concreto o de Estructuras, constituye una especialidad fundamental de la Ingeniería Civil y la Arquitectura. Esta disciplina se dedica al estudio

sistemático de las causas, las consecuencias y las soluciones frente a los problemas de deterioro, fallas o defectos que presentan las edificaciones, tanto al momento de su construcción como luego de puestas en servicio.

El término “patología” es un préstamo directo de la Medicina. Etimológicamente proviene del griego *Pathos* (πάθος): sufrimiento o enfermedad, y *Logos* (λόγος): tratado o estudio. De este modo, la Patología de la Construcción se encarga del análisis de las “enfermedades” que afectan las estructuras y los materiales.

Como disciplina formal, la Patología de la Construcción comenzó su consolidación y reconocimiento a partir de las décadas de 1950 y 1960. Sus raíces prácticas se extienden mucho antes, pero el estudio de los problemas y defectos de las estructuras carecía de un enfoque científico y sistematizado. El auge y la masificación del uso del concreto reforzado como material constructivo global revelaron la aparición de daños y fallas prematuras (como la carbonatación o el ataque por cloruros), lo que hizo imperiosa la necesidad de un campo de estudio específico.

Este campo de estudio se aceleró al finalizar la Segunda Guerra Mundial, cuando Europa emprendió un ambicioso plan de reconstrucción de la infraestructura devastada. El auge constructivo, acelerado en un entorno marcado por la escasez de materiales de calidad, la falta de mano de obra calificada y la prevalencia de la urgencia sobre la técnica, pasó con el tiempo una alta factura. La proliferación de fallas hizo indispensable contar con profesionales especializados en su diagnóstico y corrección.

Se reconoce que fue en Francia, a comienzos de los años 50 del siglo pasado, donde se adoptó por primera vez el término “Pathologie” aplicado a la ingeniería (Lossier, 1952).

En el mundo hispanohablante, esta terminología comenzó a emplearse a finales de la década de 1970. Uno de los primeros y más influyentes autores en aplicarla con propiedad fue el Profesor Manuel Fernández Cánovas (1977), cuya primera edición de su clásico libro “Patología y Terapéutica del Hormigón Armado” se convirtió en una obra de referencia fundamental en el medio.

Bajo la influencia de la literatura española, el término se introdujo en Venezuela con cautela a comienzos de la década de 1980. Inicialmente, la mención de una “patología del concreto” fue recibida con escepticismo e incluso con reacciones jocosas. No obstante, la especialidad fue rápidamente acogida y se convirtió en una rama reconocida en el ámbito de la ingeniería civil, la arquitectura y la construcción en general.

Como una muestra definitiva de la consolidación del término, muy recientemente, el Diccionario de la lengua española, en su actualización de 2023, ha incorporado esta acepción, (antes exclusiva de las ciencias médicas), al ámbito de la industria de la construcción, definiéndola como: “f.

Constr. Estudio de los defectos y problemas que presenta una construcción” (Real Academia Española, 2023).

Actualmente, la Patología de la Construcción se ha adoptado como una cátedra esencial a nivel de pregrado y postgrado en numerosas facultades de ingeniería. Igualmente, se imparten cursos, diplomados y seminarios, y se celebran congresos internacionales que confirman la madurez y la relevancia de esta disciplina en el mantenimiento y la sostenibilidad de la infraestructura civil.

### 3. DESARROLLO DE LA PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN EN IBEROAMÉRICA A TRAVÉS DE ALCONPAT INTERNACIONAL

#### 3.1 Origen Institucional

La trayectoria de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción (ALCONPAT) se originó el 1 de febrero de 1991, en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Madrid, España. El surgimiento de esta organización internacional fue el resultado de la iniciativa de tres profesionales integrantes de un colectivo de 42 especialistas iberoamericanos.

Dicho grupo participó en el **X Curso de Estudios Mayores de la Construcción (CEMCO-85)**, un programa de cooperación técnica centrado en áreas como estructuras, materiales, unidades funcionales de obra, habitabilidad y energía. La cohorte estuvo integrada por arquitectos e ingenieros procedentes de Argentina, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, España, Uruguay y Venezuela. (Figura 1).



Figura 1. Curso CEMCO 1985, Instituto Eduardo Torroja. 42 profesionales de Iberoamérica se especializaron en una recién creada área de estudio: “Patología de la Construcción”

Los egresados de 1985 establecieron el compromiso formal de generar un evento técnico-científico en la región latinoamericana que permitiera la continuidad del intercambio profesional. Esta iniciativa contó con el respaldo de destacados académicos como los profesores Álvaro García Messeguer, José Calavera y Manuel

Fernández Cánovas. Los estudiantes fundadores fueron Dante Domene (Argentina), Antonio Carmona (Brasil) y Liana Arrieta de Bustillo (Venezuela).

#### 3.2 Creación y I Congreso Latinoamericano (1991)

Tras una etapa de planificación gestionada desde Córdoba, Argentina, y bajo el auspicio del Complejo Ferial de esa ciudad, se dio inicio al **1º Congreso de Patología y Control de Calidad** en 1991 (Figura 2). Este evento fue diseñado como el foro para integrar a los especialistas formados en el Instituto Torroja con la comunidad técnica regional.



Figura 2. Los tres fundadores en el 1er Congreso CONPAT y 3ro de Control de Calidad, Córdoba, Argentina. 1991

Al concluir este congreso, ante una asamblea de más de 200 participantes de siete países, se presentó la propuesta formal para la creación de la Asociación ALCONPAT Internacional (Figura 3). Aunque la organización se denominó inicialmente Q+Pareco, el nombre actual fue adoptado posteriormente tras un proceso de selección.

#### Resultados y Relevancia Técnica del I CONPAT:

- **Producción Científica:** Se evaluaron y presentaron 102 trabajos de investigación procedentes de diversos países.
- **Diversidad Geográfica:** Participaron representaciones de México, República Dominicana, Uruguay, Brasil, Chile, Paraguay, España, Venezuela y Argentina.
- **Objetivo Estratégico:** Se estableció la necesidad de documentar las manifestaciones patológicas regionales y aprovechar la investigación aplicada para orientar las acciones hacia el mejoramiento de la calidad en las edificaciones.
- **Premisa de Calidad:** Se planteó que la calidad es una inversión rentable que requiere incrementar la vida útil de las infraestructuras mediante programas rigurosos de “control de calidad y mantenimiento preventivo”.



Figura 3. Lanzamiento de la Asociación propuesta por el Prof. Fernández Cánovas. 1er Congreso CONPAT Argentina

### 3.3 Desarrollo y Consolidación de Delegaciones

Desde su fundación legal en 1991 hasta la asunción de la dirección general por parte del Dr. Pedro Castro en 2001, la organización se enfocó en la elaboración de sus estatutos y el registro como personalidad jurídica internacional, proceso que ha conllevado diversas modificaciones estatutarias para consolidar el reglamento actual.

A lo largo de su historia, la estructura se ha fortalecido mediante la creación de delegaciones nacionales en los siguientes países: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia,

Costa Rica, Ecuador, España, Guatemala, México, Paraguay, Portugal, Uruguay y Venezuela.

En el caso específico de Venezuela, la asociación fue refundada el 28 de julio de 2023. Actualmente, esta delegación cuenta con más de 100 miembros activos, consolidándose como una de las representaciones con mayor fortaleza dentro de la red internacional.

### 3.4 Actividad Científica y Estructura de Servicios

La continuidad de la asociación se manifiesta principalmente a través de los congresos CONPAT, celebrados con una periodicidad bienal. Según los registros oficiales, estos encuentros han convocado a más de 4.000 participantes. A continuación, se listan las sedes de los Congresos Internacionales (Figura 4):

- **1991–2001:** Córdoba (Argentina), Barquisimeto (Venezuela), La Habana (Cuba), Porto Alegre (Brasil), Montevideo (Uruguay), Santo Domingo (República Dominicana).
- **2003–2013:** Telchac (México), Asunción (Paraguay), Quito (Ecuador), Valparaíso (Chile), Antigua (Guatemala), Cartagena (Colombia).
- **2015–2025:** Lisboa (Portugal), Asunción (Paraguay), Chiapas (México), Edición Virtual (Brasil), Santa Cruz (Bolivia) y Madrid (España).



Figura 4. Congresos CONPAT's Internacionales

Además de los certámenes científicos, ALCONPAT Internacional ofrece una estructura de servicios de alta especialización:

**Educación Continua:** Programas certificados en diversos tópicos de la Patología de obras civiles.

**Difusión Científica:** Publicación de una revista indexada periódica.

**Normalización Técnica:** Elaboración de manuales de procedimientos para reparación y rehabilitación, así como boletines de especificaciones técnicas.

**Fomento a la Investigación:** Entrega de premios a trabajos destacados y apoyo a investigadores noveles mediante la organización "Jóvenes con ALCONPAT".

### 3.5 Impacto y Perspectivas Futuras de la Asociación

Se concluye que ALCONPAT Internacional es una organización científica con una proyección relevante en el ámbito de la ciencia y la construcción. Su propósito fundamental se orienta hacia la mejora de la calidad de vida de las sociedades mediante la optimización de los estándares

de edificación y el incremento de la vida útil de las estructuras.

La implantación de programas rigurosos de mantenimiento preventivo y control de calidad, junto con el fortalecimiento de las delegaciones nacionales, asegura la sostenibilidad técnica de la disciplina en Iberoamérica.

#### 4. RELEVANCIA ESTRATÉGICA Y METODOLÓGICA DE LA PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

Aunque los "padecimientos" en las edificaciones son inherentes a su propia historia y han sido atendidos de manera reactiva a lo largo del tiempo, la trascendencia del desarrollo actual de la Patología en la industria de la construcción radica en su capacidad para concentrar y sistematizar un cuerpo de conocimiento que antes se gestionaba de forma dispersa o aislada. Esta especialidad se ha consolidado como un marco científico integral para la investigación, la metodología de diagnóstico, la evaluación de riesgos, y la proposición de soluciones de rehabilitación.

En el contexto global actual, y con especial énfasis en Iberoamérica, resulta imperativa la formación de profesionales en ingeniería y arquitectura que dominen esta disciplina. Un especialista eficiente en Patología de las Construcciones debe poseer vocación y un conocimiento robusto e integral que se sustenta en cinco pilares fundamentales (Figura 5):

- **Análisis integral del sitio:** Para identificar las amenazas del entorno que podrían afectar a la edificación: condiciones ambientales, clase de exposición, condiciones geotécnicas, zona sísmica, entre otros.
- **Análisis Estructural y Mecánica de Materiales:** Para comprender la respuesta de la estructura a las distintas cargas y el comportamiento intrínseco de sus componentes.
- **Tecnología de la Construcción:** Para identificar deficiencias asociadas a procesos constructivos.
- **Pruebas y Ensayos:** Para verificar las propiedades y el estado real de los materiales, sistemas estructurales y componentes no estructurales de la edificación.
- **Ojo clínico:** Más allá del conocimiento técnico, el atributo más valioso reside en el juicio experto, conocido coloquialmente en el argot médico como "ojo clínico". Esta aptitud representa la capacidad de captar integralmente la semiología del problema, facilitando un razonamiento diagnóstico rápido y acertado. Esta pericia se adquiere por la acumulación y el discernimiento de conocimientos y experiencias en una diversidad de casos patológicos.



Figura 5. Atributos de un buen Patólogo de la Construcción

#### 4.1 Relación Causa-Efecto-Consecuencia

Existe una relación directa entre las posibles causas que dan origen a los problemas en las construcciones, con sus efectos y consecuencias (Figura 6).

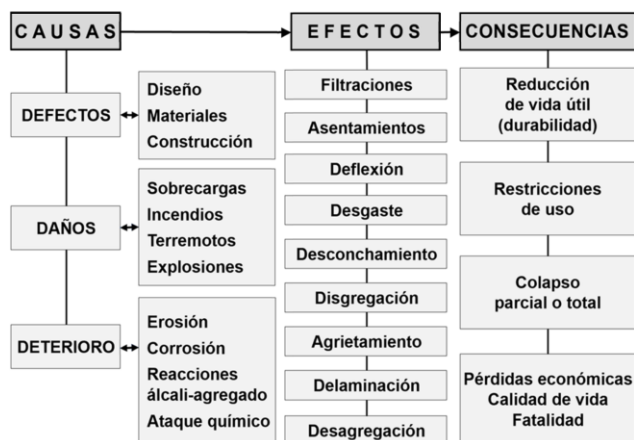


Figura 6. Relación entre causa, efectos y consecuencias (adaptado de Fernández Cánovas, 1994)

**La Causa** es el factor inicial que provoca o genera un problema. Puede deberse a:

- Defectos de origen: errores en el proyecto y cálculos, descuidos en la construcción, materiales defectuosos o de mala calidad.
- Daños: causados por sobrecargas, incendios, terremotos, deslaves, derrames químicos, empujes o asentamientos del terreno, entre otros.
- Degradación o deterioros: causados por erosión, corrosión de la armadura, reacción álcali-agregados, ataque por sulfatos, entre otros.

**El efecto** es la manifestación física directa y manifiesta de la causa. Entre los principales efectos tenemos: agrietamiento, desconchamiento, delaminación, deflexiones, desgaste, disgregación, desagregación, eflorescencias, filtraciones, distorsiones del sistema de cimentación.

**La consecuencia**, como resultado final, y a menudo más grave que el efecto, se manifiesta en la funcionalidad, seguridad o valor de la edificación; tales como, la reducción

de la vida útil, las restricciones de uso, el colapso parcial o total, las pérdidas económicas, la calidad de vida y la fatalidad, entre otras.

#### 4.2 Sintomatología

Los síntomas más comunes que alertan cuando una estructura está “enferma” son las fisuras y grietas. Estas son el indicio más visible de problemas o fallas (Figura 7). No todas revisten el mismo grado de peligro, algunas son solo un problema estético o funcional, mientras que otras reflejan daños que podrían significar un riesgo de colapso, por lo que nunca deben ser menospreciadas. Otros síntomas de manifestaciones patológicas en las obras civiles incluyen:

- Filtraciones y humedades.
- Deformaciones excesivas o flechas fuera de norma.
- Vibraciones anómalas.
- Desprendimientos de material.
- Manchas o cambios de coloración en el concreto.



Figura 7. Izquierda: grieta por corte en columna (incendio); derecha: grietas longitudinales en esquina (corrosión)

#### 4.3 Metodología de la Investigación Patológica

Un caso típico de patología de obras civiles se desarrolla mediante un proceso secuencial dividido en dos fases fundamentales (Figura 8): una investigación preliminar (o de triaje) y una investigación detallada (o de verificación).

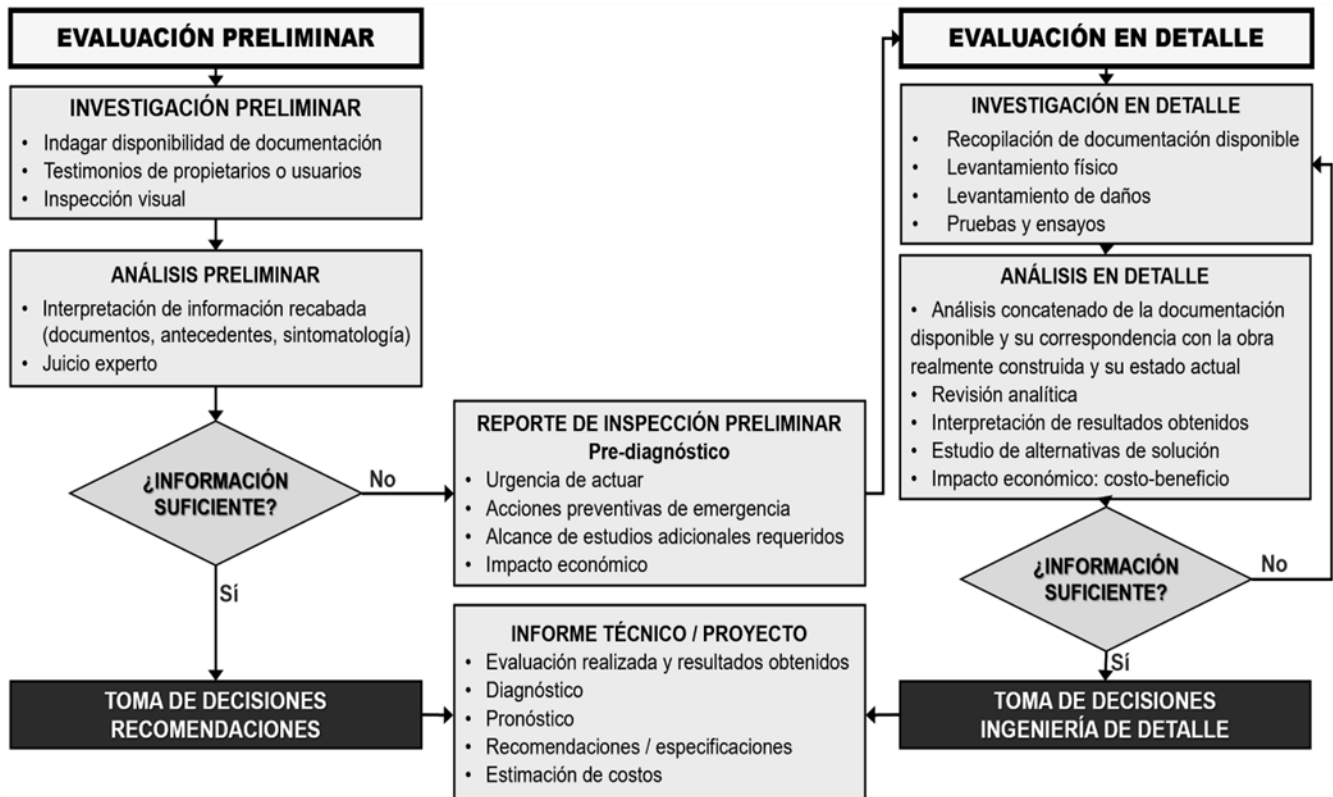


Figura 8. Diagrama del Procedimiento General de Evaluación

La Fase Preliminar tiene como objetivos principales la identificación del problema, la estimación inicial de su gravedad y la determinación de la urgencia de la actuación. Los objetivos clave de esta fase son:

- Obtener la información histórica documental disponible de la edificación (planos, memorias, modificaciones o ampliaciones, historial de mantenimiento).

- Determinar la factibilidad técnica y económica de la recuperación.
- Establecer un prediagnóstico y definir, en casos simples, la solución inmediata.

En esta fase, el diagnóstico se sustenta primariamente en el análisis semiológico del caso, es decir, la lectura e interpretación de los signos y síntomas que manifiesta la edificación. Esto se realiza principalmente a través de una inspección visual aguda, complementada ocasionalmente con ensayos no destructivos sencillos y de rápida ejecución. Es durante esta etapa que el "ojo clínico" del ingeniero patólogo resulta fundamental.

La fase Detallada se desarrolla cuando el diagnóstico preliminar revela mayor complejidad del caso o requiere la verificación de hipótesis, se amplía el alcance a una investigación detallada más exhaustiva. Esta fase implica la aplicación de diversas técnicas para determinar el estado real de la edificación in situ, a menudo requiriendo intervenciones multidisciplinarias y la realización de diversos tipos de ensayos.

#### 4.4 Ensayos más comunes

Entre las técnicas de ensayo más utilizadas para esta verificación se encuentran (Figura 9):

- Ensayos no destructivos: Fisurimetría, para medir el desarrollo de fisuras; magnetometría, para localizar el acero de refuerzo; esclerometría, para estimar la resistencia superficial del concreto; ultrasonido, para evaluar la homogeneidad interna; medidas electroquímicas, potencial y velocidad de corrosión para definir el estado de corrosión del acero de refuerzo; nivelación de precisión; entre otros.
- Ensayos de caracterización de deterioro: Prueba de carbonatación con indicadores de pH; resistividad eléctrica, para evaluar la actividad corrosiva de armaduras; petrografía, para analizar la microestructura del concreto; entre otros.
- Ensayos semi-destructivos y destructivos: Extracción de núcleos de concreto y muestras de acero para pruebas de laboratorio; calas exploratorias.
- Exploración de suelos y cimentaciones.



Figura 9. Ensayos más comunes para evaluar estructuras

Finalmente, se puede recurrir a la prueba de carga, que se considera el ensayo confirmativo por excelencia. Esta prueba de campo es la forma más precisa y definitiva de determinar la capacidad portante real de las estructuras y verificar su idoneidad ante las cargas gravitacionales de servicio.

#### 4.5 Diferencia entre Ingeniería Forense y Patología de Obras Civiles

Se tiende a confundir muchas veces la **Ingeniería Forense** con la **Patología de Obras Civiles**, a pesar de existir diferencias clave en sus objetivos y aplicación: la primera se centra en la responsabilidad legal y las causas de una falla catastrófica, mientras que la segunda se enfoca en el diagnóstico técnico y la reparación de daños en una construcción (Tabla 1). Aquí se detallan las diferencias clave:

##### Ingeniería Forense:

- **Enfoque:** Investiga causas, determina responsabilidades legales y aporta pruebas periciales en litigios o juicios.
- **Alcance:** Analiza accidentes, colapsos, fallos de diseño, vicios ocultos y conflictos contractuales.
- **Objetivo:** Identificar "¿quién tuvo la culpa?" y "¿por qué ocurrió?", emitiendo informes periciales.
- **Acción:** Se activa generalmente ante una catástrofe, siniestro importante o un litigio judicial.

##### Patología de Obras Civiles:

- **Enfoque:** Estudio técnico del "enfermo" (la obra). Analiza los mecanismos, causas y efectos de los daños, deterioros o fallas constructivas.
- **Alcance:** Se dedica a identificar lesiones materiales, como corrosión, grietas, humedades, fisuras, etc.
- **Objetivo:** Diagnosticar el origen del deterioro y proponer métodos de rehabilitación o reparación.
- **Acción:** Es preventiva o correctiva; busca entender la falla física para reparar y prolongar la vida útil.

Tabla 1 Resumen de diferencias entre la ingeniería forense y la patología de las obras civiles

| Característica        | Ingeniería Forense                        | Patología de Obras Civiles                      |
|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Objetivo</b>       | Judicial/Legal (Responsabilidades)        | Técnico/Terapéutico (Reparación)                |
| <b>Pregunta clave</b> | ¿Por qué falló y quién es el responsable? | ¿Qué le pasa a la estructura y cómo se arregla? |
| <b>Resultado</b>      | Informe pericial para juicios             | Diagnóstico y plan de reparación                |
| <b>Escenario</b>      | Fallas catastróficas, siniestros          | Degradación, deterioro, defectos, daños         |

En conclusión, un patólogo de la construcción detecta cómo y por qué se deterioró una obra, mientras que el ingeniero forense utiliza ese conocimiento para establecer quién incumplió las normas o el contrato ante un tribunal.

## 5. CAMPO DE ACCIÓN DEL PATÓLOGO DE LA CONSTRUCCIÓN

### 5.1 Deficiencias de Origen (Vicios Ocultos)

En muchos casos, las enfermedades de las construcciones son de naturaleza congénita; la estructura está sentenciada desde su nacimiento debido a la falta de control, inexperiencia, o negligencia en etapas cruciales como la concepción y el diseño, la selección de materiales o el proceso constructivo (Figura 10).

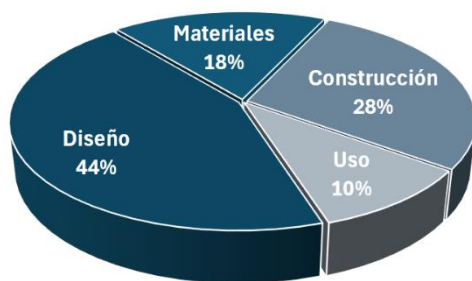


Figura 10. Origen de los defectos, deterioro y fallas con relación a las etapas de producción y uso de las obras civiles (adaptado de Helene y Pereira, 2003)

Un ejemplo reciente de enfermedad congénita en el ámbito nacional es la epidemia de casos de concreto de calidad "no conforme". Esto se origina en la dificultad para obtener materia prima de calidad, especialmente cemento y arena. La poca oferta de cemento Portland tradicional (Tipos I, II y III) ha masificado el uso de Cemento Portland con Adiciones (CPCA), cuyas propiedades, no equivalentes a los tipos tradicionales, son a menudo desconocidas o mal interpretadas por contratistas e inspectores de obras.

Los problemas asociados a deficiencias de origen o vicios ocultos generalmente no se manifiestan de inmediato, sino que se desarrollan lentamente con el tiempo comprometiendo la durabilidad, o afloran súbitamente al someterse la estructura a una sobre exigencia excepcional. Esto sucede con eventos accidentales de gran poder destructivo, como incendios, terremotos, explosiones, aludes o inundaciones, eventos que sacan a flote cualquier defecto o deficiencia en la capacidad resistente del sistema estructural.

### 5.2 Corrosión: el cáncer de las estructuras

La corrosión se define como la degradación de los metales/aleaciones resultante de su interacción con el medio ambiente circundante. Aunque es comúnmente asociada a las estructuras metálicas, también es muy frecuente y grave

en las estructuras de concreto reforzado. Se trata de un fenómeno de naturaleza electroquímica compleja, influenciado por múltiples variables.

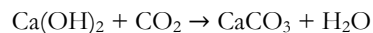
Es la principal causa de deterioro en infraestructura, equipos e instalaciones a nivel mundial. Representa entre el 3 y el 5% del PIB en países desarrollados y 8% o más en países subdesarrollados, es uno de los temas más investigados en ciencias e ingeniería.

Las pérdidas anuales por corrosión, es decir, por sustitución de miembros que se desintegran, por reparación, por pintado o aplicación de revestimientos protectores, se aproximaron a un costo global de 2,5 trillones de dólares americanos para el año 2013 (1 trillón es un millón de millones). Esto representa el 3,4% del PIB mundial, cifra que da una idea de la importancia del tema.

En el concreto reforzado, la corrosión del acero de refuerzo se promueve principalmente por:

**La permeabilidad del concreto**, que permite el acceso del oxígeno y la humedad hasta la armadura.

**La carbonatación**, proceso químico lento que ocurre en el concreto cuando el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) atmosférico se difunde a través de la red capilar del recubrimiento y reacciona con los productos de hidratación del cemento, principalmente los álcalis como el hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ), para formar carbonato de calcio neutro ( $CaCO_3$ ), lo que reduce drásticamente el pH del medio y la consecuente pasivación del acero.



La carbonatación es la tendencia termodinámica del clinker a volver a su estado primitivo de carbonato de calcio (*calita*). Esta reacción tiene la consecuencia crítica de reducir el pH del concreto de un valor inicial altamente alcalino (típicamente entre 12 y 13) a un valor neutro o ligeramente ácido (generalmente por debajo de 10). Al caer el pH, se destruye la capa protectora de pasivación que naturalmente recubre el acero de refuerzo, lo que lo hace susceptible a la corrosión en presencia de humedad y oxígeno.



Figura 11. Prueba de carbonatación durante una reparación

La Figura 11 muestra una edificación en proceso de reparación en el litoral venezolano, con edad 30 años, al que se le realizó la *prueba de la timolftaleína* para determinar la profundidad de carbonatación. Este ensayo químico evalúa el nivel de pH, identificando zonas carbonatadas (*incoloras*,  $pH < 9$ ) y sanas (*teñidas de violeta*,  $pH > 9$ ). Como puede observarse, el frente carbonatado supera los 2 cm, suficiente para despasivar la armadura circundante y activar la corrosión cuando el recubrimiento del acero es escaso.

**Los cloruros.** Los iones cloruro ( $Cl^-$ ) atacan directamente la capa pasivadora del acero en el concreto reforzado. Son iones despasivantes muy potentes, que provienen principalmente por difusión desde el medio externo (ambiente marino, procesos industriales) y también directamente desde el interior por el uso de materiales de construcción contaminados. Se consideran el patógeno más crítico para las construcciones ubicadas cerca de las costas marinas. ¿Qué significa esto para las estructuras?: que los cloruros destruyen las capas protectoras de óxidos pasivantes alrededor de la armadura, aún en un entorno con pH elevado, lo que desencadena la corrosión si hay presencia de oxígeno y humedad.

El producto de la corrosión, conocido como herrumbre u óxido de hierro hiper-hidratado, posee una naturaleza expansiva, cuyo volumen puede ser 6 veces mayor al del acero original. Esta expansión genera fuertes tensiones internas en el concreto circundante, lo que conduce a su fisuración, fractura y desprendimiento (Figura 12).



Figura 12. Daño severo en columna a causa de la corrosión

A medida que el proceso avanza, la armadura corroída ve reducida su sección útil y pierden su adherencia al concreto. Este deterioro progresivo debilita paulatinamente la estructura, pudiendo llevarla a su estado límite de servicio (pérdida de funcionalidad) o, incluso, a su estado límite de agotamiento (colapso).

La reparación de daños estructurales por corrosión es una operación de alta complejidad que requiere de diagnóstico y atención especializada. Una intervención inadecuada puede resultar contraproducente y acarrear serias consecuencias, entre ellas: la reincidencia y propagación del deterioro a zonas aún sanas, debido fundamentalmente al desequilibrio electroquímico generado por un tratamiento incorrecto del acero o del concreto afectado; también el riesgo de falla por agotamiento de la capacidad resistente, ya que la intervención puede requerir debilitar temporalmente la estructura en condición ya vulnerable para poder aplicar la solución de reparación.

La corrosión es una enfermedad endémica en toda construcción ubicada en ambiente marino o industrial agresivo, y ocasiona ingentes pérdidas económicas a nivel mundial. Venezuela no es ajena a esta realidad, ya que una parte significativa de los desarrollos habitacionales y turísticos-recreacionales se localiza en la región litoral. Numerosas edificaciones de esta zona presentan graves problemas estructurales por esta causa, con una vulnerabilidad que tiende a incrementarse con el tiempo.

Este problema no se limita al ámbito marino; también se manifiesta en instalaciones industriales, en áreas de estacionamientos subterráneos (sótanos) y en tanques de agua, áreas de piscina y jardineras por humedad constante y agentes químicos. Además, el fenómeno de la carbonatación paulatina afecta a inmuebles de avanzada edad en ambientes urbanos, fomentando también la corrosión.

### 5.3 Patología por problemas geotécnicos

Otras patologías recurrentes son las originadas por causas geotécnicas. Dentro del desarrollo de la geotecnia han tenido un papel preponderante los daños en las estructuras y

las catástrofes, entendidas estas como un comportamiento o un resultado inesperado. De allí que no son pocos los ingenieros geotécnicos cuya actuación profesional en una buena medida incluye la atención de casos con distintas manifestaciones patológicas, pero un origen común, las condiciones del terreno sobre el cual están cimentadas las obras.

Para entender el perfil del ingeniero geotecnista-patólogo es necesario destacar que en la geotecnia coexisten dos ramas, una científica, teórica y otra aplicada, experimental. Peck (1962) lo señala como la dualidad entre la Ciencia Ingenieril (paradigma de la teoría) y Práctica Ingenieril (paradigma de la práctica). La Figura 13, propuesta por Burland (2006), permite explicar estos conceptos:



Figura 13. El triángulo geotécnico de Burland (1987-2007)

En este triángulo coexisten cuatro aspectos relacionados entre sí: 1) el perfil del terreno o más ampliamente, las condiciones y características del sitio bajo estudio, 2) el comportamiento observado o medido, en este caso la observación, medición y ensayos sobre la patología en estudio, 3) las predicciones usando métodos apropiados, la idealización y modelación conceptual, física o analítica y 4) los procedimientos empíricos entendidos como el criterio o juicio basado en precedentes y la experiencia bien ganada.

Las situaciones de mal funcionamiento o de falla relacionadas con la geotecnia, y donde siempre debe actuar profesionales con experticia en patología, se pueden agrupar muy resumidamente como sigue:

- Por inestabilidad: dimensionamiento indebido que propicia fallas por corte y/o asentamientos, desconocimiento de las características del subsuelo.
- Por exceso de carga: cambio del destino y de las sobrecargas de uso, variaciones de las cargas por incremento de la altura del edificio.
- Cambios en las características del terreno.
- Movimientos del terreno: movimientos de masas, subsidencias, hundimientos de minas o galerías existentes, movimientos sísmicos, vibraciones por voladuras o por hincas de pilotes, licuación, cambios de humedad que provocan hinchamientos o retracciones y efecto de las raíces de los árboles.

- Alteraciones de tipo químico: ataque de sulfatos sobre morteros y cementos, disolución de los suelos y cristalizaciones dentro de la masa de suelos.

Las Figuras 14, 15, 16 y 17 muestran ejemplos de manifestaciones de fallas originadas por problemas geotécnicos.



Figura 14. Edificación en peligro de colapso por la omisión en la identificación de suelos dispersivos



Figura 15. Movimiento de masas que dejó al descubierto las cimentaciones

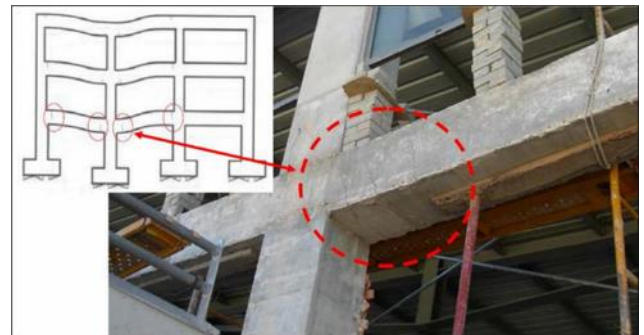


Figura 16. Agrietamiento de la estructura por asentamiento diferencial excesivo



Figura 17. Asentamiento e inclinación de una edificación cimentada en una losa apoyada sobre suelos blandos

Como en toda rama de la ingeniería, las consecuencias materiales, económicas y sociales derivadas de una práctica inadecuada de la geotecnia pueden ser significativas. Por ello, su correcta aplicación constituye un componente esencial de cualquier proyecto.

Resulta imprescindible destacar la importancia del trabajo interdisciplinario y de la sinergia entre la triada **comitente-propietario/ proyectistas/ constructores**, condición necesaria para obtener obras económicas, confiables, duraderas y seguras. Alcanzar este nivel de articulación profesional, representa uno de los mayores desafíos contemporáneos para la patología de las obras civiles.

#### 5.4 Patología sísmica: de la vulnerabilidad de origen a la evaluación post-terremoto

La patología sísmica es una especialidad que demanda una comprensión profunda de la dinámica de estructuras y el comportamiento no lineal de los materiales. A diferencia del daño o degradación de origen químico o ambiental, el daño sísmico es súbito y pone a prueba la ductilidad y la capacidad de disipación de energía de la edificación. Su abordaje sistemático se divide en cuatro enfoques fundamentales, que transitan desde la prevención hasta la rehabilitación.

##### 5.4.1 Evaluación rápida de la vulnerabilidad de edificaciones existentes (Enfoque Preventivo):

Este enfoque se centra en identificar el riesgo antes de que ocurra el evento sísmico mediante un “índice de riesgo” o “índice de priorización” como los mostrados en la Figura 18 para un sector de Caracas, Venezuela.

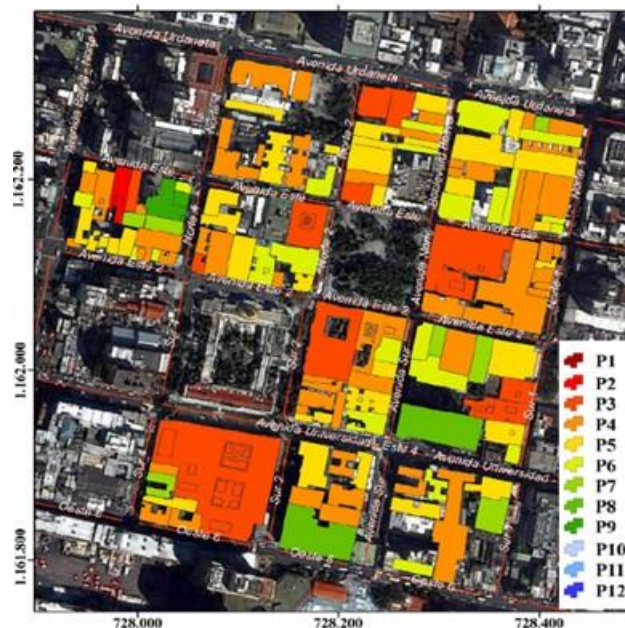


Figura 18. Ejemplo de índices de priorización para un sector de Caracas, Venezuela. Adaptado de López, Coronel y Rojas (2014)

Se usan planillas y matrices que permiten jerarquizar grupos de edificaciones a través de evaluaciones de corta duración. Se fundamenta en el levantamiento de información documental y de campo sobre la amenaza sísmica del lugar (probabilidad de que ocurran acciones sísmicas de cierta intensidad), así como la vulnerabilidad del edificio determinada según: su edad, el marco normativo que rigió su construcción, el tipo de sistema estructural y de materiales empleados, la configuración estructural y arquitectónica, número de pisos, irregularidades críticas como el “entrepiso blando” y “columna corta”, entre otros. También pueden incluir la importancia del edificio según su uso y número de ocupantes (López, Coronel y Rojas, 2014)

##### 5.4.2 Evaluación de habitabilidad y riesgo post-sismo (Enfoque de Atención de la Emergencia):

Inmediatamente después de un sismo, el patólogo actúa como un evaluador de seguridad pública. El objetivo no es diseñar una reparación, sino dictaminar si la estructura representa un peligro inminente para la vida. Se utiliza el protocolo de inspección visual rápida para clasificar la edificación mediante etiquetas de colores. En este nivel, el juicio experto es vital para distinguir entre grietas cosméticas y fallas frágiles en elementos primarios, o asentamientos diferenciales inducidos por la licuación de suelos, entre otros.

Se siguen métodos de evaluación rápida como los indicados en ATC-20 (2005) o adaptaciones como la

recientemente desarrollada para Venezuela por Funvisis, IMME-UCV y otros colaboradores (López et al, 2023). El resultado de estos protocolos de evaluación conduce al etiquetado de la estructura con los siguientes identificadores: etiqueta verde (acceso permitido), etiqueta amarilla (acceso restringido) y etiqueta roja (acceso no permitido). La Figura 19 muestra un ejemplo de estas etiquetas.



Figura 19. Etiqueta roja colocada por personal de Funvisis en la fachada de un edificio luego del Sismo de Tucacas en el año 2009

#### 5.4.3 Protocolo de evaluación en detalle para la reparación y adecuación (Enfoque de Desempeño):

Cuando una estructura presenta daños o se identifica como vulnerable, se requiere un diagnóstico profundo que sustente un proyecto de rehabilitación o adecuación. Bajo la filosofía del "Diseño Basado en el Desempeño" (PBD), el protocolo de evaluación busca determinar la capacidad residual de la obra y su respuesta ante eventos futuros. Para ello, se emplean métodos de análisis avanzados, como el análisis estático no lineal (conocido como Pushover) o el análisis dinámico no lineal tiempo-historia. Estas herramientas permiten verificar si la estructura es capaz de alcanzar objetivos de desempeño específicos, tales como la Ocupación Inmediata o la Prevención del Colapso, vinculando la respuesta estructural con distintos niveles de amenaza sísmica.

Estándares como el FEMA P-58 (2018), o los más recientes ASCE/SEI 41 (2023), FEMA P-2355 (2025) y ACI 562 (2025), detallan los procedimientos para este tipo de evaluaciones. Estos códigos proponen un proceso de varios niveles o etapas que conecta el comportamiento esperado, tanto de los miembros estructurales como de los componentes no estructurales, con rangos de desempeño que garantizan la resiliencia de las edificaciones existentes ante distintos niveles de amenaza sísmica.

Independientemente del método de análisis empleado, se requiere una rigurosa evaluación previa de las condiciones del edificio "como construido", que implica el

levantamiento físico y la realización de pruebas y ensayos que permitan que el modelo sea fiel a la condición real en sitio.

La Figura 20 muestra un ejemplo de toma de muestras y ensayos (núcleos de concreto) para la caracterización de una estructura afectada severamente por un terremoto, luego la Figura 21 muestra las curvas de capacidad típicamente usadas para el análisis no lineal de edificaciones existentes.



Figura 20. Toma de muestras para evaluación en detalle de un edificio existente afectado por el sismo de Tucacas, 2009

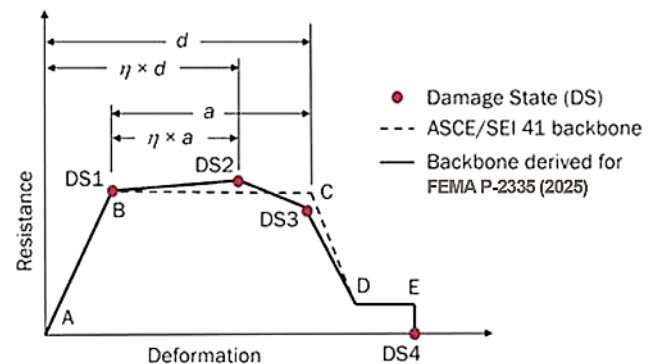


Figura 21. Curvas de capacidad típicas para el análisis y diseño basado en desempeño según documentos ASCE y FEMA. Adaptado de FEMA P-2335(2025)

#### 5.4.4 Criterios y técnicas generales para adecuación sísmica (Enfoque de Intervención):

La fase final consiste en la aplicación de técnicas de reparación o adecuación estructural para corregir los daños y/o deficiencias diagnosticadas. La intervención busca modificar la respuesta dinámica de la estructura para mitigar la demanda sísmica o aumentar su capacidad. En FEMA 547 (2006) se detallan estos sistemas; a continuación, algunos ejemplos (Figura 22):

- Incremento de rigidez y resistencia: adición de muros de concreto, diagonales de acero u otros sistemas.

- Control de ductilidad: encamisado de columnas (con acero, concreto o polímeros reforzados con fibra de carbono - CFRP) para mejorar el confinamiento.
- Aislamiento y disipación: uso de dispositivos en la base o amortiguadores que absorben la energía del sismo.



Figura 22. Ejemplo de adecuación sismorresistente de un edificio en Caracas, Venezuela. Se observan técnicas de recrido de columnas y vigas, más confinamiento con sistemas CFRP

Son de particular importancia las edificaciones de avanzada edad, que fueron diseñadas y construidas bajo la vigencia de normas antiguas cuyos criterios y especificaciones se consideran hoy en día insuficientes.

Como reflexiones finales de este punto, se puede indicar que la patología sísmica no debe entenderse solo como la reparación de grietas tras un evento, sino como un ciclo continuo de gestión de riesgo. La transición desde los métodos cualitativos de evaluación rápida, hasta los análisis cuantitativos sofisticados de análisis no lineal, permiten que el juicio experto del ingeniero se respalde en modelos rigurosos, garantizando infraestructuras más resilientes.

## 5.5 Incendios en edificaciones

Los incendios en edificaciones son siniestros que ocurren con cierta frecuencia; tienen un poder muy destructivo que impacta catastróficamente al inmueble, a sus ocupantes y a la colectividad en general. El riesgo de incendio estará siempre latente, siendo más probable en donde abundan materiales combustibles como en el caso de instalaciones industriales, almacenes, edificios comerciales y de oficinas.

Para su activación se requiere la conjunción simultánea de tres componentes esenciales conocidos como “Triángulo del Fuego” (Figura 23), de donde se desarrolla luego una reacción en cadena.



Figura 23. Triángulo del Fuego

La intensidad del fuego, su extensión y sus efectos sobre la estructura dependen de los siguientes factores:

- Materiales (*Carga de Fuego*): la naturaleza y cantidad de los materiales combustibles en el edificio tienen una influencia determinante sobre los daños ocasionados por el incendio. Estos materiales pueden ser estructurales, decorativos, mobiliarios o productos almacenados.
- Corrientes de aire (*acceso al Oxígeno*): la facilidad de acceso del aire exterior al lugar del fuego a través de ventanas o puertas abiertas, así como por escaleras y huecos de ascensor, tiene vital influencia en la magnitud y extensión de los daños. Estas corrientes de aire aportan el oxígeno (*comburente*) necesario para la combustión de los materiales y avivan las llamas, con el consecuente aumento de temperatura.
- Áreas o compartimientos aislados: las divisiones internas mediante muros de concreto o paredes de bloques de arcilla, permiten aislar espacios y ralentizar la propagación del fuego en función de su capacidad de aislamiento térmico y resistencia. No obstante, este efecto protector rara vez se observa en entornos industriales caracterizados por grandes espacios abiertos o en oficinas modernas, donde se emplean divisiones plásticas con mínima resistencia al fuego.

No todos los materiales de construcción tienen el mismo comportamiento frente al fuego. La Tabla 2 muestra un análisis comparativo de los efectos de un incendio en los principales materiales de construcción. Se compara la resistencia al fuego, combustibilidad, contribución a la carga de fuego, gradiente térmico, protección a las altas temperaturas, posibilidades de reparación luego de un incendio y la protección que ofrecen al personal de bomberos durante las labores de evacuación y extinción. Luego se presentan más detalles sobre el comportamiento del concreto y el acero ante el fuego.

Tabla 2. Comportamiento de materiales de construcción ante el fuego  
(Fuente: Jacobs, J. P. (2007). "Comprehensive fire protection and safety with concrete. Brussels: European Concrete Platform")

| Material de construcción (desprotegido) | Resistencia al Fuego | Combustibilidad | Contribución como Carga de Fuego | Gradiente de temperatura en una sección | Protección intrínseca contra el fuego | Reparabilidad luego del incendio | Protección para evacuados y bomberos |
|-----------------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| MADERA                                  | Baja                 | Alta            | Alta                             | Muy baja                                | Muy baja                              | Nula                             | Baja                                 |
| ACERO                                   | Muy baja             | Nula            | Nula                             | Muy alta                                | Baja                                  | Baja                             | Baja                                 |
| CONCRETO                                | Alta                 | Nula            | Nula                             | Baja                                    | Alta                                  | Alta                             | Alta                                 |

### 5.5.1 El concreto reforzado frente al fuego

Si se compara con otros materiales de construcción, el concreto reforzado generalmente presenta buenas características de resistencia frente al fuego. No obstante, esta cualidad del concreto se conserva por un tiempo limitado que dependerá de varios factores, entre los que es decisivo el grado de exposición al fuego (temperatura máxima, tiempo de exposición y los cambios de temperatura).

El concreto reforzado sufre diversas alteraciones en sus propiedades y características cuando es sometido al calor. Estas alteraciones pueden ir desde simples deshidrataciones superficiales hasta calcinaciones profundas con daños irreversibles en el concreto y la armadura de acero que ponen en riesgo la capacidad resistente y seguridad de la estructura (Figura 24).



Figura 24. Daños severos en estructuras de concreto reforzado. Izquierda: colapso de columna por degradación del concreto. Derecha: agrietamiento de aristas, degradación, cambio de color

Entre los efectos más relevantes podemos citar: los cambios mineralógicos progresivos según los rangos de temperatura: deshidratación (pérdida del agua libre), oxidación de compuestos ferrosos acompañado por cambios de color, deshidroxilación (perdida del agua químicamente unida), entre otros. La disminución de sus propiedades mecánico-resistentes (Módulo de Elasticidad y Resistencia a

la Compresión). La delaminación (desconchamientos: grietas paralelas a la superficie del elemento). Los agrietamientos (grietas normales a la superficie del elemento tipo red o piel de cocodrilo, grietas longitudinales en aristas). Los sobreesfuerzos por efectos térmicos (dilataciones diferenciales, gradiente térmico en la sección que genera momentos térmicos). Los cambios en las propiedades mecánicas del acero de refuerzo y la pérdida de adherencia del acero con el concreto.

### 5.5.2 Daños indirectos

En los incendios también se producen daños indirectos, inducidos por deformación impuesta en zonas alejadas del foco principal del siniestro. Estos daños son ocasionados por las distorsiones que experimentan los pórticos estructurales, debido a las grandes dilataciones térmicas diferenciales, especialmente en los envigados y las losas.

Estas deformaciones impuestas generan esfuerzos de coacción significativos en los miembros estructurales adyacentes. Al expandirse térmicamente el diafragma del piso afectado, los nodos de los pórticos se ven sometidos a desplazamientos laterales no considerados en el análisis. Esto puede derivar en fallas frágiles por cortante en columnas alejadas del foco del incendio o en la pérdida de integridad de las conexiones viga-columna, debido a la incapacidad de los detalles de armado para absorber dichas deformaciones térmicas (ver Figura 7 y caso práctico 6.4).

### 5.5.3 El acero frente al fuego

Las estructuras de acero, salvo que dispongan de protecciones pasivas bien diseñadas, tienen un desempeño muy pobre ante el fuego, lo que conduce frecuentemente a una pérdida total de la estructura (Figura 25).

Las propiedades mecánico-resistentes del acero son muy susceptibles a los cambios de temperatura. El Módulo de Elasticidad cae bruscamente a partir de los 300 °C, lo que reduce proporcionalmente también su resistencia a la deformación (*rigidez*). Como ejemplo, un perfil de acero A42 requiere en frío (temperatura ambiente) un esfuerzo de 2250 kgf/cm<sup>2</sup> para deformarlo 0,1%, pero calentado a 300 °C

requiere  $1400 \text{ kgf/cm}^2$  (62% de ese esfuerzo para la misma deformación) y a  $600^\circ\text{C}$  solo requiere  $400 \text{ kgf/cm}^2$  (18% del esfuerzo), Esto es determinante en la vulnerabilidad estructural del acero desprotegido ante siniestros de incendio.



Figura 25. Colapso a causa de incendio de una edificación industrial en estructura metálica no protegida

#### 5.5.4 Evaluación de Daños y Proyecto de Reparación de estructuras afectadas por fuego

Para poder realizar un diagnóstico acertado en el caso de una estructura incendiada, es fundamental la realización de un estudio amplio y detallado que abarque los diferentes aspectos que son requeridos investigar y siguiendo el procedimiento referido en el punto 4.3 anterior (Metodología de investigación Patológica).

En el ámbito de la patología por incendios estructurales, la comprensión del grado de afectación real de la estructura, así como la precisión alcanzada en el diagnóstico, resultan determinantes para garantizar la definición correcta del proyecto de reparación y para evitar omisiones que puedan comprometer tanto la ejecución de los trabajos, como la seguridad y durabilidad de la propia obra rehabilitada.

#### 5.6 Lesiones en Revestimientos y Acabados

En esta disciplina no solo es importante la estructura, también es esencial el estudio de los componentes no estructurales, tales como los revestimientos y acabados.

El análisis de las patologías en revestimientos y acabados constituye un indicador esencial de la calidad constructiva, dado que estos elementos representan más del **90% de la piel envolvente** y son los más expuestos al deterioro ambiental. Es por ello que, el estudio de lesiones en estos elementos **“nos permite tener una visión global, pero objetiva, de la calidad de la construcción”**.

La percepción de calidad está estrechamente vinculada a la estética observable. Izaguirre (2009) enfatiza que “la

**apreciación del sujeto común o usuario depende más de lo que percibe que de una técnica de evaluación”**, lo que convierte a los acabados en un componente crítico para la valoración del desempeño constructivo. En este sentido, la Figura 26 constituye un ejemplo claro de cómo la calidad es percibida con base en la expresión sensible o estética: dos revestimientos con materiales iguales (paneles de arcilla), pero con técnicas y especificaciones de acabados diferentes pueden ser causa probable de deterioro prematuro del revestimiento y sus acabados, en la imagen el revestimiento de paneles con cordón remetido es percibido como falla; aun cuando se asegura que no comprometen la estructura, cuando fallan los revestimientos y acabados del sistema se incrementan los riesgos estructurales. La figura evidencia que la expresión sensible, o estética, no es un atributo superficial, sino una herramienta para evaluar la ocurrencia de fallas y defectos de los revestimientos.

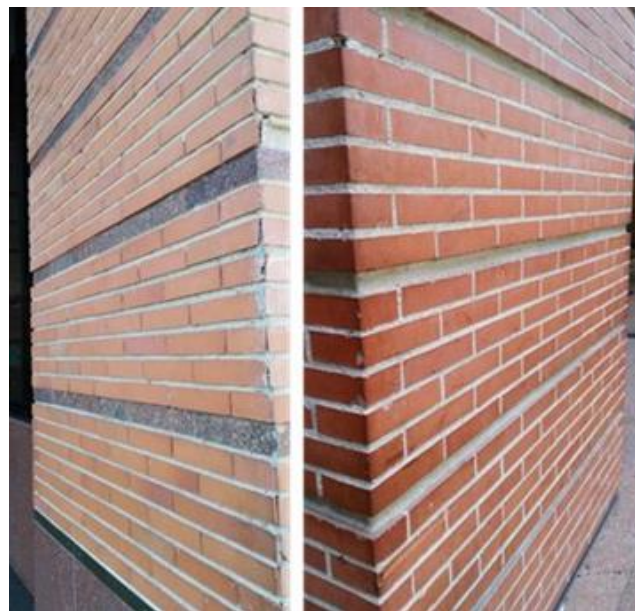


Figura 26. Dos revestimientos iguales con especificaciones de fabricación diferentes. Izquierda: con cordón remetido. Derecha: con cordón a ras

Estudios internacionales indican que **más del 90% de las lesiones** en edificaciones nuevas se originan en errores de proyecto o ejecución, mientras que la erosión natural y la contaminación ambiental representan menos del 6%.

Esta tendencia se replica en América Latina, donde investigaciones del MINVU (90 mil viviendas) y del Centro de Estudios de la Calidad de la Construcción de la Universidad Católica de Chile (CEECC-UC) (162 viviendas) muestran defectos significativos en terminaciones, especialmente en cerámicas, azulejos, puertas y ventanas, con fallas de alineación y cuadratura superiores al 52% en obras nuevas, en las cuales fueron empleados sistemas de aseguramiento de la calidad ISO 9001 (Organización Internacional de Normalización, 2015).

En Venezuela, el estudio de María Ysabel Dikdan, (2003) aporta evidencia cuantitativa clave para comprender la magnitud de las patologías en revestimientos y acabados. Su investigación, basada en 366 viviendas de siete urbanizaciones populares del estado Lara, presenta un resumen de la sintomatología de defectos constructivos. Los resultados muestran que: el **68,58%** de las viviendas presenta problemas de entrada de aguas de lluvia por defectos de diseño o ubicación inadecuada de puertas y ventanas. El **59,56%** evidencia defectos en la construcción de cerramientos. El **50,98%** presenta lesiones en revestimientos y frisos y el **28,33%** muestra lesiones en elementos estructurales.

Esos resultados demuestran la estrecha relación entre decisiones de proyecto y fallas en los acabados lo cual refuerza que las patologías en revestimientos no atienden fallas aisladas, sino síntomas de problemas sistémicos en diseño, especificaciones técnicas y ejecución. En conjunto, estos hallazgos muestran que la patología de revestimientos y acabados no solo refleja la calidad del proceso constructivo, sino que permite modelar la vulnerabilidad de nuevas edificaciones, anticipar fallas recurrentes y mejorar la toma de decisiones en diseño, selección de materiales y supervisión técnica.

La transformación de las edificaciones nuevas y de buena construcción aparente a edificaciones deterioradas y con manifestaciones patológicas evidentes, pueden tener un origen o causa probable en razones intrínsecas; la observancia de las normas de construcción, el uso de técnicas de construcción sancionadas por el tiempo y un mantenimiento adecuado redundan en una edificación de calidad con menos ocurrencias de fallas durante la vida útil de la edificación.

### 5.7 Otras patologías

Como se muestra en la Figura 6, existen múltiples causas que pueden dar origen a problemas en las obras civiles. Se han tratado acá las más frecuentes, pero no son las únicas.

Ocurren con menos frecuencia otros tipos de daños y deterioros en las construcciones que también son significativos, tales como:

Daños por uso y abuso: abrasión, erosión, desgaste, sobrecargas no previstas.

Daños debido a derrames químicos, ataque por sulfatos, reacciones álcali-agregados, cuyos principales efectos son la desagregación y disgregación del concreto

Cambios de uso, modificaciones o ampliaciones en edificaciones, que requieren un análisis exhaustivo de las propiedades y condiciones de la obra existente para poder llevar a cabo el proyecto de adecuación.

## 6. CASOS PRÁCTICOS Y LECCIONES APRENDIDAS

En los puntos previos de este trabajo se establecieron los fundamentos conceptuales, históricos y metodológicos necesarios para comprender el campo de acción de la patología de la construcción. Se abordaron los principios teóricos, el origen y evolución de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, así como las áreas disciplinares que convergen en esta especialidad. Este marco proporciona la base indispensable para interpretar adecuadamente los fenómenos patológicos que afectan a las edificaciones y para comprender la complejidad técnica, normativa y profesional que interviene en su análisis. Sobre esta plataforma conceptual se desarrolla lo que viene a continuación, la presentación de **casos prácticos**.

En este punto se exponen diversas situaciones reales que ilustran la manifestación de fallas, (defectos, daños o deterioros) en obras civiles y edificaciones, describiendo de manera sistemática **el problema observado, el proceso de diagnóstico, la propuesta de intervención y reparación, y las lecciones aprendidas**. Cada caso constituye un ejemplo concreto de cómo los principios teóricos se aplican en la práctica, permitiendo identificar causas probables, evaluar la eficacia de las soluciones implementadas y reflexionar sobre los factores técnicos, constructivos y de gestión que condicionan la calidad y la durabilidad de las obras.

Esta sección busca, por tanto, **vincular la teoría con la experiencia**, mostrando cómo el análisis riguroso de defectos o fallas contribuye a mejorar los procesos de diseño, construcción, supervisión y mantenimiento. Los casos seleccionados permiten evidenciar patrones recurrentes, errores frecuentes y oportunidades de mejora, ofreciendo al lector una visión integrada del quehacer profesional en la patología de la construcción y reforzando la importancia del diagnóstico adecuado como herramienta para la toma de decisiones.

Se omiten nombres y direcciones de las obras para hacer énfasis en la metodología y las lecciones aprendidas, sin exponer a las partes involucradas en cada caso.

### 6.1 Calidad del Concreto en Obra (Caso 1: A. Urich)

#### 6.1.1 El Problema

Durante la construcción de una torre de oficinas ocurrió la falla de un sector de losas que condujo a un estudio preliminar, mediante el cual se detectó que su origen fue por un concreto "No Conforme". Esta situación puntual, generó en los propietarios la incertidumbre sobre la calidad del concreto en el resto del edificio (16.000 m<sup>2</sup>), por lo que se solicitó una evaluación integral de la obra.

El objetivo del trabajo fue establecer si las deficiencias en la calidad del concreto eran sistémicas o aisladas, para lo cual se determinó mediante ensayos la resistencia característica del concreto ( $f_c$ ) en todo el edificio.

### 6.1.2 Evaluación y Diagnóstico

El protocolo de evaluación contempló los siguientes pasos: i) análisis de documentos disponibles sobre el control de calidad en obra; ii) levantamiento de síntomas como fisuras y juntas frías; iii) ensayos no destructivos de esclerómetro; iv) toma de núcleos de concreto para ensayo a compresión; v) análisis concatenado de la información documental y de ensayos vi) diagnóstico y recomendaciones.

En primera instancia se analizaron los antecedentes de la obra, de los cuales destaca que el concreto provino de tres fuentes distintas: i) concreto preparado en obra ii) concreto premezclado 1 y iii) concreto premezclado 2. La designación de “concreto premezclado 1 y 2 se refiere a que fueron suministrados por dos empresas distintas, con diferentes fuentes de agregados, aditivos, adiciones y diseños de mezcla, aunque se trate de la misma resistencia especificada  $f'c$ . El cliente proporcionó información de la fuente empleada para cada sector del edificio.

La inspección visual permitió detectar juntas frías y zonas con fisuras en losas, acotando sectores bien definidos que fueron agrupados según las fechas de vaciado del concreto. Luego se realizó un levantamiento esclerométrico masivo en más de 200 miembros estructurales para mapear la dureza superficial. Se detectó una alta dispersión, con un rango de valores muy amplio en el índice esclerométrico, entre 35 y 57 (Figura 27).

Seguidamente, se realizó la extracción dirigida de núcleos de concreto para ensayo a compresión. Estos resultados fueron correlacionados con el índice esclerométrico. En primera instancia, se intentó una regresión única para todo el concreto de la obra, pero no se obtuvo un buen coeficiente de correlación; al separar los lotes según la fuente de suministro de concreto sí se logró una excelente correlación para los tres casos (Figura 28).

La Figura 29 muestra los núcleos extraídos. Se aprecia una apariencia muy distinta en los núcleos correspondientes a Premezclado 2, con respecto al resto del concreto en obra, lo cual es consistente con las diferencias en las correlaciones obtenidas.



Figura 27. Evaluación de síntomas y realización de ensayos

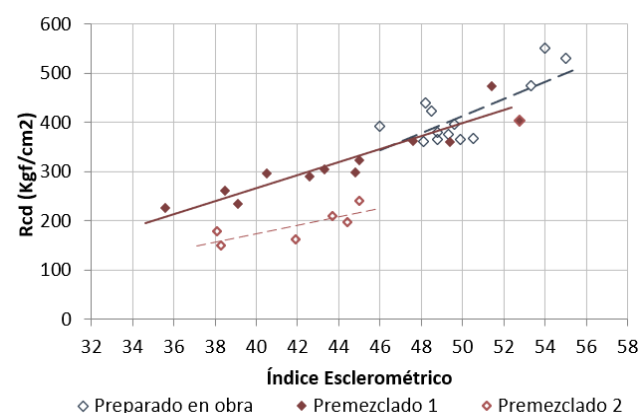


Figura 28. Correlación entre el índice esclerométrico y la resistencia a compresión de núcleos de concreto



Figura 29. Núcleos de concreto

Con estas correlaciones se pudo estimar la resistencia característica en toda la obra (Figura 30), con lo cual se concluyó que la mayor parte del concreto en obra era de calidad “conforme”. También se identificaron los sectores con calidad “no conforme, indicando la fuente de suministro, fecha de vaciado y resistencia característica recomendada para el recálculo estructural. Las zonas que presentaban grietas en las losas coincidieron con sectores de concreto “no conforme”.

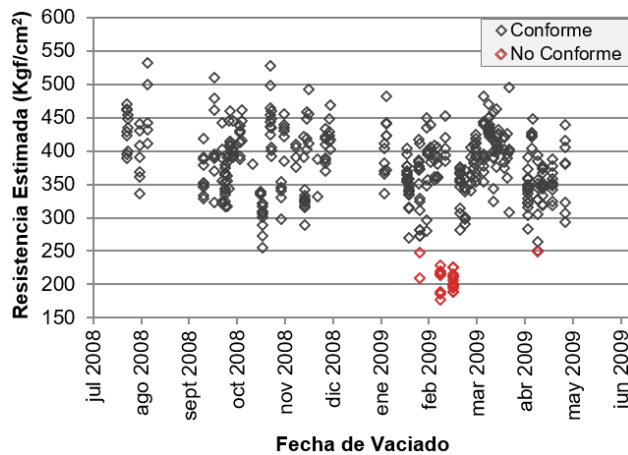


Figura 30. Resistencia característica y conformidad del concreto

### 6.1.3 Propuesta de Solución

Los resultados del estudio permitieron al ingeniero estructural responsable del proyecto tomar decisiones sobre las intervenciones requeridas, las cuales se estratificaron según el nivel de resistencia del concreto.

Para los sectores con muy baja resistencia, donde la relación demanda capacidad de los miembros estructurales no era aceptable, se procedió a la demolición controlada y reconstrucción; para sectores “no conformes”, pero que no comprometían la seguridad de la estructura luego de un recálculo con las resistencias reales, se establecieron tratamientos por durabilidad, como la aplicación de recubrimientos impermeabilizantes y alcalinizantes de base cemento y resinas acrílicas para garantizar una adecuada vida útil, evitando el riesgo de corrosión.

### 6.1.4 Lecciones aprendidas

Este caso deja varias reflexiones sobre la patología del concreto:

- Los ensayos no destructivos permiten obtener un gran número de datos útiles para estimar las propiedades o la calidad de una obra existente, pero en la mayoría de los casos requieren complementarse con la toma de muestras y ensayos más específicos. En este caso particular, se demuestra que el esclerómetro es una herramienta de preselección, pero no ofrece una correlación única con la resistencia a compresión. Se requieren correlaciones específicas y juicio experto para discretizar los datos y entender qué factores pueden afectar sus lecturas.
- La patología no actúa únicamente ante el daño visible, sino que permite validar y certificar también porciones sanas, devolviendo la confianza técnica y legal a una obra bajo sospecha.
- No todos los casos de resistencia a compresión del concreto “no conforme” implican que la obra no será segura. Se pueden estimar las resistencias reales in situ y realizar un nuevo modelo estructural empleando

dichos valores para tomar decisiones que minimicen la intervención. En cualquier caso, no solo es importante verificar las resistencias mecánicas, sino también los requerimientos por durabilidad.

## 6.2 Falla por Aplastamiento del Concreto: Estudio Mediante Inspección Visual (Caso 2: J. Beauperthuy)

### 6.2.1 El Problema

Se documenta un caso de patología estructural en un tanque de almacenamiento de hidrocarburos de gran escala. Durante la construcción se produjeron desprendimientos súbitos del concreto de recubrimiento en el anillo de cimentación, lo que causó mucha inquietud en los encargados de esta obra.

Mediante el protocolo de *Evaluación Preliminar* (Figura 8) se diagnosticó un mecanismo de falla por aplastamiento localizado, originado por cargas concentradas y excéntricas. Se propone un procedimiento de reparación y recomendaciones de diseño para prevenir recurrencias. El caso demuestra la relevancia de la inspección visual como herramienta eficaz de diagnóstico inicial en patologías del concreto.

### 6.2.2 Evaluación y Diagnóstico

La patología del concreto en obras civiles puede comprometer directamente la seguridad y durabilidad de las infraestructuras. Los tanques de almacenamiento de hidrocarburos, por su escala y función estratégica, requieren cimentaciones robustas y confiables.

El objeto de estudio es un tanque cilíndrico de acero, con un diámetro nominal de 35,00 m y una altura de 17,00 m (Figura 31). La pared del tanque, compuesta por seis anillos de acero superpuestos de espesor variable (16,76 a 11,68 mm), apoya directamente sobre un anillo de cimentación de concreto reforzado de sección 1,00 x 1,20 m. Este anillo descansa a su vez sobre una corona de 43 pilotes. El fondo del tanque a su interior lo conforma una placa de acero de 14,29 mm sobre una losa de cimentación que se apoya a su vez en una batería de 179 pilotes equidistantes.



Figura 31. Tanque en construcción

Previo a la visita de inspección, se había reportado un desprendimiento súbito de una porción aproximada de 1 m<sup>2</sup> del concreto de recubrimiento lateral y esquina superior externa del anillo de cimentación (Figura 32).



Figura 32. Delaminación del concreto de recubrimiento en el radial 114° del anillo de cimentación (1ra falla – 4 anillos)

Para el momento del reporte de esta primera falla, se encontraban instalados en sitio cuatro de los seis anillos de acero que conforman la pared del tanque.

#### 6.2.2.1 Hallazgos durante la Visita de Inspección

Casualmente, el mismo día de la visita se reporta otro incidente similar en la proximidad del radial 270°, esta vez con cinco anillos de la pared ya instalados (Figura 33).



Figura 33. 2da falla del concreto con 5 anillos instalados

El análisis en detalle tanto de la sintomatología presente en ambos daños ocurridos, como de la geometría de la sección del anillo de cimentación, la configuración de su armadura y el desplante de la pared del tanque permitió concluir que las fallas fueron causadas por un efecto de **aplastamiento del concreto**, condicionado por los siguientes factores:

- **Cargas Concentradas:** Presencia de protuberancias o resaltes en la cara superior del anillo de concreto no detectadas durante la nivelación de la cota de asiento de la placa anular donde apoya la pared del tanque. Debido a la alta rigidez vertical (axial) de la pared de acero, estos puntos absorbieron gran parte del peso acumulado en lugar de distribuirlo uniformemente (Figura 34).
- **Ausencia de Capa de Nivelación:** La placa anular de acero descansaba directamente sobre el concreto, sin un mortero de asiento que compensara irregularidades.
- **Excentricidad Crítica:** Se constató que el eje de la pared del tanque apoya a solo 17 cm del borde exterior del anillo de 100 cm de ancho (Figura 35). Esta proximidad al borde no confinado favorece el empuje al vacío y la delaminación del recubrimiento ante esfuerzos de tracción horizontal producidos por la compresión.



Figura 34. Izq. Placa anular separada del concreto base en el perímetro de la falla. Der. Placa anular en contacto pleno con el concreto en el eje de falla

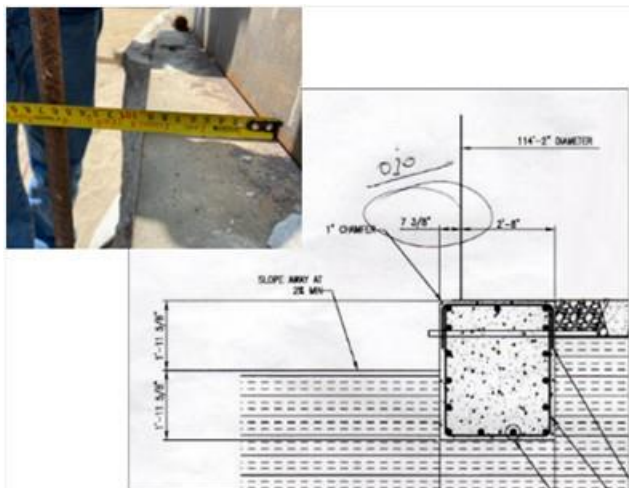


Figura 35. Verificación de la posición de la pared del tanque con respecto al borde del anillo de cimentación (17 cm), coincide con proyecto

#### 6.2.2.2 Verificación Analítica Preliminar

Mediante algunas estimaciones analíticas, se verificó que la carga de la pared con 4 y 5 anillos se ubicaba entre 1.280 y 1.500 kgf/ml. Considerando una resistencia nominal del concreto de 460 kgf/cm<sup>2</sup> (fuente: Control de calidad del concreto anillo de cimentación) y un área de contacto puntual de solo 20 cm<sup>2</sup>, se demostró que cualquier protuberancia pequeña podía superar el esfuerzo permisible al aplastamiento de concreto no confinado de  $B_u = 322 \text{ kgf/cm}^2$  (ACI 318, 2025), provocando la falla súbita observada.

#### 6.2.2.3 Explicación del mecanismo de falla

La aplicación de una carga concentrada sobre un área reducida de una sección de concreto de mayores dimensiones produce un efecto puntual de aplastamiento e induce un estado de esfuerzos triaxial complejo. Este fenómeno trasciende la compresión axial pura, involucra componentes tangenciales y tensiones de tracción lateral derivadas del efecto de Poisson. Ante la ausencia de un confinamiento efectivo hacia el borde exterior del anillo, estas deformaciones transversales generan un empuje al vacío que provoca el desprendimiento explosivo del recubrimiento. Al superar el esfuerzo actuante la resistencia al aplastamiento ( $B_u$ ), se desarrolla un cono de falla primario que actúa como una cuña, fracturando y desplazando lateralmente las zonas de concreto no confinadas por el refuerzo transversal, tal como se documenta en la Figura 36. Este mecanismo se caracteriza por su naturaleza súbita y su carácter marcadamente frágil y explosivo.

En la Figura 37 se presenta un diagrama de la distribución de tensiones de **Hendimiento** (tracción indirecta): hacia el vacío ocasionando la fractura y hacia la zona confinada de la sección del anillo de cimentación.



Figura 36. Izq. Detalle del cono de falla primario. Der. Vacío remanente luego de retirar el concreto fracturado del cono

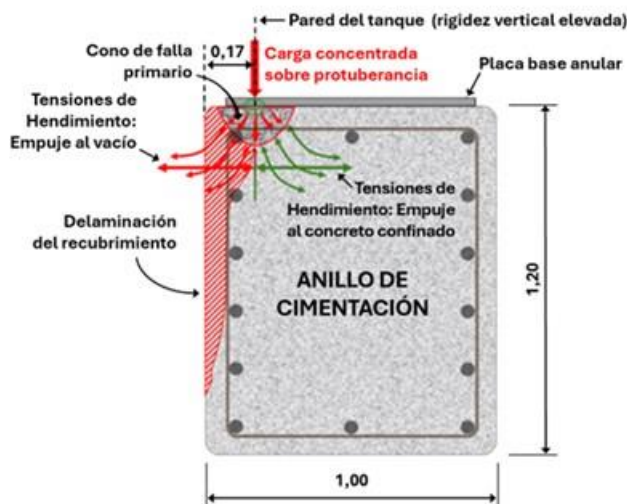


Figura 37. Diagrama de tensiones y mecanismo de falla

#### 6.2.2.4 Diagnóstico

Se concluyó que la carga concentrada se origina en protuberancias presentes en la rasante superior del anillo, las cuales no fueron detectadas al momento de su nivelación. Una vez que avanza la fabricación del tanque, el peso y rigidez del cilindro de acero se van acumulando y en lugar de repartirse uniformemente sobre el anillo de cimentación como está previsto, se consiguen estos resaltos puntuales que lo impiden. Por tanto, en la medida que el desnivel encontrado sea significativo, la presión de contacto en estos puntos es mucho mayor, pudiendo el concreto alcanzar en estos puntos su estado límite último (ELU) por agotamiento resistente (falla por aplastamiento). Al estar ubicada esta falla excéntrica sobre el anillo de cimentación (próxima al borde externo), se convierte en el “efecto de cuña”, detonante de la delaminación del recubrimiento.

#### 6.2.3 Propuesta de Reparación

A pesar de la alarma generada, se determinó que los daños eran localizados y técnicamente reparables sin comprometer la integridad global de la estructura ni la continuidad de su construcción (Figura 38).



Figura 38. Anillo de cimentación reparado

#### 6.2.3.1 Procedimiento de reparación:

- a) **Preparación de superficies:** Precorte con disco de diamante a lo largo del perímetro de la falla y escarificación mecánica hasta 7 cm de profundidad, liberando por detrás la armadura existente, mediante martillos demoledores ligeros (energía <12 J).
- b) **Refuerzo:** Instalación de conectores de corte (ganchos en "L" de varilla #4) anclados con epóxico y colocación de una nueva malla de acero (#3 @ 15 cm), según diseño.
- c) **Acondicionamiento:** Limpieza con chorro de agua a alta presión (mínimo 2.500 psi) para garantizar adherencia sin necesidad de puentes epóxicos.
- d) **Restitución de la sección:** Vaciado de mortero predosificado de reparación estructural de alta resistencia (tipo grout) mediante encofrados estancos.
- e) **Desencofrado y curado por 7 días.**

#### 6.2.3.2 Recomendaciones generales al cliente:

- Verificar el diseño de los anillos de cimentación para que la pared del tanque siempre quede ubicada dentro del tercio central de la base.
- Uso de mortero autonivelante como capa de asiento bajo la placa anular, para garantizar la distribución uniforme de cargas.
- Reparar localmente las áreas afectadas mediante el protocolo de reparación recomendado.
- Permitir continuar la construcción sin interrupciones durante las reparaciones localizadas.

#### 6.2.4 Lecciones Aprendidas

- **Valor de la Inspección Visual:** Este caso de éxito subraya cómo la **atención inmediata** de problemas estructurales complejos, mediante una inspección visual experta, sustentada en observaciones de campo y la realización de cálculos preliminares aproximados, puede dar de forma rápida y efectiva con el diagnóstico y pronóstico acertado de un caso de urgente atención, sin requerir de mayores ensayos ni modelaciones avanzadas.
- **Diseño Geométrico:** Se recomienda como regla de buena práctica en diseños de este tipo, que el eje de la

pared del tanque coincida preferiblemente con el eje del anillo de concreto, o en su defecto, mantenerse dentro del tercio central de la sección para garantizar un confinamiento adecuado del bulbo de presiones, evitando así fallas locales de borde.

- **Control de Ejecución:** Es imperativo el uso de camas de mortero autonivelante bajo las placas base para así asegurar un contacto pleno y una distribución de cargas uniforme.

### 6.3 Asentamiento de Cimentaciones en un edificio Recién Construido (Caso 3: C. Rodríguez)

#### 6.3.1 El Problema

Se presenta el caso de estudio de una estructura para uso de vivienda multifamiliar la cual presentó a los pocos años de su puesta en servicio síntomas asociados a problemas de asentamientos en su sistema de cimentaciones.

La edificación se compone de tres sectores estructuralmente diferenciados: 1) cuerpo de apartamentos: corresponde a la estructura principal de 16 niveles más el techo y la sala de máquinas. Su sistema estructural consiste en columnas y muros de concreto, y losas de concreto postensado. Presenta la particularidad, y a la vez complejidad estructural, que en la medida que el cuerpo de apartamentos crece hacia los niveles superiores, la edificación se recesa en ciertos sectores y por tanto las plantas se reducen en área. Esto significa que hay columnas que llegan solo hasta ciertos niveles. 2) áreas sociales y de servicios: este sector de dos niveles está vinculado estructuralmente a la torre principal. Alberga la piscina, depósitos y otras facilidades comunes. Su estructura consiste en columnas de concreto y una losa de concreto postensado. 3) Estacionamiento: es una edificación perimetral de dos niveles con planta en forma de "L". Su sistema estructural es único dentro del conjunto, conformado por columnas de concreto que soportan vigas de celosía de acero de gran luz. Sobre estas vigas apoya una losa de concreto con encofrado metálico colaborante. En los tres cuerpos estructurales, el sistema de cimentación se basa en pilotes prefabricados de concreto, hincados.

El inmueble presentó síntomas importantes y evidentes de asentamientos en todos sus cuerpos estructurales, con mayor magnitud en la estructura del edificio de estacionamiento y en el cuerpo de áreas sociales y servicios. En el cuerpo de apartamentos, la sintomatología indicaba una menor magnitud de los asentamientos.

Este trabajo presentó la particularidad de que por la complejidad del cuadro de daños existente se requirió el concurso de un equipo multidisciplinario conformado por ingenieros especialistas en las disciplinas de geotecnia, patología de las estructuras, análisis estructural e hidráulica.

#### 6.3.2 Evaluación y Diagnóstico

El objetivo fundamental de esta investigación fue la cuantificación de la magnitud del problema de asentamientos y el grado de afectación de las estructuras. Las actividades desarrolladas fueron las siguientes:

- a) **Revisión de documentación:** planos estructurales, el estudio geotécnico original y el reporte de la construcción de las cimentaciones.
- b) **Evaluación en sitio de la sintomatología:** grietas, deformaciones, fallos en elementos estructurales y no estructurales.
- c) **Cuantificación de asentamientos:** Se midieron los desniveles en todas las columnas de la edificación utilizando equipos de alta precisión para cuantificar la magnitud y distribución de los descensos verticales.
- d) **Análisis estructural:** Se modeló y analizó el comportamiento de la estructura tanto en sus condiciones de diseño original como en el estado deformado que tenía al momento del estudio, con el fin de evaluar la redistribución de esfuerzos y la afectación de los miembros estructurales.
- e) **Análisis hidráulico:** Se estudió la posible influencia de las variaciones del nivel freático, naturales e inducidas por construcciones cercanas, como factor contribuyente al problema de asentamientos.
- f) **Análisis geotécnico:** Se evaluó en detalle el sistema de cimentaciones existente, contrastando la información de hinca de los pilotes con el perfil del subsuelo para determinar sus capacidades de carga reales y su suficiencia frente a las demandas de la estructura.
- g) **Definición de Intervenciones:** Con base en los resultados integrados de los análisis anteriores, se definieron los miembros estructurales que requerían intervención y se sentaron las bases para la propuesta de reparación.
- h) **Preparación de Informe Técnico:** Se elaboró un informe como documento de síntesis que recogió toda la información recabada, los análisis realizados y las conclusiones del diagnóstico. Esta metodología permitió obtener los datos cualitativos y cuantitativos necesarios para formular un diagnóstico y un proyecto de reparación robustos.

La cuantificación precisa de los asentamientos permitió transformar las observaciones visuales de daños en datos numéricos que revelaron la magnitud real del fenómeno y sus implicaciones estructurales.

Para obtener una medición completa de los desniveles en toda la edificación y por una razón de accesibilidad y visuales, se emplearon dos metodologías complementarias:

**Método Directo:** Se utilizó un equipo láser en el nivel de planta baja para establecer un horizonte artificial y medir

directamente los desniveles en las columnas del estacionamiento, el área de la piscina y la porción sur de la torre de apartamentos.

**Método Indirecto:** Para las columnas inaccesibles de la torre, se realizó una nivelación de alta precisión (con un nivel Leica DNA-03) en el piso del quinto nivel, cuyos resultados se contrastaron y validaron con los puntos medidos por el método directo.

Al no contarse con un registro del nivel espacial original de la edificación, para interpretar correctamente los desniveles, se estableció un nivel de referencia "0,00" que representaría los puntos de la estructura que se consideraron sin asentamiento significativo. Este fue un trabajo sumamente importante, laborioso y que requirió del planteamiento y análisis de varias hipótesis acerca de cuál fue el nivel original de la edificación y cuales elementos se considerarían en lo sucesivo como representantes de esa elevación espacial original.

La data recolectada se procesó con los software ArcGIS de Esri y Civil 3D de Autodesk, produciéndose un plano de isolíneas de asentamiento (Figura 39)

Se definieron diferentes grados de afectación:

- Hasta 2 cm: columnas cuyo asentamiento probable está dentro del margen de error considerado (construcción/medición). Se asumió que este grupo de columnas no sufrieron asentamientos.
- 2,1 a 5,0 cm: Columnas con asentamiento leve a moderado.
- 5,1 a 8,0 cm: Columnas con asentamiento moderado a severo.
- 8,1 a 11,0 cm: Columnas con asentamiento severo a muy severo.
- 11,1 a 18,0 cm: Columnas con asentamiento muy severo.
- 18,1 a 41,0 cm: Columnas con asentamiento extremo.

Los asentamientos ocurridos en cada sector de la edificación denotan comportamientos y condiciones diferentes. En efecto, el número de columnas consideradas sin asentamiento (hasta 2 cm) que se contabilizó fue de 13 (39,4% del total de columnas) para el cuerpo de apartamentos, 4 (12,1% del total) para las áreas perimetrales donde se localiza la piscina y 1 (4,2%) para el estacionamiento. Por otra parte, las magnitudes de los asentamientos también difieren de un sector a otro. En el cuerpo de apartamentos el mayor asentamiento medido fue de 10,9 cm, en el área de la piscina fue de 21,1 cm y en el estacionamiento se registró un descenso de 40,5 cm en una de sus columnas.

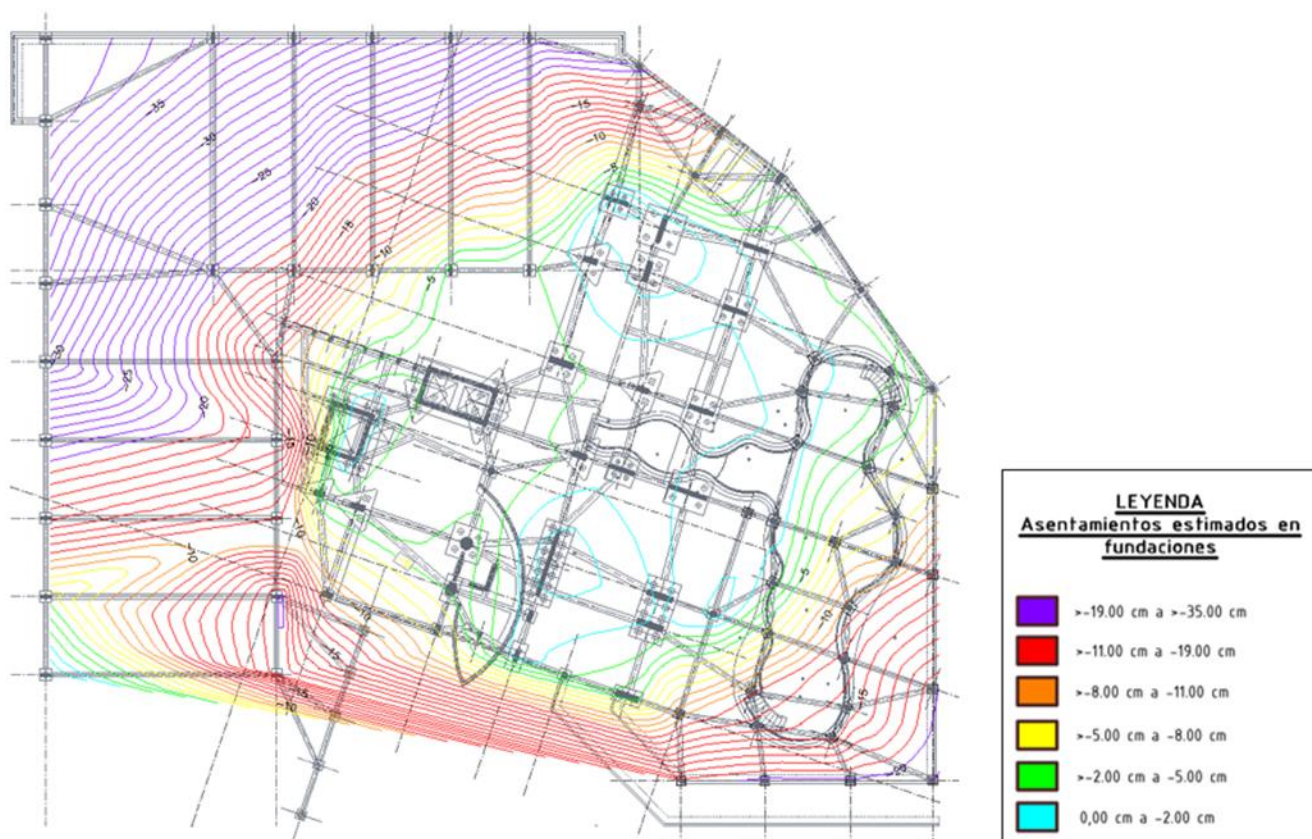


Figura 39. Plano de isolíneas de asentamiento

Otro aspecto importante considerado fue el de los asentamientos diferenciales entre columnas contiguas y las distorsiones angulares asociadas. Para la interpretación de las distorsiones angulares se siguieron los criterios de Skempton y MacDonald (1956) y Bjerrum (1963), tomándose como valor límite para la aparición de daños estructurales 1/150. Se contemplaron cuatro rangos de distorsiones angulares; a saber:

- Distorsiones mayores a 1/150: límite por debajo del cual hay daño estructural
- Distorsiones entre 1/150 y 1/300: límite en el que comienza el agrietamiento en tabiques
- Distorsiones entre 1/300 y 1/500: valores dentro de los cuales puede haber agrietamiento en tabiques
- Distorsiones menores a 1/500: límite seguro

Como resultado para la condición de distorsiones asociables a daño estructural, se obtuvo (Figura 40): 1) para la estructura del estacionamiento 8 de 15 parejas de columnas conectadas por vigas de riostra, 2) en la parte de áreas sociales y de servicios perimetrales al cuerpo de apartamentos en 29 de 69 parejas y 3) en el cuerpo de apartamentos en 3 parejas.

Otras mediciones importantes fueron las de valores de flechas en las losas de entrepiso y en los sectores de voladizo de los balcones.

#### 6.3.2.1 Inspección visual y evaluación de la sintomatología:

Se realizó una revisión general de la edificación mediante inspección visual detallada a fin de observar y calificar la sintomatología presente en miembros estructurales y tabiquerías de mampostería.

#### Afectación de miembros estructurales del edificio:

- Grietas en columnas: Se observaron síntomas de tracción, cortante y flexión en numerosas columnas del sector perimetral al sur y al este del cuerpo de apartamentos (piscina y área de servicios); asimismo en algunas columnas del estacionamiento se observaron síntomas similares. Se detectaron tres columnas falladas, las cuales se recomendó apuntalar de manera preventiva (Figura 41). Los síntomas descritos se asocian a los efectos causados por los asentamientos sufridos por las cimentaciones.
- Grietas en losas asociadas a asentamientos: Se apreciaron grietas importantes de losas en algunos sectores de la edificación, los cuales fueron consistentes con los descensos cuantificados con las nivelaciones.
- Grietas en losas en voladizo: En algunos de los apartamentos se detectaron grietas por la cara superior de losas en voladizo. Las más significativas fueron las

detectadas en aquellas losas o balcones en voladizo con las mayores luces. Se destaca que estas grietas no estaban asociadas al asentamiento de las cimentaciones.

- Grietas en vigas de riostra de cimentaciones: A través de calas exploratorias realizadas se pudo detectar que

las vigas de riostra adolecen de problemas constructivos y en general no se corresponden con la geometría indicada en los planos. Algunas de las vigas exploradas presentaban fallas y fracturas.

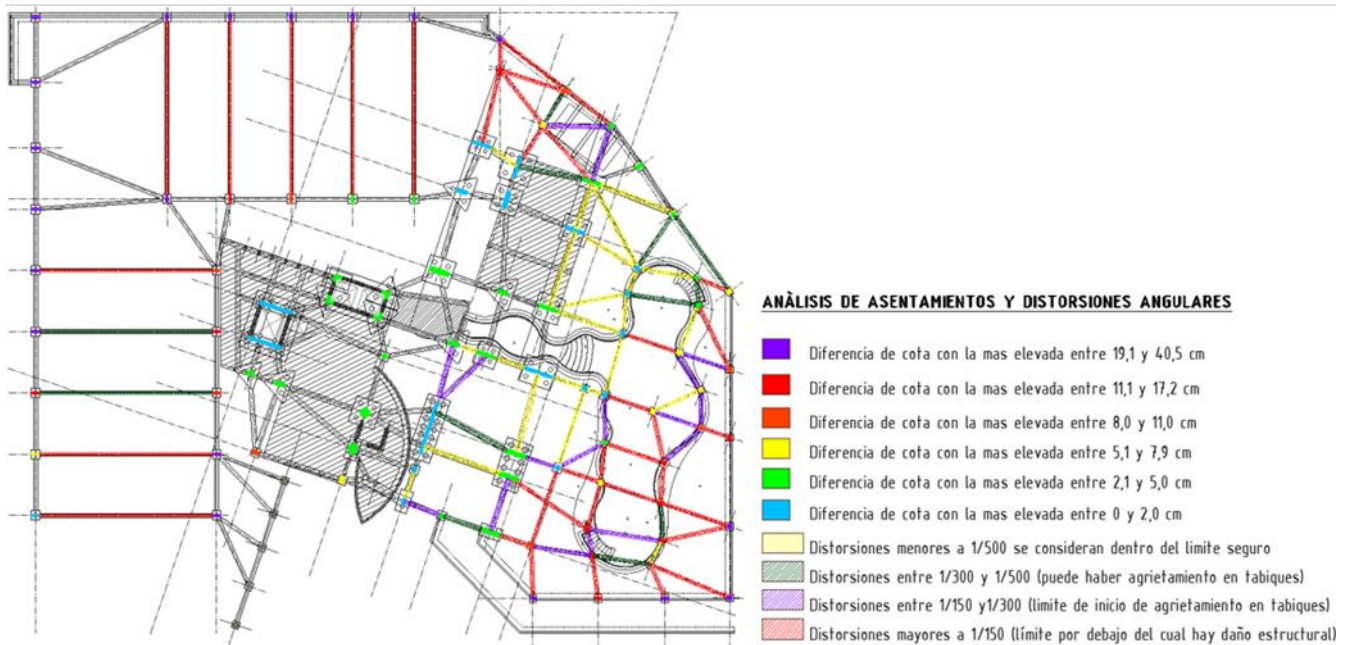


Figura 40. Representación de las distorsiones angulares



Figura 41. Apuntalamiento preventivo en columna fallada

Afectación de la estructura metálica del estacionamiento:

- Las estructuras metálicas son más tolerantes a los efectos de las deformaciones que las de concreto armado. No obstante ello, los asentamientos ocurridos son de tales magnitudes que dieron lugar a deformaciones y alabeos en algunos de los elementos

que componen las celosías. Asimismo, se apreció en algunos casos la rotura de las soldaduras en el apoyo de la cercha sobre la plancha de acero en el tope de las columnas de concreto (Figura 42).



Figura 42: Alabeo en viga metálica

Afectación de elementos no estructurales:

- Grietas en paredes: Se detectaron grietas diagonales en numerosas paredes de la edificación, características de problemas de asentamiento diferenciales de las cimentaciones.
- En términos generales las grietas obedecieron a un mismo patrón en los diferentes niveles de la

edificación y resultaron consistentes con los asentamientos ocurridos.

- Se apreciaron grietas en paredes de otros niveles que no obedecen al mismo patrón en todos los lugares donde se observaron. Se presume que los asentamientos ocurrieron de manera gradual y no todas las cimentaciones que asentaron lo hicieron a la vez, por lo cual no se descarta que las grietas hayan aparecido en diferentes momentos de la vida del edificio.

#### 6.3.2.2 Aspectos geotécnicos:

El perfil característico del subsuelo se identificó como sigue:

- Relleno artificial, espesor de 6 metros, arcilla limosa con arena, blando a firme. SPT: 3 a 47.
- Arcilla orgánica muy blanda, espesor entre 6 y 7 metros. SPT < 3.
- Limo arenoso con fragmentos de roca, duro, espesor de 4,50 metros. SPT: 10 a 50.
- Roca sana a partir de los 16,6 a 17,5 metros de profundidad. RQD 40% a 70%.
- Nivel freático a 4,50 metros de profundidad.

#### 6.3.2.3 Criterio para el análisis de las cimentaciones:

Esta actividad fue diseñada con la intención de verificar dos aspectos fundamentales: 1) Si los elementos de cimentación fueron dispuestos bajo cada columna en cantidad y tipo (suficientes para satisfacer las cargas de la estructura). 2) Si estos elementos alcanzaron la profundidad necesaria para desarrollar la capacidad de carga requerida, tanto en condición de servicio bajo cargas gravitacionales como bajo la combinación de cargas gravitacionales con cargas sísmicas.

La verificación se hizo mediante la preparación de un modelo geotécnico de cálculo elaborado sobre la base de criterios usuales de la mecánica de los suelos y la ingeniería de las cimentaciones, en este caso aplicando los factores de capacidad de carga de Meyerhof para pilotes hincados.

#### 6.3.2.4 Diagnóstico de las cimentaciones existentes:

Los análisis revelaron dos puntos críticos fundamentales:

1) deficiencias en la profundidad de hincado de los pilotes. El análisis geométrico de las longitudes de hincado de los pilotes, contrastadas con el perfil del subsuelo, reveló deficiencias graves en su enterramiento en los estratos de soporte. Se clasificaron las cimentaciones de la siguiente manera:

- Sin enterramiento (20% del total): Un total de 18 pilotes no alcanzaron los estratos de suelo residual. Estos pilotes se apoyan sobre la arcilla orgánica blanda y, por lo tanto, se consideran prácticamente sin capacidad portante.

- Enterramiento marginal (<0,50 m) (6,7% del total): Se identificaron 6 pilotes con un empotramiento mínimo en el estrato competente, una condición de alto riesgo.
- Enterramiento bajo (0,50 m a 1,25 m) (16,7% del total): Otros 15 pilotes presentan un enterramiento que se considera bajo, especialmente al tener en cuenta la fricción negativa ejercida por los estratos superiores. En conclusión, un 43,3% del total de las cimentaciones (39 de 90) presentan enterramientos nulos, marginales o bajos. Esta deficiencia constructiva explica en gran medida el fenómeno de asentamientos observado, ya que una parte significativa de la estructura no está cimentada sobre un estrato firme.

2): Insuficiencia en la capacidad de carga: además de los problemas de profundidad, el análisis de capacidad de carga versus la demanda de la estructura demostró insuficiencias significativas, incluso en pilotes con mejor enterramiento:

- Insuficiencia ante Cargas de Proyecto: Se determinó que 46 de 90 columnas (51,1%) presentaban un factor de Capacidad/Demanda menor a 1.0 para las cargas de servicio originales. Esto sugiere que hubo una sobreestimación de la capacidad admisible en la fase de diseño, probablemente influenciada por no considerar adecuadamente el efecto de la fricción negativa y por asumir enterramientos que no se lograron en la práctica.
- Insuficiencia ante Cargas de Sismo: Al considerar la envolvente de cargas sísmicas, 41 de 90 columnas (45,6%) tampoco cumplían con los requisitos de capacidad.

Estos hallazgos geotécnicos apuntaron de manera concluyente a que la causa principal del problema reside en deficiencias fundamentales del sistema de cimentación.

#### 6.3.2.5 Aspectos hidráulicos:

Los estudios hidráulicos se hicieron para: 1) Evaluar el efecto de las variaciones del nivel freático sobre el comportamiento de los suelos y por ende su influencia en el desempeño de las cimentaciones y 2) Determinar la posible influencia que pudo haber tenido en la generación de los asentamientos la excavación y abatimiento del agua subterránea en una obra de construcción que se desarrollaba vecina al edificio.

Luego de analizar las informaciones hidrológicas y de laboratorio, mediciones de piezómetros y el resultado de pruebas de bombeo, con el auxilio de los softwares Plaxis 2D (Bentley Systems) y SVFLUX (SoilVision Systems) se modelaron distintos escenarios del problema, llegándose a la conclusión de que tanto el abatimiento del nivel freático en la excavación vecina como las fluctuaciones naturales de este no tenían influencia en la generación de asentamientos en la magnitud como la medida.

### 6.3.3 Propuesta de Solución e Intervención

Los objetivos planteados a ser cubiertos con las intervenciones fueron los siguientes:

- Reforzar o restituir las cimentaciones existentes que así lo requiriesen para llevarlas a unos niveles de servicio que implicasen un desempeño idóneo bajo condiciones aceptables de seguridad y así solventar el problema de asentamientos debido a insuficiencias de diseño y/o construcción.
- Intervenir aquellos miembros estructurales de concreto armado lesionados a consecuencia de los asentamientos con el fin de restituir sus niveles de desempeño nominales.
- Intervenir los miembros estructurales de acero que así lo requiriesen para relajar las tensiones parásitas derivadas de los asentamientos diferenciales.
- Diseñar y ejecutar un alzado de partes de la estructura de concreto armado con la finalidad de disminuir tensiones parásitas derivadas de los asentamientos.
- Reforzar las losas en voladizo que tuviesen lesiones estructurales.
- Restaurar la integridad de los elementos no estructurales afectados.
- Restituir todos los sistemas de drenaje pluvial y de cloacas afectados por los cambios en las pendientes.
- Instalar un sistema de monitoreo en las estructuras para controlar su comportamiento durante la fase de ejecución de las obras y posteriormente, validar las asunciones hechas con el proyecto de intervención.

#### 6.3.3.1 Recimentaciones

Como sistema de recimentación se adoptó el de micropilotes, técnica de uso universal para este tipo de condiciones y demandas de obra debido a su adaptabilidad a espacios reducidos, su proceso de construcción que puede ser muy bien controlado, su alta capacidad de carga y su costo.

Dentro de la gama de sistemas de micropilotes disponible, se seleccionó el de elementos tipo barra de acero cementada, contruidos a rotación dentro de una camisa de acero para refuerzo y para el sostenimiento parcial y protección dentro de los estratos de menores cualidades mecánicas y llevados hasta los estratos competentes para su empotramiento.

Algunas de sus características relevantes fueron:

- Diámetro de la perforación: 219 mm los primeros 15 metros y luego 190 mm hasta llegar a la cota de fondo establecida a la profundidad de 26 metros
- Diámetro externo de la tubería de revestimiento: 5,0" (127 mm)
- Espesor de pared de la tubería de revestimiento: 9,19 mm
- Tipo de barra de refuerzo: N.º 18 All Thread Bar, Grade 75

- Diámetro de la barra de acero (refuerzo principal del micropilote): 2 ¼"-3"

#### 6.3.3.2 Alzado de estructuras y restitución de su integridad:

Los análisis y cálculos estructurales indicaron la necesidad de alzar algunas estructuras buscando tres objetivos fundamentales: 1) Lograr una disminución de tensiones en las estructuras, y por ende una mejoría en su desempeño, 2) Lograr un beneficio en el área común existente sobre la losa del estacionamiento al poderse eliminar la sobrecarga impuesta por los sobrepisos para renivelación que se habían colocado en el tiempo y 3) Lograr un beneficio estético en el área de la piscina al mejorar la relación entre el nivel del agua y el nivel del borde.

Los trabajos de alzado son sumamente delicados y se hacen bajo una programación detallada y siguiendo protocolos estrictos toda vez que su ejecución debe evitarse ocasionar daños a la estructura. Por ello, para la ejecución de los alzados se hizo un detallado análisis de los valores de restitución, de las técnicas particulares a ser empleadas, los apuntalamientos, sostenimientos temporales y medidas de seguridad y las labores de instrumentación y control.

#### 6.3.4 Lecciones aprendidas

Siendo el diagnóstico que el problema se suscitó por deficiencias en los estudios y proyectos geotécnicos de un sitio donde ya se tenía tradición de presencia de suelos blandos y compresibles, esta condición local ya hacía obligatorio dejar en segundo término los aspectos de economía en los estudios, dándole prevalencia a la solvencia profesional de los llamados a participar. La realidad demostró que la actuación profesional del responsable geotécnico fue insuficiente en la exploración, en el reconocimiento exhaustivo del perfil de suelos y en su correcta caracterización. Además, los criterios de diseño y cálculo de la cimentación fueron simplistas, incorrectos e indebidamente optimistas.

Fue determinante la omisión de los profesionales responsables de la construcción y de la inspección de la obra de cimentación al no haber analizado en profundidad y detalle los diseños y recomendaciones hechas por el ingeniero geotecnista. De haberlo hecho, se hubiese modificado el proyecto y evitado los daños sufridos por la estructura. La trascendencia económica de estas omisiones y errores fue significativa.

Se destaca la importancia de conformar equipos multidisciplinarios de profesionales para enfrentar casos complejos donde se suman aspectos geotécnicos, hidráulicos, estructurales y de patología.

### 6.4 Incendio en Edificio Residencial (Caso 4: A. Urich)

#### 6.4.1 El Problema

Se presenta el caso de estudio de una edificación afectada por fuego. El siniestro generó preocupación entre los propietarios del edificio, por lo cual se solicitó una investigación técnica para evaluar y reparar los daños estructurales. Se trata de un edificio con estructura de concreto reforzado, conformado por varios cuerpos estructuralmente independientes. El siniestro se originó en el nivel sótano 2 en un cuerpo destinado a estacionamiento (Figura 43).



Figura 43. Vista general del área del siniestro

#### 6.4.2 Evaluación y Diagnóstico

En primera instancia, se llevó a cabo una inspección visual preliminar para decidir, por una parte, las medidas preventivas de emergencia a tomar a fin de resguardar el área y asegurar la integridad y estabilidad de la estructura afectada; y por la otra, estimar el grado de afectación estructural para definir el alcance de los estudios posteriores requeridos para la evaluación en detalle y su estimación de costos.

Luego se desarrolló la evaluación en detalle con el objetivo de precisar la magnitud y extensión de los daños, así como las acciones necesarias para la reparación. La evaluación comprendió las siguientes actividades:

- Revisión de planos del proyecto.
- Inspección visual y censo de daños.
- Auscultación táctil con herramientas de mano.
- Ensayo de ultrasonido.
- Extracción de núcleos de concreto (coredrills), inspección visual y ensayo a compresión.
- Interpretación de resultados y diagnóstico.
- Proyecto de reparación.

Esta metodología se describe en Beupérthuy, J. y Scannone, R. (2009). A continuación, se resumen los aspectos más importantes encontrados en este caso particular.

Se detectaron síntomas de exposición a más de 250 °C: cambio de color en el concreto, fisuras tipo “piel de cocodrilo”, delaminación y desprendimiento, además de acero de refuerzo al descubierto. Las losas nervadas sufrieron fracturas y desprendimiento de bloques de arcilla. Fuera del área expuesta directamente al fuego, algunas columnas presentaron grietas de cortante, generadas por dilataciones térmicas, lo cual califica como daños indirectos (Figura 44).



Figura 44. Daños indirectos: grietas por cortante en columnas

Los ensayos permitieron detectar lesiones que no eran apreciables a simple vista: con la prueba táctil-auditiva se detectó delaminación del concreto, que consiste en la separación de porciones del concreto de recubrimiento en capas paralelas a la superficie del miembro estructural. Con el ultrasonido se logra estimar la profundidad del daño, lo cual fue corroborado con la toma de núcleos (Figura 45).



Figura 45. Ensayos no destructivos. Prueba táctil-auditiva (izq.); Ensayo de ultrasonido (der.)

La Figura 46 muestra la toma de un núcleo en viga, el cual salió disgregado en múltiples partes, indicando daños severos. Se aprecia también que las lesiones que se apreciaban superficialmente en dicha viga no lucían tan severas.

El estudio permitió acotar el área afectada, la cual se limitó al entrepiso S2-S1 del cuerpo de estacionamiento. Una vez analizados los resultados de la investigación, se obtuvo el siguiente diagnóstico:

Se presentaban daños severos, tanto por acción directa al fuego, como por efectos indirectos debidos a dilataciones térmicas. Algunas losas y vigas presentaban un nivel de deterioro directo tan severo y extenso que comprometía seriamente su capacidad estructural y no justificaba ni técnica ni económicamente su reparación parcial, por lo que se decidió demoler y reconstruir dicho sector. El resto de los miembros estructurales eran factibles de recuperar técnicamente mediante procedimientos de reparación que le devuelvan sus condiciones originales, los cuales se describen en el siguiente punto.



Figura 46. Núcleos de concreto indican la alta disgregación interna, no apreciable en superficie

Se destaca que numerosas lesiones identificadas mediante los ensayos no resultaban perceptibles visualmente; en consecuencia, la ausencia de estos ensayos habría llevado a subestimar la magnitud del daño estructural que presentaba este cuerpo del edificio.

#### 6.4.3 Propuesta de Solución e Intervención

La metodología de intervención propuesta para la rehabilitación estructural del sector siniestrado se agrupó en cuatro estrategias macro, según el grado de deterioro encontrado:

##### 6.4.3.1 Daños críticos, directos por fuego: Reparación a sección completa

Se ejecutó fundamentalmente en aquellos tramos de losas nervadas con daños muy intensos tanto en magnitud como extensión, donde se procedió a su demolición a sección completa y reconstrucción total (Figura 47).



Figura 47. Preparación para la reconstrucción de losas

##### 6.4.3.2 Daños severos a moderados, directos por fuego: Reparación y restitución del concreto y acero afectado

Se puede resumir en los siguientes pasos: remoción del concreto afectado, preparación de superficies remanentes empleando chorro de agua de alta presión, encofrado de las secciones a ser restituidas y reposición del concreto removido mediante morteros fluidos vaciables o con morteros predosificados tixotrópicos de retracción compensada aplicados a mano (Figura 48).



Figura 48. Restitución de secciones de concreto en vigas y losas empleando mortero tixotrópico

Antes de remover el concreto deteriorado, se verificó si era necesario apuntalar, ya que el proceso de escarificación implica quitar gran parte de la sección efectiva de los elementos intervenidos y esto afecta notablemente su capacidad estructural.

La remoción del concreto afectado se realiza mediante escarificación usando martillos eléctricos o neumáticos de baja energía (<12 J), hasta lograr pasar al menos 2 cm por detrás del acero de refuerzo y continuando hasta conseguir concreto sano.

La adecuada preparación de las superficies de concreto remanente constituye una etapa fundamental para asegurar la correcta integración del material de reposición con el concreto existente. Inicialmente, se realiza un repaso manual mediante piqueta y cincel para remover cualquier porción de concreto débil o fracturado; posteriormente, se aplica un chorro de agua a alta presión (>3000 psi). Este

procedimiento permite obtener un sustrato de concreto en condiciones óptimas: sano, firme, limpio, rugoso (con un perfil de rugosidad superior al CSP 7) y en condición saturada con superficie seca, conforme a los requisitos establecidos.

#### 6.4.3.3 Daños leves, directos por fuego: Tratamientos superficiales

El proyecto de rehabilitación también incluyó un tratamiento de rehidratación y realcanilización del concreto con afectación leve, empleando un tratamiento superficial con lechada de cemento modificado con resinas acrílicas, como protección para regresarle a la estructura condiciones adecuadas de durabilidad.

#### 6.4.3.4 Daños indirectos por dilataciones térmicas: Refuerzos con sistema CFRP

Para la reparación de las lesiones indirectas en columnas se empleó un refuerzo con sistema CFRP (Compuesto de Polímeros Reforzados con Fibras de Carbono, por sus siglas en inglés), dispuesto en dirección transversal (refuerzo a corte), en una configuración envolvente (Figura 49).

Es importante destacar que todo proyecto de este tipo requiere previamente ubicar y cuantificar con precisión las áreas afectadas y los tratamientos necesarios. La matriz de daños debe convertirse en partidas de obra y cálculos métricos que incluyan todas las actividades, incluyendo obras temporales y protecciones. Solo así se logra una planificación financiera y de tiempos efectiva. En este caso particular, un adecuado y exhaustivo estudio previo, permitió lograr ese objetivo, con una desviación mínima, de menos de 10% en la inversión realizada por el condominio para rehabilitar el estacionamiento (Figura 50).



Figura 49. Reparación de daños indirectos en columnas empleando sistema CFRP



Figura 50. Obra reparada y rehabilitada

#### 6.4.4 Lecciones aprendidas

La rehabilitación de una obra afectada por incendio implica una inversión significativa en la etapa de evaluación y ensayos para poder lograr un diagnóstico acertado.

En este caso, se identificaron daños internos no evidentes a simple vista; la omisión de esta fase habría resultado en intervenciones incompletas y que varios miembros estructurales quedaran con lesiones que los hacían vulnerables.

Un diagnóstico exhaustivo facilita el desarrollo de un proyecto de reparación fundamentado, que incluya procedimientos detallados, especificaciones técnicas de construcción y materiales, partidas de obra y cálculos métricos.

De esta manera, la estimación de costos resulta precisa, lo que permite a los propietarios llevar a cabo una rehabilitación que restituya las condiciones nominales de la estructura con seguridad, durabilidad y una adecuada planificación financiera que minimice imprevistos.

### 6.5 Ataque de Sulfatos a un Tanque Anaeróbico de la Planta de Tratamiento de Aguas de una Industria Licorera (Caso 5: R. Malavé)

#### 6.5.1 El Problema

Uno de los daños más frecuentes en estructuras de concreto armado es la corrosión del refuerzo, inducida por procesos de carbonatación o por la penetración de iones cloruro. Sin embargo, existe un mecanismo menos común pero igualmente severo: el ataque por sulfatos, que afecta inicialmente la matriz de concreto y, en etapas posteriores, puede también inducir corrosión del refuerzo.

El concreto armado, por su naturaleza alcalina, es altamente vulnerable ante ambientes ácidos, en particular al ácido sulfúrico, frente al cual no resiste exposiciones a altas concentraciones ( $\approx 98\%$ ). Las principales reacciones que explican el deterioro son:

**Ataque directo:** el ácido sulfúrico disuelve los compuestos hidratados, comenzando por la cal, generando iones de calcio solubles que se lixivian. Esto incrementa la porosidad y provoca una destrucción progresiva desde la superficie hacia el interior. La velocidad del proceso aumenta con relaciones agua/cemento elevadas.

**Formación de ettringita expansiva:** el aluminato tricálcico del cemento ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) reacciona con agua cargada de iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), originando ettringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ ). Este producto expansivo genera fisuración, hinchamiento y, en casos severos ruptura del concreto (Mehta 1976).

En este trabajo se presenta la experiencia de una estructura afectada por el ataque de sulfatos, que forma parte de la planta de una empresa de licores. A un año de su puesta en servicio un tanque digestor anaeróbico de concreto armado, específicamente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria, presentó manifestaciones de daño en la parte superior de su cúpula. En primera instancia, se llevó a cabo una inspección visual preliminar para determinar el grado de afectación y definir el alcance de los estudios posteriores requeridos para la evaluación en detalle. Luego se buscó toda la información histórica de la estructura y la caracterización del ambiente, para realizar la evaluación diagnóstica. (Rosa Malave et. al, 1998).

#### 6.5.2 Evaluación y diagnóstico

Las características constructivas del tanque son: configuración cilíndrica con anillo exterior pretensado. Cúpula reforzada con doble malla de barras de  $\varnothing 1/8''$  y de barras de  $\varnothing 1/4''$ , en el sector comprendido entre el borde del anillo y 7 m radiales; más allá, una malla simple inferior con barras de  $\varnothing 1/4''$ . Espesor total de losa: 10 cm, con recubrimiento máximo de 3 cm. Tiene una válvula de

seguridad que se dispara a presiones superiores a 18" de agua.

La caracterización del ambiente: internamente el agua cruda que ingresa al tanque: pH  $\approx 7$ , DQO  $\approx 20.000$  ppm, sulfuros  $\approx 350$  ppm, sulfatos  $\approx 7.000$  ppm, sólidos disueltos  $\approx 23,2$  g/l, gas interno: 65%  $\text{CH}_4$ , 34,7%  $\text{CO}_2$ , 0,3%  $\text{H}_2\text{S}$  y trazas de  $\text{N}_2$ , CO y  $\text{H}_2$ . Externamente el digestor está rodeado de dos tanques desulfuradores destapados de agitación continua, (Figura 51). En consecuencia, es un ambiente industrial con condiciones agresivas severas, considerado como clase de exposición Q4 según NTF 4015:2012 (FONDONORMA, 2012).



Figura 51. Ambiente externo del Tanque Digestor

Manifestaciones de daño: Se observaron fisuras aleatorias, desprendimiento del recubrimiento y manchas rojizas y negras, ubicadas en la parte superior de la cúpula, cercano a la válvula de seguridad, en la zona contraria a la dirección preferencial del viento. Las paredes y el anillo permanecieron en buen estado. En la Figura 52 se tiene un esquema dimensional del tanque Anaeróbico y detalles de la degradación observada en el concreto.

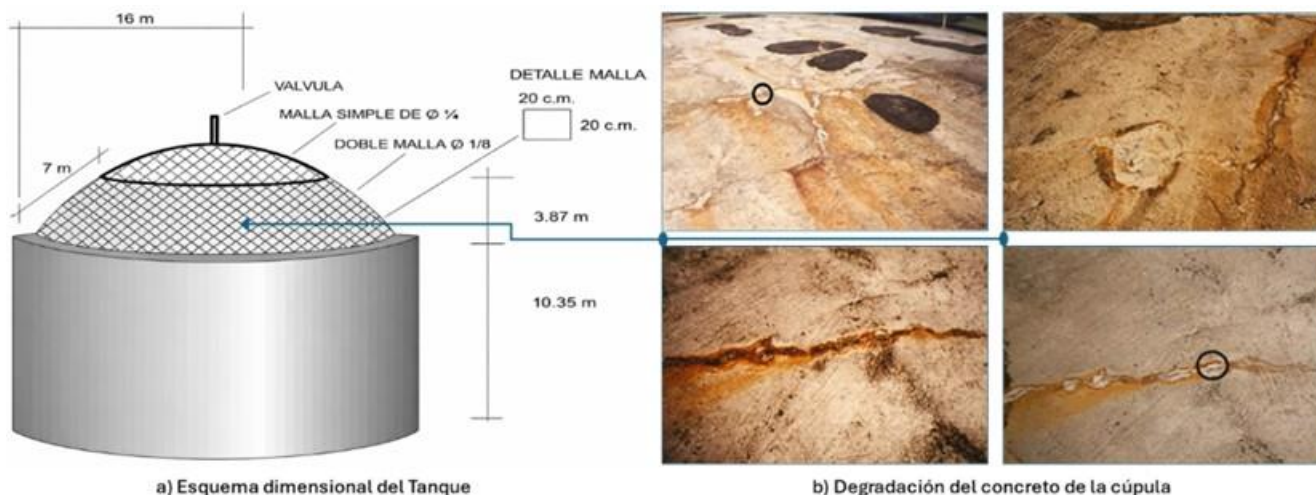


Figura 52. a) Dimensiones del tanque Anaeróbico. b) Detalles de la degradación observada en el concreto

#### 6.5.2.1 Ensayos realizados:

Se aplicaron pruebas en cuatro zonas de la cúpula (Figura 53): Esclerometría: resistencia promedio 150 kg/cm<sup>2</sup>, inferior al diseño (210 kg/cm<sup>2</sup>). Ultrasonido: zonas 1 y 2 evidenciaron agrietamiento profundo; zonas 3 y 4 mostraron respuesta homogénea. Análisis químico: cloruros dentro de límites aceptables (<0,2%); sulfatos muy elevados (zona 1: 10,7%; zona 2: 12,9%; zona 3: 0,89%; zona 4: 0,97%). Difracción de rayos X: presencia de azufre en zonas 1-3; yeso en zonas 2 y 3; calcita predominante en zona 1 (Figura 54). Las características de la losa y su uso impidieron hacer extracción de núcleos para determinar resistencias mecánicas, absorción capilar o porosidad.

#### 6.5.2.2 Diagnóstico:

Los especialistas Shupack & Suarez (1989) y McCarthy & Stith (1992), quienes han reparado tanques similares a éste, indican que en la mayoría de los casos el deterioro en tanques de concreto pretensado, ocurre primeramente en el domo y en el anillo, tal como se observó en este caso. Con base a los ensayos realizados se determinó que el diseño de la losa domo es inadecuado para el ambiente, malla sencilla en la parte más alta con recubrimiento inferior de 3 cm, sin revestimiento protector para ambientes ácidos. Por lo tanto, el deterioro se atribuye a disminución del pH en la fase acuosa de los poros que favoreció el ingreso de ácidos (H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>) desde el exterior. Se desconoce diseño de mezcla de concreto, resistencia de diseño 210 kgf/cm<sup>2</sup>.

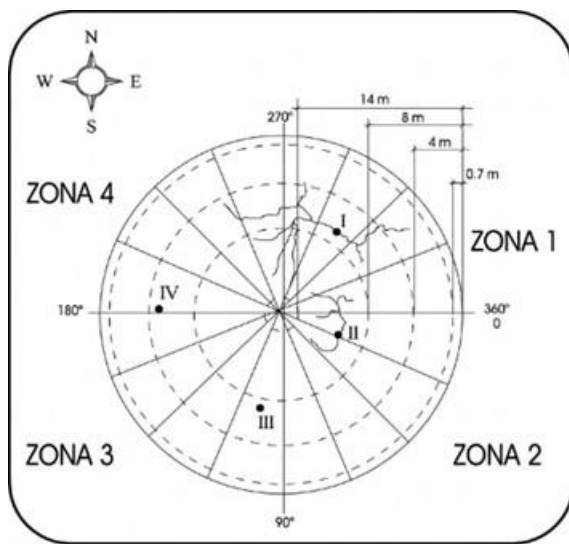


Figura 53. Esquema de distribución de las grietas en el domo digestor y zonas usadas para los ensayos

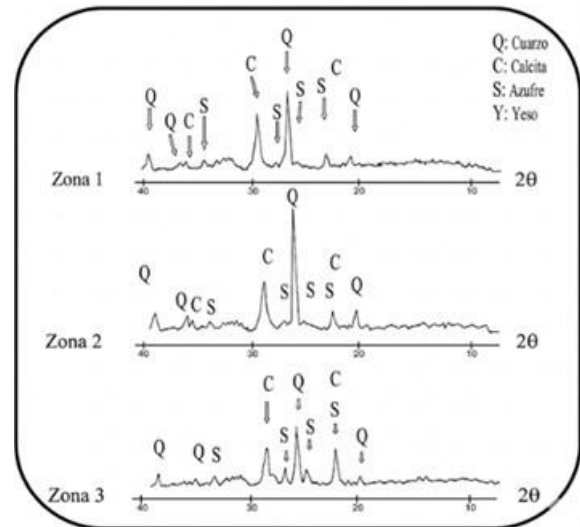


Figura 54. Difractograma de rayos x de muestras de polvo de concreto extraído de la cúpula

#### 6.5.3 Propuesta de Reparación

Debido al estado de deterioro del domo se recomendó la reposición de la cúpula mediante dos alternativas: a) Demolición de la losa existente y construcción de una nueva, lo cual implica parada del proceso de tratamiento de las aguas. b) Uso de la losa como encofrado perdido para una nueva sobre cúpula. En este caso se aumentan los esfuerzos en la zapata del muro pared en 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>, por tanto se debe investigar el suelo, también requiere la colocación de anclajes y epóxicos entre la nueva losa y las paredes para garantizar comportamiento monolítico. El diseño de mezcla de concreto en ambas alternativas, según las recomendaciones de durabilidad concreto debe ser: Cemento Portland tipo V (u otro resistente a sulfatos, contenido de C3A <5%). Relación agua/cemento ≤ 0,40. Dosificación mínima de 380 kg/m<sup>3</sup> de cemento. Uso de aditivos que mejoren la trabajabilidad del concreto con el objeto de reducir la relación agua/cemento. Espesor de recubrimiento mínimo 7 cm. además colocar un revestimiento superficial de poliuretano.

La empresa optó por la segunda alternativa. El proceso completo, desde la solicitud de asesoría hasta la reparación, tomó dos años.

#### 6.5.4 Lecciones aprendidas

El daño observado en estos tanques, cuya vida útil resultó sorprendentemente corta, fue provocado principalmente por un diseño inadecuado frente al ambiente de exposición. Este hecho evidencia que, al elaborar un proyecto, es fundamental que los especialistas intervinientes, además de aplicar los conocimientos estructurales indispensables para garantizar una estructura segura y estable, consideren de manera rigurosa las condiciones ambientales que rodearán la obra para que sea una estructura durable.

La lección aprendida: el daño se habría evitado mediante la incorporación de un recubrimiento adecuado de las mallas internas de la cúpula, que asegurara su aislamiento, así como la aplicación de un revestimiento protector capaz de resistir el ataque de agentes ácidos, es decir los requerimientos de una estructura frente a un ambiente químicamente agresivo Q4.

## 6.6 Análisis de degradación y propuesta de solución empleando modelo de elementos finitos para una estructura de acero afectada por corrosión (Caso 6: S. Valle)

### 6.6.1 El problema

Se realizó la evaluación de manifestaciones patológicas en una edificación con estructura de acero. Las afecciones se ubican en el sistema de planchas bases para columnas de apoyo en los extremos del edificio, donde se pudo evidenciar un deterioro importante debido a procesos de corrosión, no corregido a lo largo de los años. El deterioro fue evidente, presentando delaminación en los elementos que conforman el sistema de planchas base. Al tratarse de un sistema de apoyo directo, la estabilidad global de la edificación pudiera verse comprometida ante la progresión del deterioro del sistema de apoyo.

### 6.6.2 Evaluación y diagnóstico

La edificación, para efectos prácticos, ha sido seccionada espacialmente en 2 regiones: Alas o salientes y Núcleo de la edificación (Figura 55).

Las alas o salientes son las regiones de interés en evaluación. Estos salientes poseen un sistema estructural metálico de cerchas laterales de aproximadamente 7 m de altura, con un área en planta desde el núcleo de la edificación hasta su extremo de 18 metros de largo por 12 m de ancho, resultando en 216 m<sup>2</sup>. La edificación posee 4 salientes idénticos. Cada uno de estos salientes se apoya sobre 2 columnas pertenecientes al núcleo y 2 columnas adicionales en cada uno de los salientes, separadas a 12 m del núcleo de la edificación (Figura 56).

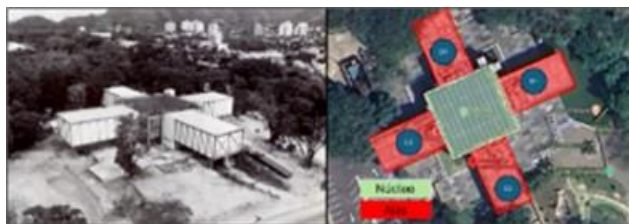


Figura 55. Fotografías áreas y distribución de espacios

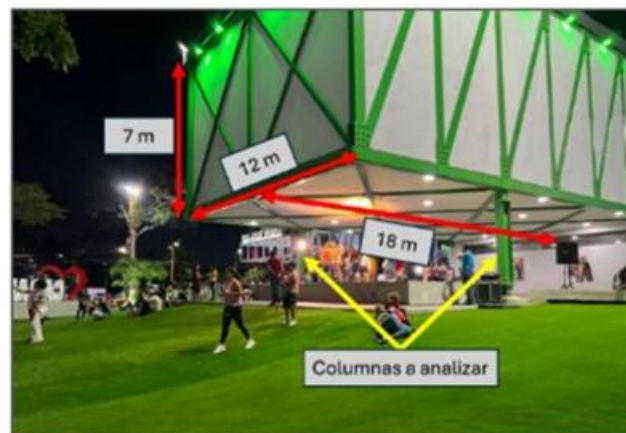


Figura 56. Dimensiones aproximadas de las alas del complejo

#### 6.6.2.1 Visita técnica

Como parte de la evaluación y diagnóstico, se realizó una inspección visual, donde se pudo constatar el estado del sistema estructural integral de las alas del complejo, con un énfasis especial en el sistema de planchas base de las columnas metálicas en cada una de las alas. Durante la visita no se apreciaron daños o deterioros importantes a nivel de la superestructura, el deterioro se encontraba focalizado exclusivamente en el sistema de planchas base.

Las columnas metálicas de cada módulo se aprecian en buen estado y sin signos de deterioro o sintomatologías que indique fallas estructurales; sin embargo, el sistema de planchas base en la mayoría de los casos sí presentan desprendimiento de su revestimiento. El mismo se sospecha es causado por surcos de agua que pasan a través de esta durante la época de lluvia en combinación agentes biológicos asociados a los animales de la zona.

En la Figura 57, se pueden apreciar estados de corrosión avanzados, particularmente en las asociadas a las alas 1 (verde) y 3 (amarilla), acorde a la numeración asignada en la Figura 55. En la Figura 58 se presenta los esquemas estructurales levantados por el ente contratante asociados al detallado de las uniones en cuestión.



Figura 57. Sistema de plancha base articulada de las 4 alas

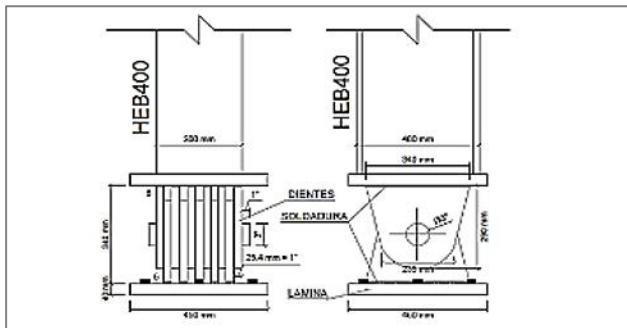


Figura 58. Esquema de conexión articulada ubicada en las columnas metálicas de cada ala del complejo

En el esquema anterior, se aprecia que cada rigidizador que conforma la unión articulada, son planchas metálicas de 1" (25 mm) de espesor, con un total de 11 planchas, mientras que las planchas extremas poseen espesores de 40 mm.

#### 6.6.2.2 Modelo matemático:

Basado en información suministrada por el ente contratante, se pudo recrear un modelo matemático con la finalidad de estimar las cargas actuantes de diseño y de servicio sobre las planchas bases (Figura 59).

#### 6.6.2.3 Evaluación posterior a la limpieza de superficie:

Se realizó una limpieza de superficie de las 8 planchas base, por medios mecánicos, chorros de vapor a alta presión, con la finalidad de eliminar las regiones corroídas del acero y así poder constatar el estado real en términos de pérdida de secciones. A continuación, se muestran imágenes los elementos de acero posterior a la limpieza (Figura 60).

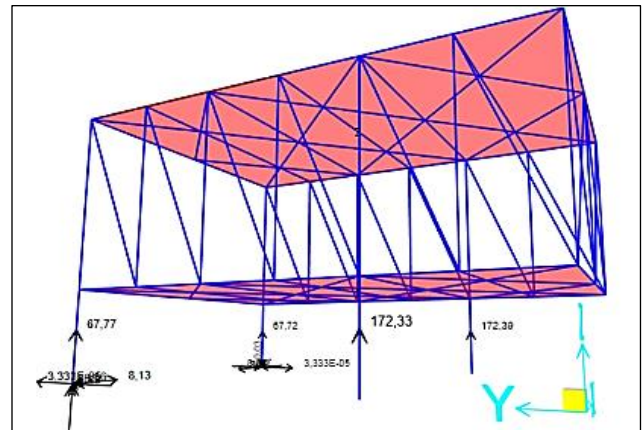


Figura 59. Reacciones por combinación de diseño

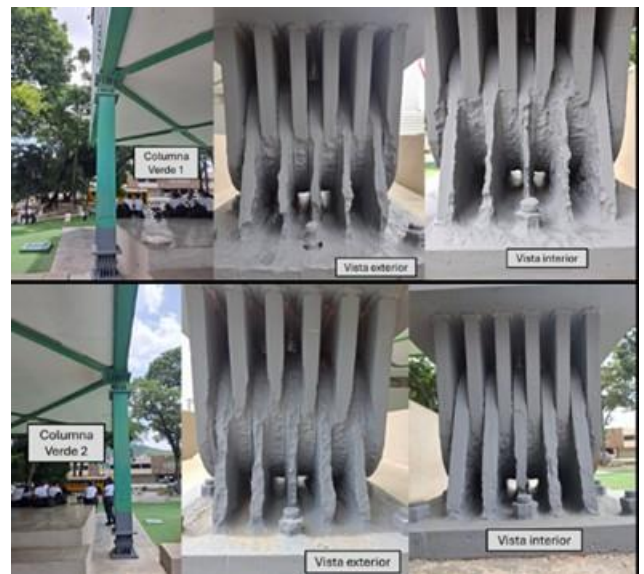


Figura 60. Situación post-limpieza típica lograda en las bases

#### 6.6.2.4 Análisis de evidencia encontradas post-limpieza:

Los elementos de algunas de las bases presentaron disminución importante de su sección en los rigidizadores inferiores, con pérdidas de hasta un 40% a 50% de su espesor nominal.

#### 6.6.2.5 Análisis de la unión en situaciones encontradas empleando modelos de elementos finitos:

A continuación, se presenta el análisis estructural y de resistencia de la unión articulada en diversas situaciones, lo cual es esencial para la toma de decisiones. El análisis se realizó mediante la simulación matemática por elementos finitos (Figura 61 a Figura 63).

De acuerdo con el esquema anterior, se consideró la pérdida de sección útil en la base de los rigidizadores, reduciendo su ancho efectivo a causa de la corrosión. Para el análisis se usaron las cargas axiales obtenida mediante el análisis estructural del modelo.

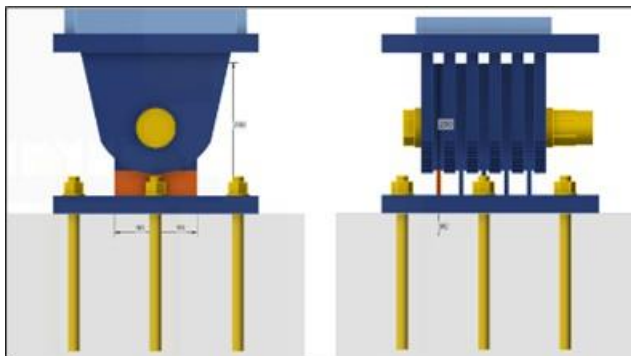


Figura 61. Vista geométrica del modelo de cálculo en condición reducida

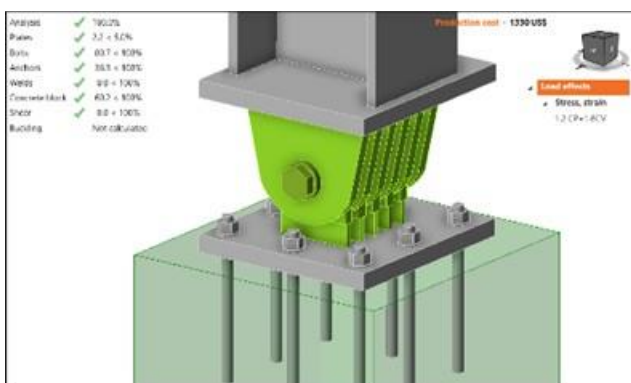


Fig. 62. Verificación tipo semáforo de la capacidad de la conexión

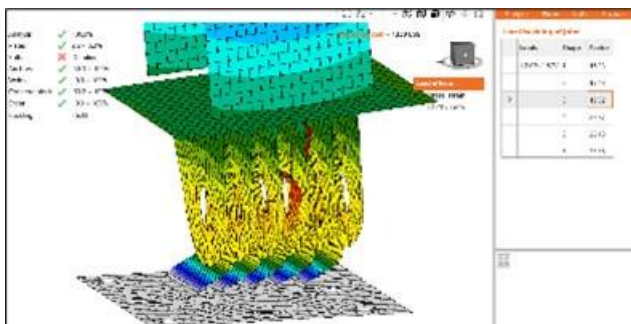


Figura 63. Análisis de pandeo elástico para la determinación del factor crítico de pandeo

Mediante el modelo se determinó que el espesor mínimo de las 5 planchas inferiores para soportar las cargas gravitacionales era de 9 mm; sin embargo, una condición crítica es la falla prematura de alguno de estos rigidizadores, lo cual representaría una redistribución de cargas en los rigidizadores restantes, aumentando la carga en cada uno de ellos y aumentando la probabilidad de alcanzar la capacidad de estos.

Se verificó el funcionamiento de la conexión considerando una condición reducida óptima con plancha central suprimida. Debido a que esta resistencia depende de la deformación plástica de la plancha, se recomienda limitar el espesor reducido de los rigidizadores a 15 mm.

#### 6.6.2.6 Diagnóstico

- El estado de deterioro en los rigidizadores de la unión articulada para varias de las planchas base es considerable, con pérdidas de espesores en la parte exterior de los rigidizadores de hasta un 60% de su espesor original. No obstante, hay sectores que no presentan un estado de deterioro importante, incluso es desde el punto de vista estético.
- De forma generalizada, se presenta la irregularidad en la superficie de todas las planchas bases, lo cual promueve a la acumulación de agua, residuos y desechos biológicos.
- Se evidenció deterioro de las tuercas en término de pérdida de sección, especialmente en los sectores verde, amarillo y rojo.
- No se evidenció proceso de corrosión en los pernos de anclajes, aunque en casos particulares sí se evidenció pérdida de sección en la parte expuesta del perno.
- Dado el análisis de la unión en diferentes situaciones, se obtuvo el espesor óptimo para garantizar una buena redistribución de fuerzas en la conexión, considerando la posible pérdida de alguno de los rigidizadores internos. La falla de alguna de las planchas se traduciría en una redistribución de fuerzas en las planchas restantes, las cuales no poseerán la capacidad necesaria para un evento de diseño.
- Se realizó la evaluación de la propuesta de reforzamiento de la unión mediante planchas de 22 mm de espesor con ventana central para la inspección rutinaria. Esta evaluación, dio resultados satisfactorios en términos de resistencia y redundancia estructural, es decir, en su capacidad por medio de la redistribución de carga ante la eventual falla de alguno de rigidizadores.

#### 6.6.3 Propuesta de reparación y reforzamiento

Dada a la evidencia encontrada en el análisis de las distintas posibles situaciones de la conexión, se planteó el reforzamiento de esta, por medio de planchas metálicas de 22 mm de espesor, de forma externa a los rigidizadores (Figura 64 y Figura 65).

Este reforzamiento tiene como finalidad absorber los diferenciales de carga, más allá de los que se encuentran sometidos por el peso propio de la edificación, y, aun ante la eventual falla de alguno de los rigidizadores, proporcionar la redundancia y capacidad suficiente para afrontar dichas solicitaciones.

Estas planchas son soldadas a las placas extremas por medio de soldadura de penetración completa. Esta evaluación se realizó considerando espesores reducido de 10 mm en la base de los rigidizadores inferiores.

Adicionalmente, se ha evaluado la capacidad del reforzamiento como un sistema independiente al sistema de rigidizadores que soportan la unión (Figura 66). Se

determina que para la aplicación del 100% de la carga de diseño, el reforzamiento propuesto, posee suficiente capacidad. Esto promueve la redundancia de la conexión, traduciéndose en su capacidad por medio de la redistribución de carga ante la eventual falla de alguno de los rigidizadores.

Es importante destacar que originalmente las columnas estaban doblemente articuladas, en la base y en el tope. La solución planteada implica una rigidización de la conexión en la base, eliminando la articulación. Se verificó mediante el modelo que esta nueva condición no desmejora el desempeño global de la edificación.



Figura 64. Modelo matemático de la propuesta de reforzamiento de la conexión

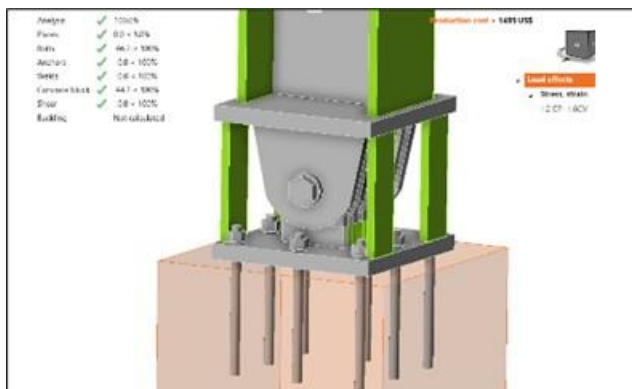


Figura 65. Verificación tipo semáforo de la capacidad de la conexión reforzada



Figura 66. Verificación tipo semáforo de la capacidad de la conexión reforzada

#### 6.6.4 Lecciones aprendidas

- Evaluación enfocada en puntos críticos: La ausencia de daños en la superestructura no garantiza seguridad de una edificación si los apoyos están comprometidos.
- Importancia de la exploración in situ, en este caso mediante limpieza de las secciones afectadas: La eliminación de productos de corrosión fue esencial para poder cuantificar pérdidas de sección reales (hasta un 60%), transformando sospechas visuales en datos confirmados para el cálculo.
- Modelado de la capacidad residual: El análisis por elementos finitos permitió predecir fallas por inestabilidad y redistribución de tensiones, comprobando que el juicio experto puede validarse con herramientas numéricas avanzadas.
- Redundancia como solución: La reparación no se limitó a parches; se introdujo redundancia estructural mediante refuerzos externos capaces de absorber la carga total, garantizando la estabilidad de la estructura ante cualquier progresión del deterioro presente.
- Diseño verificable e inspeccionable: La inclusión de una ventana de inspección en los refuerzos permite el monitoreo futuro del "ojo clínico", asegurando la sostenibilidad de la intervención en una obra patrimonial.

### 6.7 Evaluación y Rehabilitación de un Muelle Expuesto a un ambiente Marino Tropical (Caso 7: O. Troconis)

#### 6.7.1 El Problema

El presente trabajo se refiere a la evaluación, diagnóstico y protocolos de reparación de diferentes miembros de concreto armado, pretensado y de acero, de un muelle de más de 2000 m de longitud y 65.000 m<sup>2</sup> de superficie expuesta a un ambiente marino tropical. Luego de 13 años de haber sido construido se solicitó una investigación técnica al Centro de Estudios de Corrosión (2014), para evaluar los diferentes problemas existentes, no solo en el concreto armado sino también en los pilotes de acero que lo soportan. Esto tanto desde el punto de vista de corrosión como estructural. Los pilotes son cilíndricos e hincados en posición vertical, fabricados en acero estructural con un revestimiento de brea epóxica y en su zona sumergida poseen un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio, base aluminio.

#### 6.7.2 Evaluación y Diagnóstico

Se realizó una inspección preliminar y una detallada de acuerdo con los procedimientos establecidos por Troconis de Rincón et. al. en el Manual de DURAR (1998), que permitió diagnosticar los diferentes problemas de corrosión y estructurales existentes; para así poder dar los procedimientos más adecuados para su reparación/rehabilitación. La evaluación consistió en las diferentes actividades que se describen a continuación:

*Estructuras de Concreto Armado:*

- Levantamiento de Daños.
- Análisis electroquímicos (medición de potenciales) de la armadura de acero. Ensayo no destructivo que sirve de guía para hacer adecuadamente los ensayos destructivos.
- Análisis fisicoquímicos del concreto (destructivos, resistencia a la compresión, carbonatación, perfil de iones cloruro, porosidad total).

#### *Pilotes Metálicos:*

- Levantamiento de Daños.
- Medición de espesores mediante ultrasonido.
- Medición de Potenciales (verificación del sistema de protección catódica).

#### *6.7.2.1 Evaluación Estructural*

- Preparación de Modelos Digitales.
- Evaluación de la Condición de Diseño.
- Evaluación de la Condición Actual (según la información obtenida de la evaluación por corrosión).
- Evaluación de la Condición Futura.

La inspección preliminar de todo el muelle permitió identificar diversidad de daños con un estado de deterioro de crítico a leve en las diferentes áreas, en toda su extensión que, en general, dependía de su altura al nivel del mar. Debido a esto y a la gran extensión de la estructura se seleccionó, para este trabajo, el puente de acceso con sus pilotes (Figura 67), una de las zonas con mayores problemas por estar más cerca de la costa.



Figura 67. Vista general del Puente de Acceso al Muelle

**Inspección Visual.** En el puente de acceso se seleccionó una sección que fuese representativa de los daños observados y que permitiera la evaluación de los elementos (cabezales, vigas de conexión y longitudinales) que conforman la estructura del puente de acceso (Figura 68).

En esta se evidencia la continua humectación de la cara inferior del cabezal por su proximidad al nivel del mar y estar en zona de oleaje continuo (aprox. 2,3 m). Este efecto potencia la corrosión de la armadura, si existiesen cloruros a nivel de esta en cantidad suficiente para inducir a su corrosión. La Figura 69C muestra el daño típico encontrado

en la cara inferior de varias de las vigas de conexión y cabezales, dada su cercanía al mar. En general se observó que la magnitud y severidad de los daños por corrosión dependen no solo de la distancia al nivel del mar, sino también de la dirección de los vientos preferenciales; siendo, en general, mayores en las caras resguardadas de los mismos debido a su mayor humectabilidad, facilitando así la difusión de los iones cloruro y el proceso de activación del refuerzo por corrosión.



Figura 68. Diferentes elementos evaluados

Otro de los problemas que pueden observarse en estas vigas son algunas manchas de humedad originadas por drenajes (Figura 67) o fugas de las tuberías alineadas en la parte superior del puente; lo cual puede causar lixiviación del concreto. Estos elementos se encuentran ubicados en la zona expuesta a los vientos preferenciales (cara este).

Existen otras zonas donde algunos elementos de concreto armado, presentaban signos manifiestos de deterioro con un avanzado estado de corrosión de la armadura. Estos elementos se encuentran cercanos a las zonas de escape de vapor (debajo de la losa) de los sistemas de tuberías colocados en la parte superior del puente. En este caso la continua purga de vapor (Figura 69) origina la humectación permanente de los elementos lo cual, junto a la alta temperatura, facilita la entrada de los iones cloruro, potenciando así la corrosión de la armadura en presencia del ambiente marino circundante. Este agente agresivo ingresa a través de los poros del concreto y al alcanzar una concentración mayor o igual a 4000 mg Cl-/kg cemento (4000 ppm), a nivel de la barra, se considera que es capaz de corroer al acero de refuerzo (Troconis de Rincón et al., 2007).

**Evaluación Electroquímica.** La selección de los elementos para la evaluación electroquímica y fisicoquímica está basada en la información obtenida durante la inspección visual. Esta debe incluir no solo áreas con daños evidentes, sino también aquellas que no lo manifiestan para poder definir adecuadamente su estado. Los datos electroquímicos (ensayo no destructivo) permiten elegir la ubicación para la extracción de testigos in situ (núcleos) y así conocer las condiciones, características y calidad de los diferentes elementos que conforman la estructura. En este sentido, la accesibilidad y medidas de seguridad fueron un factor

determinante en la selección de los elementos estructurales, ya que en muchas ocasiones limitaron la evaluación de áreas potencialmente afectadas por corrosión.



Figura 69. A: Zona afectada por el vapor de agua, lado oeste; B: Vista cercana de la viga de conexión y el cabezal afectado por grietas y corrosión de la armadura; C: otra de las vigas de conexión con grietas por corrosión de la armadura y D: delaminación del concreto con corrosión severa del acero expuesto en un cabezal

La medición del potencial de corrosión se realizó aproximadamente cada 30 cm y a diferentes alturas desde la cara superior de las vigas/cabezales. Estos elementos fueron seleccionados según el grado de deterioro observado en la inspección visual. De tal manera que, de acuerdo con las mediciones de potenciales vs. Cu/CuSO<sub>4</sub> (ASTM C-876, 2022 y Manual de DURAR, 1998) y a la experiencia de los autores (Troconis de Rincón and coauthors, DURACON Collaboration, 2016), se consideró que la armadura se encontraba “activa” (alta probabilidad de que el acero se está corroyendo) si los potenciales promedio son más negativos que el criterio de riesgo por corrosión en presencia de cloruros (más negativos que -250 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>). Por el contrario, se consideró una armadura “pasiva” si los

potenciales en promedio son más positivos que -250 mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>. En ambos casos deberán correlacionarse ambas condiciones con los resultados de los análisis fisicoquímicos, a fin de determinar el estado del elemento.

En la Tabla 3 se muestra un caso típico del levantamiento electroquímico (potencial de corrosión) en uno de los cabezales. Estas medidas indican que la armadura se encuentra activa (más negativos que -250 mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>), en la cara norte, hacia el extremo este del cabezal; haciéndose menos activa a medida que se aleja del mar. Este comportamiento fue similar en todos los cabezales y vigas de conexión (elementos más cerca del mar). Estos potenciales son característicos del fenómeno de corrosión por cloruros debido al ambiente marino-tropical al cual se encuentra expuesta la estructura. En estas zonas se generaría un mayor arrastre del ion cloruro a la estructura, pero es en la zona resguardada, donde se mantiene por mayor tiempo la humedad en los poros del concreto, lo que facilita aún más su ingreso al interior de la estructura. No obstante, en este caso la continua humectación de dichas caras por la proximidad al nivel del mar y al oleaje marino potencia la corrosión de la armadura en las zonas expuestas a los vientos preferenciales.

Como es conocido, la penetración del ion agresivo en el concreto se verá condicionada a las características del concreto utilizado (calidad, en particular la porosidad) en la construcción de la estructura, por lo que esta será definida más adelante (ensayos fisicoquímicos), para poder dar un diagnóstico sobre la durabilidad de estos elementos en el tiempo. En el caso de las vigas longitudinales, que son pretensadas, los potenciales evidencian la pasividad de la armadura al registrarse valores más positivos que -250 mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>, lo cual se corresponde con el buen estado aparente que mostraban dichos elementos.

Tabla 3. Potenciales mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub> medidos en un Cabezal. N12- N15 denotan núcleos extraídos en esta zona. e.: espesor de cubrimiento de concreto. Lado izq.: alturas de evaluación desde el borde superior del cabezal

| Ec  | 0,30 m     | 0,60 m | 0,90 m | 1,20 m     | 1,50 m | 1,80 m | 2,10 m     |                     | 4,02 m | 4,32 m     | 4,62 m | 4,92 m | 5,22 m |        |
|-----|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|---------------------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|
|     |            |        |        |            |        |        |            |                     |        |            |        |        |        |        |
| 5,2 | -423       | -337   | -372   | N14 ⊗ -319 | -263   | -275   | -293       | Anclaje<br>Metálico | -171   | -210       | -254   | -164   | -170   | 0,20 m |
| 5,4 | -333       | -287   | -315   | -260       | -215   | -179   | -208       |                     | -154   | -177       | -175   | -124   | -135   | 0,38 m |
| 5,4 | -369       | -302   | -305   | -243       | -203   | -147   | -155       |                     | -148   | -169       | -180   | -148   | -152   | 0,58 m |
| 5,1 | -366       | -290   | -314   | -277       | -213   | -184   | -188       |                     | -189   | -230       | -207   | -184   | -200   | 0,78 m |
| 5   | N12 ⊗ -313 | -268   | -317   | -264       | -242   | -262   | N15 ⊗ -267 |                     | -305   | N15 ⊗ -331 | -317   | -257   | -257   | 0,96 m |
| 4,5 | -331       | -267   | -293   | -258       | -234   | -271   | -259       |                     | -343   | -380       | -417   | -280   | -270   | 1,09 m |

Es importante indicar que, en general, en todos los elementos evaluados en el lado este del puente se registraron potenciales más positivos que -250 mV vs. Cu/ CuSO<sub>4</sub>, lo

cual evidencia la pasividad de la armadura y se corresponde con el buen estado que mostraban dichos elementos. En este caso, a pesar de estar ellos expuestos a la incidencia de

los vientos preferenciales, se encuentran más alejados del nivel del mar (aprox. 4 m), por lo que el acceso de los iones cloruro hacia la estructura se encuentra restringido, en comparación con los elementos evaluados en la zona de la costa.

**Ensayos Físico - Químicos y Mecánicos.** La selección de las zonas para la extracción de testigos (núcleos) se basó en la información obtenida durante la inspección visual y la evaluación electroquímica de los diferentes elementos estructurales. La Tabla 3 muestra la ubicación e identificación de los núcleos extraídos en este cabezal. En general, la resistencia a la compresión de los diferentes elementos evaluados es alta ( $\approx 400 \text{ kg/cm}^2$ ), lo cual se corresponde con la resistencia a la compresión de diseño de  $350 \text{ kg/cm}^2$ . Estos resultados podrían inferir la presencia de un concreto de buena calidad (durable) pero para poder efectuar tal afirmación deben correlacionarse estos resultados con la porosidad total y la penetración de cloruros; ya que una alta resistencia a la compresión no necesariamente indica un concreto durable, el cual debe ser capaz de soportar un ambiente tan agresivo como lo es el marino-tropical. En cuanto a la carbonatación, el espesor carbonatado en los diferentes elementos es prácticamente despreciable  $\text{XCO}_2 \leq 2 \text{ mm}$ . Esta escasa penetración del  $\text{CO}_2$  se debe a que en ambientes marinos la carbonatación del concreto es baja, pues los iones cloruro mantienen una elevada humedad interna del concreto, restringiendo el acceso del  $\text{CO}_2$  al mismo.

Por otro lado, al analizar los resultados de porosidad total se nota que todos los elementos estructurales presentan porosidades elevadas y superiores al 10%, lo que pareciera indicar un concreto de mediana a baja durabilidad, de acuerdo con el criterio de evaluación de dicho parámetro (Manual de DURAR). No obstante, es importante indicar que la porosidad total mide todos los poros, no solo los capilares, por lo cual pudiese no mostrar la durabilidad real del concreto, particularmente si el concreto es de muy buena calidad y no fue bien compactado; siendo sólo la porosidad efectiva, que mide sólo los poros capilares, que son los que permiten el acceso de los agresivos hacia la armadura, la que pudiese dar una mejor información sobre este particular. Sin embargo, ésta no pudo evaluarse, dado el diámetro del núcleo (10 cm) necesario para esta evaluación. Al revisar la información sobre el diseño de mezcla del concreto, se determinó que la relación a/c para todos los elementos estructurales era de 0,4; lo cual pareciera indicar, con los datos de resistencia a la compresión, que el concreto es de buena calidad.

La Figura 70 muestra la penetración de cloruros en los diferentes elementos estructurales evaluados en el puente de acceso; mostrándose, en todos los casos, un perfil de penetración de estos iones. Es decir, su presencia se debe a la difusión de este ion, proveniente del ambiente marino, hasta el interior del concreto. Como es bien conocido y particularmente en este ambiente tropical (Manual de DURAR), 4000 ppm de Cl-/kg cemento a nivel de la

armadura es suficiente para despasivar las barras de refuerzo e iniciar el ataque localizado de las mismas (Troconis de Rincón, and coauthors, 2016). Los resultados indican que existen concentraciones altas de penetración de este ion agresivo en todos los elementos evaluados en el andamio cercano a la orilla (Núcleos 9, 12, 13 y 14), cuya proximidad al nivel del mar es de tan solo 2,35 m. El núcleo N12, ubicado más al este de la cara norte del cabezal (Tabla 3) fue el que presentó la más alta concentración de cloruros, incluso a una profundidad de 5 cm muestra concentraciones  $>4000 \text{ ppm}$  de Cl-/kg cemento. Esta actividad se manifiesta con las medidas de potenciales (Tabla 3), donde se muestran valores muy activos en esta zona. Por el contrario, el núcleo N13 extraído en este mismo elemento, muestra que estos iones no han llegado a nivel de la barra en cantidad suficiente para corroerla, lo cual coincide con los valores menos negativos ( $-188 \text{ mV}$  vs.  $\text{Cu/CuSO}_4$ ) mostrados en la Tabla 3.

Esto demuestra la utilidad en el uso de estas medidas no destructivas que guían al evaluador a identificar la corrosión no manifestada por las barras de refuerzo y tomar acciones que permitan no solo una mejor decisión para los ensayos destructivos sino también para realizar una reparación con criterios de durabilidad. Estos resultados también demostraron que cuando estos elementos se alejan de la costa y se encuentran a más de 4,5 m de altura la difusión de cloruros fue menor, pero deben tomarse acciones durante la reparación para garantizar su durabilidad en el tiempo.

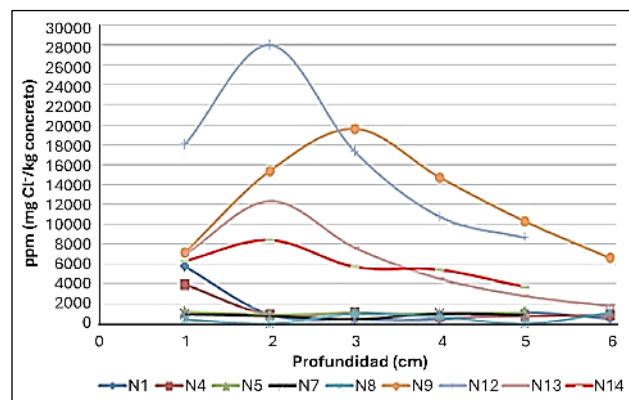


Figura 70. Perfil de iones Cloruros en los núcleos extraídos de la estructura

**Pilotes.** El puente de acceso está constituido por tres filas TA, TB, TC (oeste a este) y por 42 ejes, cada uno con 6 pilotes: desde el eje 1 al 8 los pilotes tienen un diámetro de 36 pulgadas con soldadura helicoidal, mientras que desde eje 9 al 42 los pilotes tienen un diámetro de 48 pulgadas. El puente de acceso tiene 252 pilotes de los cuales, por razones de accesibilidad, sólo se inspeccionaron 234 en su área expuesta a la atmósfera. En la zona sumergida, donde tienen protección catódica, se determinó que todos los pilotes se encuentran a potenciales más negativos de  $-0.90 \text{ mV}$  vs.  $\text{Ag/AgCl}$ , lo cual indica protección de estos de acuerdo con NACE SP0169 (2024).

En la zona aérea y de salpique, los pilotes presentan distintos niveles de deterioro, desde condición buena sin daño visible (Figura 71A) hasta estados leve, moderado y crítico, según la extensión del daño por corrosión ( $\leq 10\%$  para leve y  $25\text{--}75\%$  para moderado/crítico (Figura 71B y Figura 71C). Del total de pilotes evaluados, el  $51,28\%$  muestra corrosión leve, el  $38,89\%$  deterioro moderado y el  $9,83\%$  condición crítica. Los mayores daños se concentran en la zona del puente más expuesta a los vientos predominantes (NE-SO) y a la radiación solar, donde la acción combinada de humedad, viento, oleaje y radiación acelera el deterioro del recubrimiento y favorece la corrosión localizada en las áreas desprotegidas.



Figura 71. Pilotes del puente de acceso, mostrando la clasificación de daños, de acuerdo con el área afectada por la corrosión: A: buen estado; B: corrosión leve; C: estado crítico

Se seleccionó una muestra representativa de pilotes en condición moderada y crítica para la medición de espesores mediante ultrasonido, registrándose en algunos casos pérdidas de hasta  $7,97\text{ mm}$ . A partir de estos valores se estimó una velocidad de corrosión cercana a  $1\text{ mm/año}$ , extremadamente alta para una estructura con sólo 13 años de servicio según la ISO 9223 ( $0,7\text{ mm/año}$ , 1917). En consecuencia, se estima que en un plazo de 5 años el espesor de los pilotes críticos, que representan el  $9,83\%$  del total, se reduzca hasta aproximadamente  $6\text{ mm}$ , comprometiendo la capacidad portante y la seguridad estructural (Figura 72).

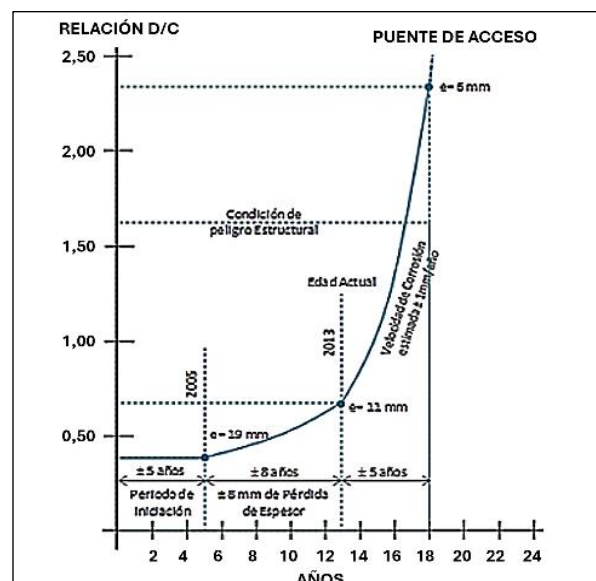


Figura 72. Predicción del comportamiento de los pilotes en el tiempo en función de la Evaluación por Corrosión y Estructural

### 6.7.3 Propuesta de Solución e Intervención

Para el caso de los pilotes y dada la ineficacia del uso de recubrimientos orgánicos, debido a la alta agresividad del medio circundante, se decidió protegerlos con concreto autocompactante de alto desempeño; limpiándolos previamente con chorro de agua a presión. Para ello se diseñó una mezcla base cemento Portland I, con una relación agua/cemento (a/c) de  $0,4$  utilizando inhibidor de corrosión de  $2\%$  Nitrato de Calcio y  $10\%$  de microsilice, en base al contenido de cemento. Se diseñaron encofrados que permitieran su adecuada colocación y durabilidad.

Para el caso de los elementos de concreto armado, el procedimiento a seguir es el siguiente: remoción de concreto por hidro demolición, inspección, preparación de superficie del acero que ha quedado expuesto, sustitución/reforzamiento de barras corroídas, sustitución de ligaduras, colocación de concreto proyectado, curado del concreto y colocación de recubrimiento hidrofugante en toda la superficie para controlar el ingreso de los cloruros. La hidro demolición se hace a alturas y profundidades determinadas por las medidas electroquímicas y perfiles de cloruros, respectivamente. La mezcla a utilizar es similar a la de los pilotes con diferentes superplastificantes y agregados finos y gruesos.

### 6.7.4 Lecciones aprendidas

La reparación de estructuras de concreto reforzado expuestas a ambientes marino-costeros tropicales, afectadas por corrosión de la armadura, requiere una evaluación integral orientada a la identificación de la causa raíz de los daños. Un diagnóstico preciso constituye la base para el desarrollo de estrategias de reparación que aseguren la

durabilidad estructural, considerando criterios tanto técnicos como económicos.

El uso de técnicas no destructivas, tales como la medición de potenciales de corrosión, permite la detección de procesos de corrosión activos o latentes en la armadura, incluso cuando no existen manifestaciones superficiales evidentes. Estas metodologías adquieren especial relevancia en entornos marinos, donde las intervenciones presentan altos costos y limitaciones constructivas. La información obtenida, en conjunto con los perfiles de cloruros, contribuye a una delimitación más precisa de las zonas deterioradas y a la definición racional de las alturas y profundidades de la reparación.

Por otra parte, el adecuado diseño y funcionamiento de los sistemas de drenaje de aguas pluviales y de vapor en estructuras portuarias resulta determinante para el control de la humedad superficial y la mitigación de los procesos de corrosión. Una disposición inadecuada de estos sistemas puede provocar el rociado continuo de los elementos estructurales, favoreciendo la lixiviación del concreto y la aceleración de la corrosión de la armadura.

## **6.8 Auditoría de Seguridad y Patología Viales**

(Caso 8: R. Bujana)

### **6.8.1 El Problema**

Se presenta un caso de tratamiento de Puntos Negros en el Barrio de Santo Domingo en la Avenida Ribereña, Barquisimeto, donde se han registrado numerosos accidentes de motorizados con víctimas fatales y lesiones graves de incapacitación de por vida.

El tratamiento de los Puntos Negros (PN), son medidas de ingeniería de tránsito para accidentes viales que se concentran en determinados puntos, tanto urbanos como interurbanos. El objetivo fundamental es corregir factores viales que están generando accidentes a través de la gestión del tránsito, metodología llamada “Gestión de Auditoría de Seguridad Vial”.

La Auditoría de Seguridad Vial (ASV), es un proceso formal de evaluación de un proyecto vial, o de tránsito, existente o futuro, o de cualquier proyecto que tenga influencia sobre una vía, en donde un equipo de profesionales calificados e independientes, de los hacedores del estudio vial, informa sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes y del comportamiento del proyecto desde la perspectiva de la seguridad vial. [Definición AUSTROADS (Road Safety Audit, 2002)].

La eficacia más propicia de las Auditorías de Seguridad Vial nace originalmente como un instrumento para la prevención de los accidentes de tránsito o siniestralidad vial. Las ASV se utilizan para reconocer y transformar las deficiencias de los proyectos antes de que ocurran los siniestros, esto es una eficaz forma de expresar la calidad de

la obra. En otra situación, la vía que ya se encuentra operando, se evaluarán los denominados puntos negros, que son zonas con concentración de accidentes viales. Ellos se estudiarán, se investigarán y se evaluarán, con criterios de seguridad vial, para proponer medidas efectivas de ingeniería de tránsito, que permitan reducir a cero la siniestralidad en la zona de conflictos de tránsito.

La patología vial se refiere a los problemas y fallas que sufren las vías de comunicación, que pueden ser tanto físicos, como por ejemplo las grietas y los baches en el pavimento, así como funcionales, que están relacionados con la seguridad vial. Estos problemas pueden ser causados por factores naturales, climáticos, humanos o por el desgaste de la infraestructura y requieren diagnóstico y reparación para garantizar la seguridad.

De tal forma, la auditoría de seguridad vial evalúa un proyecto vial para identificar y mitigar riesgos de accidentes, mientras que la patología vial se enfoca en el estudio de los daños y problemas en la infraestructura de carreteras ya existentes. La primera es preventiva, realizada en fases de diseño o construcción, y la segunda es correctiva o de diagnóstico, centrada en la evaluación del estado físico de una vía para determinar la causa y solución de sus investigaciones.

### **6.8.2 Evaluación y Diagnóstico**

Análisis de las normas del diseño geométrico de la vialidad:

En este tipo de proyectos viales, se deben cumplir con una serie de parámetros en lo que respecta al diseño geométrico de las mismas, para que cumplan adecuadamente con las normas y objetivos para las cuales deberán ser construidas. De tal forma, que la actividad más relevante que se encuentra involucrada es la ingeniería geodésica, a través de los equipos topográficos de alta precisión, como son el teodolito diseñado para medir ángulos horizontales y verticales, la estación total, el GPS y el nivel de precisión, todos ellos tanto para el diseño como para la construcción de la vialidad.

Por tal motivo, las referencias más resaltantes en el diseño son: el radio para las curvas horizontales, el peralte, el sobre ancho de la calzada, la transición y los obstáculos para la visibilidad en carreteras. Son variables dimensionales en cualquier curva determinada que debe tener una vialidad, a la cual se deberá conducir a una velocidad convenida en el proyecto de acuerdo con el tipo de vía. Son parámetros exclusivos de medición que debe asumir el encargado del proyecto y los ingenieros involucrados en su ejecución.

De allí lo apreciable que es la Auditoría de Seguridad Vial con fundamentos sólidos, en lo que se refiere a estos temas, por parte del ingeniero geodesta encargado de hacer los estudios topográficos del proyecto vial y su permanente

control operativo para el fiel cumplimiento del diseño geométrico señalado y ajustado a las normas:

- 1.- Correspondencia entre los parámetros de una curva en un trazado de carretera: la velocidad, los radios y el peralte.
- 2.- Radio mínimo para las curvas horizontales.
- 3.- Peralte.
- 4.- Transición del bombeo al peralte.
- 5.- El sobre ancho.
- 6.- Visibilidad en carreteras.

*Problemas de la infraestructura:* El deterioro físico del pavimento (baches, grietas) aumenta el peligro, forzando a los conductores a hacer maniobras bruscas para evadirlo.

La patología vial se refiere a las fallas y daños que sufren los pavimentos (como carreteras y calles), tanto de asfalto como de concreto. Estas manifestaciones patológicas incluyen grietas, baches, deformaciones, fisuras y

desintegración, y pueden ser causadas por la fatiga del material, cargas pesadas, envejecimiento, problemas de drenaje o errores en la construcción. Es crucial identificar y reparar estas manifestaciones patológicas para garantizar la seguridad de los usuarios y prolongar la vida útil del pavimento.

El tratamiento de los Puntos Negros (PN) (

Tabla 4), son medidas de ingeniería de tránsito para accidentes viales que se concentran en determinados puntos, tanto urbanos como interurbanos.

El objetivo fundamental es corregir factores viales que están generando accidentes a través de la gestión del tránsito, metodología llamada “Gestión de Auditoría de Seguridad Vial”.

Tabla 4. Integralidad y relación entre la auditoría de seguridad y la patología viales en el tratamiento de “Puntos Negros”

| RELACIÓN ENTRE AMBAS              | AUDITORÍA DE SEGURIDAD VIAL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | PATOLOGÍA VIAL                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PROPÓSITO                         | Identificar de forma proactiva los riesgos de siniestros viales en un proyecto desde su concepción hasta su puesta en servicio.                                                                                                                                                                                                                                                                           | Diagnosticar, estudiar y determinar las causas de los daños y problemas en la infraestructura vial existente, como fisuras, deformaciones o hundimientos.                                                                     |
| ORIENTACIÓN                       | Evalúa el diseño, la ingeniería y los elementos de infraestructura para prever fallos y corregirlos antes de que se produzcan accidentes.                                                                                                                                                                                                                                                                 | Se centra en la evaluación del estado actual de la vía y los materiales que la componen para entender por qué están fallando.                                                                                                 |
| BENEFICIOS                        | Reduce los costos asociados a la reingeniería, minimiza las consecuencias de accidentes y contribuye a una infraestructura más segura para todos los usuarios, mediante la revisión constante del diseño.                                                                                                                                                                                                 | Permite implementar las reparaciones correctas, prolongar la vida útil del pavimento y garantizar la seguridad de la vía a través de un diagnóstico preciso, mediante el análisis permanente tanto geotécnico como geodésico. |
| FASE DE SERVICIO                  | Se realiza en las etapas iniciales del proyecto (factibilidad y diseño) y puede ser también en la fase de construcción y en el uso operativo.                                                                                                                                                                                                                                                             | Se aplica a carreteras y estructuras ya construidas y en operación, con el fin de evaluar y diagnosticar daños existentes.                                                                                                    |
| PREVENCIÓN VS. CORRECCIÓN         | La Auditoría de Seguridad Vial busca evitar que los problemas ocurran, mientras que la Patología Vial busca entender y solucionar los problemas que ya existen en una carretera.                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                               |
| COMPLEMENTARIDAD TEÓRICO-PRÁCTICA | Ambas son herramientas para mejorar la seguridad y el estado de las vías, pero con enfoques distintos. La Auditoría es una herramienta preventiva, mientras que el estudio de Patología es una herramienta de diagnóstico para problemas existentes. La importancia en definitiva es mantener la vía de manera constante para que el uso, en calidad óptima, de los usuarios sea sostenible en el tiempo. |                                                                                                                                                                                                                               |

*Testimonio del primer punto negro en Venezuela:* El primer punto negro en Venezuela ha sido escogido en la Avenida Nectario María o Avenida Ribereña de Barquisimeto, en la zona denominada Barrio Santo Domingo (Figura 73), donde se puede identificar una serie de problemas de seguridad en las que están involucrados motorizados, peatones, ciclistas, usuarios del transporte público y también diferentes tipos de vehículos, tanto de paseo como comerciales. La mayor concentración de accidentes, han sido a los motorizados, con víctimas fatales y lesiones graves de incapacitación de por vida.

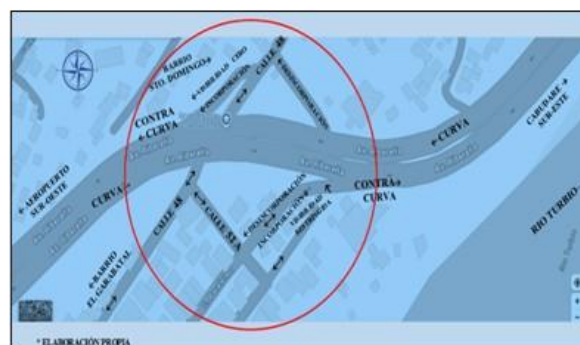


Figura 73. Ilustración del Punto Negro N° 1 en el Barrio Sto. Domingo ubicado al lado de la Av. Ribereña en Barquisimeto

*Dictamen pericial técnico de la auditoría de seguridad vial:* El Informe de patología pericial, es una estructura formal de presentación de los resultados legales, de una vialidad para la

comprensión e interpretación por parte de los no especialistas en Auditorías de Seguridad Vial. Habitualmente se trata de operadores técnicos especializados en ingeniería vial y de tránsito e ingenieros geodestas, con carácter formal y con aspectos legales, por ser una materia donde se producen accidentes tanto mortales como con traumatismos generalizados, donde el conductor o los acompañantes de los vehículos, sean de cuatro o más ruedas, o solamente dos ruedas, puedan ser parte de esos eventos lamentables. Para ser elaborado el dictamen pericial, se debe tener presente la meticulosidad técnica, las normas existentes y el orden de los resultados y respuestas a las soluciones en el documento final.

De tal manera, la presentación de este informe Pericial es sobre la evaluación, a través de los métodos de la Auditoría de Seguridad Vial, incluyendo la patología vial, en el sector de la Avenida Ribereña denominado Barrio Santo Domingo calle 48, en la ciudad de Barquisimeto. Se auditará el estado actual de la vía en el sector señalado, desde el punto de vista de las variables geométricas de acuerdo con como debió ser diseñada la avenida en cuestión. Para ello se hizo inspección y se tomaron una serie de ilustraciones fotográficas del barrio Santo Domingo, específicamente en el distribuidor de la indicada vialidad que por allí se transita (Figura 74).



Figura 74. Entrada al Barrio Santo Domingo y la contra curva en la Avenida Ribereña

Diagnóstico visual y de apreciación personal para el dictamen del pavimento:

1.- El pavimento se encuentra conforme, de tal manera que la vía se considera en buen estado porque presenta elementos que comprometen la seguridad y funcionalidad, como por ejemplo: no se observan baches, socavones o grietas en el pavimento. En síntesis, el pavimento hace posible el tránsito fluido de los vehículos.

2.- Luego de conocer todas las restricciones viales de la Avenida Ribereña y fundamentalmente en el sitio escogido por la prensa, como uno de los más neurálgicos de la avenida, en el distribuidor del sector Santo Domingo, los vehículos circulan esta vía desprovistos de seguridad vial. Es además lamentable que el mal diseño geométrico vial del distribuidor no fue acorde con las normas de vialidad que se anunciaron en este trabajo, para establecer una auditoría vial de la construcción actual operando, con el resultado demostrado.

### 6.8.3 Propuesta de Solución. Conclusión del dictamen

De tal manera, se sugiere el siguiente planteamiento vial, con paso a desnivel, tipo *esquema*, para su estudio y se produzca el debido cambio definitivo del citado distribuidor (Figura 75 y Figura 76).



Figura 75. Propuesta para un cambio en el diseño vial en el Barrio de Santo Domingo, Avenida Ribereña, Barquisimeto

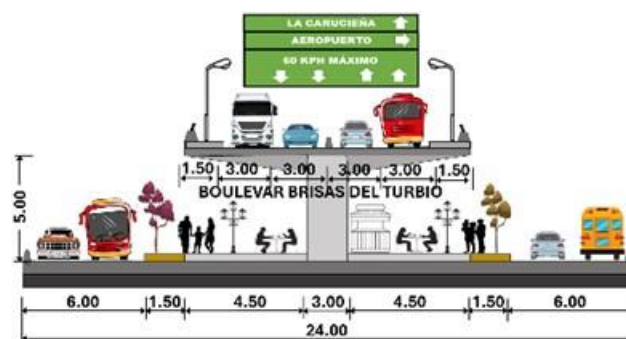


Figura 76. Corte transversal del paso a desnivel en el Barrio Santo Domingo, Avenida Ribereña, Barquisimeto

### 6.8.4 Lecciones aprendidas

Las lecciones aprendidas de un dictamen de Auditoría de Seguridad Vial, gira en torno a la prevención y mejora continua, identificando errores, fallas de seguridad y buenas prácticas para evitar futuros siniestros viales. Estas lecciones se derivan del análisis de accidentes y se aplican para implementar mejoras en la capacitación, el cumplimiento de las normas y la tecnología, creando una cultura de seguridad vial más sólida para todos los usuarios.

- *Análisis de riesgos:*  
Identificar y comprender los riesgos de los entornos viales, como los puntos de alta concentración de accidentes, puntos denominados negros, en días y horarios en diferentes ubicaciones, incluyendo primordialmente las zonas escolares, es fundamental para implementar soluciones de tránsito específicas.
- *Capacitación:*  
1. Reforzar la educación vial con programas enfocados en el manejo defensivo, el respeto a los límites de velocidad, el uso adecuado de dispositivos de

seguridad y la convivencia vial.  
2. Capacitar sobre el manejo de riesgos específicos, como la fatiga, las distracciones, enfermedades crónicas que entorpezcan el manejo y el uso correcto del cinturón de seguridad.

• *Tecnología:*

1. Utilizar herramientas tecnológicas para el análisis de datos estadísticos, pero también garantizar que el personal esté capacitado para utilizarlas.
2. Implementar equipos de cultura de datos estadísticos e indicadores, para una gestión de infraestructura vial más moderna y eficiente.

• *Normativa y procedimientos:*

1. Desarrollar y difundir políticas de seguridad vial clara y efectiva.
2. Documentar y seguir planes estratégicos de seguridad vial, como los basados en la normativa vigente, para garantizar el cumplimiento.

• *Prácticas de manejo y mantenimiento:*

1. Verificar que los vehículos cumplan con la normatividad de tránsito y estén en buenas condiciones.
2. Asegurar la comodidad correcta del conductor en el vehículo para garantizar la consistencia y seguridad.
3. Promover la conducción defensiva, la cual implica anticipar situaciones de peligro causadas por otros conductores o por las condiciones del entorno.

• *Cultura de seguridad:*

1. Fomentar la empatía y el respeto entre todos los usuarios de la vía, incluyendo conductores, motorizados, ciclistas y peatones.
2. Realizar campañas de sensibilización a través de procesos de formación para todos los usuarios, de tal manera se mantenga actualizada la conciencia de seguridad vial en los beneficiarios de las vías urbanas, interurbanas y rurales.

## 6.9 Rehabilitación de Conjunto de Edificaciones de Viviendas Habitadas de Interés Social (Caso 9: L. Arrieta)

### 6.9.1 El problema

La rehabilitación de edificaciones de viviendas de interés social construidas masivamente merece un apartado en el estudio de los problemas patológicos de la construcción. Más aun, como sucede en la mayoría de los casos, cuando estos se encuentran habitados en el momento que se necesita abordar el problema de la rehabilitación; la intervención representa un desafío multidimensional que combina patologías constructivas con factores sociales críticos.

En Venezuela, la urgencia por reducir el déficit habitacional y la necesidad de inversión durante la década de 1980 del “boom petrolero”, se construyeron masivamente conjuntos de edificaciones de interés social, impulsados por la necesidad de realizar inversiones a toda costa según la Ley de Política Habitacional (Venezuela, 1989, Gaceta N°

4.124), dándole prioridad a lograr metas más cuantitativas que cualitativas, como si lo decisivo fuese alcanzar el mayor número de soluciones, sin importar mucho la calidad de las mismas y la adecuación de la tecnología utilizada al contexto geográfico.

En particular nos vamos a referir a uno de estos conjuntos contruidos de manera masiva en todo el ámbito nacional; conformado por 552 apartamentos, contruidos con tecnología foránea —específicamente el sistema “túnel”— sin la debida adaptación a las condiciones del suelo y clima local, lo cual generó fallas estructurales severas.

El conjunto tiene 43 edificaciones de cuatro niveles cada uno, conformado por dos alas y un núcleo central de servicios fundado sobre tres vigas de riostra de 40 cm de altura. Su estructura en base a pantallas de concreto armado de poco espesor, sobre losas de fundación y vigas perimetrales; y los cerramientos por paneles prefabricados (Figura 77 y Tabla 5).

El principal factor crítico fue el asentamiento diferencial de las edificaciones fundadas sobre arcillas inorgánicas de mediana a alta compresibilidad, con una presión de expansión de 3,80 kg/cm².



Figura 77. Arriba: Vista general del urbanismo. Abajo: Vista de edificación tipo

Tabla 5. Datos básicos del urbanismo

| DATOS DEL URBANISMO                      |        |
|------------------------------------------|--------|
| Edad al comenzar síntomas de fallas      | 6 años |
| Número de edificios                      | 43     |
| Número de pisos                          | 3 y 4  |
| Número de apartamentos por piso          | 4      |
| Número total de apartamentos (87 m² c/u) | 552    |

El problema de cimentar viviendas livianas en suelos expansivos está en predecir los cambios volumétricos espontáneos que se producen en el suelo de apoyo por efecto de los cambios en el contenido de humedad.

El otro aspecto para considerar en los procesos de rehabilitación de construcciones masivas de viviendas de interés social es el impacto que tiene algún error o falla en su diseño, construcción o mantenimiento; que, al tratarse de materiales e insumos y componentes estructurales a gran escala, se multiplican geométricamente originando altos costos en su reparación. El caso estudiado es una muestra de muchas otras urbanizaciones construidas de la misma manera y que aún hoy en día presentan fallas severas en su funcionamiento (Arrieta, 1999).

Otros factores que originaron inestabilidad en la estructura:

- La configuración estructural: La tipología en forma de "H" con juntas de construcción mal tratadas y sin considerar la inestabilidad de los suelos, provocó separaciones de hasta 2,5 cm entre cuerpos (Figura 78 y Tabla 6).

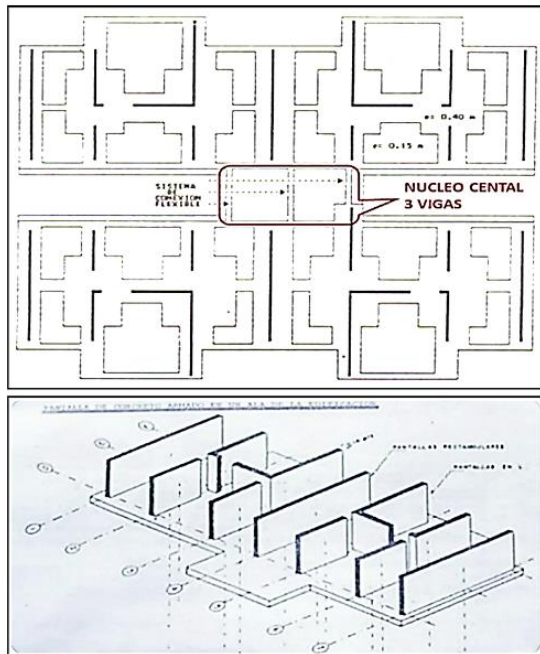


Figura 78. Configuración en "H" y ubicación de pantallas y paneles de cerramientos

Tabla 6. Configuración estructural y datos de cimentaciones

| SISTEMA CONSTRUCTIVO |                                                                                      |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ESTRUCTURA           | Mixto, paneles y pantallas de 14 cm de espesor                                       |
| CIMENTACIONES        | ALAS DEL EDIFICIO:<br>Losa de fundación de espesor 15 cm con vigas de borde de 40 cm |
|                      | NÚCLEO CENTRAL:<br>Losa con tres vigas de riostra de 30x40 cm                        |

- Variables ambientales: Un clima de tipo saheliiano en los cuales la evaporación es mayor que la precipitación y la presencia de vegetación agresiva en este tipo de suelo de fundación alteraron la humedad del suelo, potenciando en el mismo, ciclos de expansión-contracción.
- Sensibilidad del sistema: El sistema "túnel", aunque eficiente en ejecución, demostró una altísima vulnerabilidad ante movimientos diferenciales del terreno, grietas en diagonal en pantallas (Figura 79) y grietas perpendiculares en vigas (Figura 80).



Figura 79. Tipología de agrietamientos a 45° en pantallas



Figura 80. Tipología de agrietamientos en vigas de unión de las dos alas de la edificación

## 6.9.2 Evaluación y diagnóstico

Para el diagnóstico se ejecutó un plan de investigación integral que incluyó la zonificación de la urbanización por sectores de comportamiento (Figura 81). Se ejecutaron varios tipos de ensayos de suelos en muestras seleccionadas, tomadas en las zonas críticas con el fin de determinar el valor del porcentaje óptimo de humedad para este tipo de arcilla que permitiera estabilizar el material. Se requirió una intervención multidisciplinaria de especialistas en geotecnia, estructuras, botánica aplicada y resolución de conflictos.



Figura 81. Croquis de zonificación. Los marcados en círculos de seleccionaron como muestra para el estudio

#### 6.9.2.1 Resultados

El 80% de los edificios presentó fallas. Los hallazgos principales se resumen en:

- **Fallas Higrotérmicas y Geotécnicas:** Alta sensibilidad de las arcillas a filtraciones y variaciones estacionales.
- **Manifestaciones Físicas:**  
**Origen geotécnico:** Efectos de expansión y contracción volumétrica típicos en este tipo de suelos arcillosos con construcciones livianas; originan esfuerzos significativos sobre los elementos estructurales de la edificación mayores a los considerados en el cálculo estructural; grietas a 45° en pantallas y paneles y separación de componentes estructurales hasta de 2,5 cm entre ellos.  
**Corrosión:** En estas edificaciones se conjugaron varios factores que originaron problemas graves de corrosión, tanto en elementos de estructura como en cerramientos. Se destacan los más importantes: la presencia de cloruros en la pintura de las losas y paneles de cerramiento en proporciones hasta de 4800 ppm; la baja calidad del concreto (alta porosidad y baja resistencia a la compresión) utilizado en la fabricación de estos paneles que indujo a la carbonatación del concreto a nivel de la armadura de acero, y las filtraciones de agua de lluvia por falta de estanqueidad en las juntas, entre panel de cerramiento, losa de techo y pantalla estructural. Los síntomas se presentaron con fisuración en losas del techo y en los paneles de concreto armado con pérdida de sección del área del refuerzo de acero y delaminación del recubrimiento. También se determinó corrosión en las tuberías de hierro galvanizado en el sistema de distribución de aguas blancas debido, primero a la mala calidad del insumo y a la presencia de cloruros en la pintura utilizada en las paredes donde las tuberías se encontraban embutidas.
- **Impacto Biótico:** Las raíces de árboles con raíces agresivas ubicados de manera paralela al eje de las

cimentaciones, actuaron como agentes de extracción de agua, acelerando la inestabilidad del estrato portante; las especies encontradas en esta investigación que ocasionaron efectos más severos fueron: Eucalipto, Jabillo; Almendrón, Sauce y Siempre Verde.

- **Factor Humano:** La condición de estar habitadas las viviendas en el momento de su rehabilitación añadió una condición de complejidad en la aplicación de procedimientos que tuvo que ser prevista en el proyecto de intervención.

#### 6.9.3 Propuesta de solución e intervención

La metodología de intervención de la estructura propuesta por los Ingenieros M. Pardo y E. Chollet en “Solución Río Lama” (2001), está fundamentada básicamente en tres acciones especificadas a continuación, diseñada para edificaciones habitadas, minimizando el trauma social que se enfrentaba a la molestia de los propietarios de los inmuebles y el necesario desplazamiento temporal de los residentes:

- Traslado de los habitantes a otra vivienda temporal mientras se rehabilitaba la edificación.
- Estabilización del suelo a través de inyecciones de agua, cuyo volumen respondía a los resultados de los ensayos de % óptimo de humedad en la arcilla, en cada zona muestreada (Figura 82).

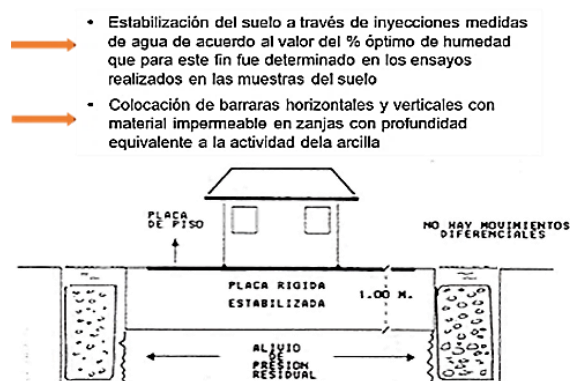


Figura 82. Perfil esquemático de la solución

- Colocación de barreras horizontales con aceras de concreto armado alrededor de la edificación (Figura 83).
- Colocación de barreras verticales con material impermeable en zanjas perimetrales de 80 cm de ancho y protegidas con membranas de polietileno de alta densidad para controlar la migración de la humedad: la profundidad de la zanja y de la membrana atendía a la profundidad del estrato con arcilla activa (Figura 84).
- Riego del material de relleno en barreras verticales y horizontales para unificar el % de humedad del material (Figura 85).
- Para resolver el grave problema de corrosión en los paneles de cerramientos hubo que demoler la totalidad de los mismos y sustituirlos por paredes de bloques (Figura 86).

- De las 43 edificaciones intervenidas con esta solución solo una quedó inhabilitada, cuyos propietarios no autorizaron la rehabilitación; las demás dieron resultados positivos de la solución aplicada, lo cual fue comprobada en mediciones realizadas en varias ocasiones después de su puesta en marcha (Figura 87).



Figura 83. Barreras horizontales alrededor de la edificación para conservar el % de humedad en el suelo de fundación



Figura 84. Barrera vertical de 1,8 m de altura con lámina de polietileno y geotextil colocada en el perímetro de los edificios



Figura 85. Riego del material de relleno en barreras verticales y horizontales



Figura 86. Sustitución de Paneles de cerramientos por paredes de bloque



Figura 87. Obra reparada y rehabilitada

#### 6.9.4 Lecciones aprendidas:

- Lección 1 (Figura 88): En suelos potencialmente inestables se recomienda conservar la proporcionalidad en la rigidez de los componentes de la edificación y utilizar preferentemente sistemas constructivos aporticados en lugar de apantallados.

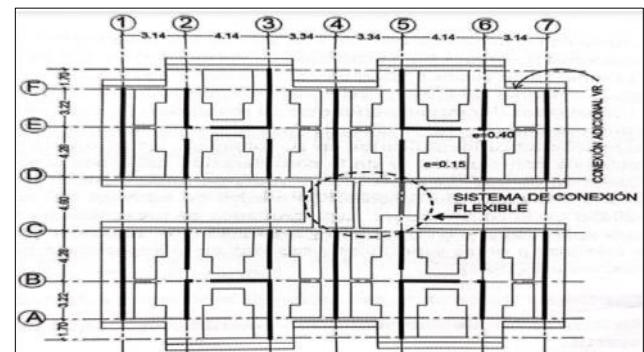


Figura 88. Configuración H. Conexión flexible en la infraestructura de los edificios

- Lección 2 (Figura 89): El uso de paneles como elementos de cerramientos amerita una adaptación en el sistema constructivo.



*Figura 89. Ensamble de paneles prefabricados. Detalle de juntas sin tratamiento adecuado*

- Lección 3: La estabilización de suelos con arcilla expansiva se logra controlando los cambios volumétricos del mismo a través de humectación y colocación de barreras horizontales y verticales.
- Lección 4 (Figura 90): Influencia de la vegetación en la estabilidad y funcionamiento de los Servicios de la edificación. “Las raíces de ciertos árboles pueden producir alteraciones, especialmente en estructuras poco y medianamente altas (entre 4 y 5 pisos). Este efecto se intensifica cuando la disposición de los árboles es en serie y paralela al eje de las cimentaciones.” (Fernández C.M., 1994).



*Figura 90. Impacto de vegetación inadecuada paralela al eje de las cimentaciones.*

- Lección 5: La rehabilitación de edificaciones construidas masivamente requieren de la aplicación estricta de un Sistema de aseguramiento de calidad que evite la multiplicación geométrica de los errores o fallas que puedan cometerse.
- Lección 6: Los efectos causados por corrosión en el concreto armado tanto en componentes estructurales

como en los de cerramientos son de consecuencias de alto costo, que en casos como este ameritan la sustitución completa del material y o del insumo. La aplicación de controles de calidad de los insumos y de los procedimientos constructivos son medidas preventivas que pueden evitar este tipo de patología.

- Lección 7: Cuando se trata de una urbanización de viviendas no basta con la aplicación de tecnología adecuada; se amerita el componente social suficientemente preparado para resolver conflictos que permita abordar y resolver los complejos problemas que se suscitan en los propietarios que reclaman las fallas en sus viviendas.

## **7. DURABILIDAD: UNA DEUDA PENDIENTE**

Para reforzar el control de calidad de las edificaciones y obras civiles, para disminuir problemas de fallas, la ingeniería civil contemporánea ha elevado el concepto de durabilidad a un pilar estratégico en el diseño y la construcción de infraestructuras. La tendencia actual supera el enfoque tradicional, centrado casi exclusivamente en el diseño por resistencia, para adoptar una perspectiva holística. Hoy, la durabilidad exige un análisis riguroso del ciclo de vida de la estructura, la optimización de los costos de mantenimiento y la garantía de un desempeño adecuado a lo largo del tiempo, consolidándose como un requisito indispensable para la seguridad y sostenibilidad económica de las obras de concreto.

La durabilidad es un concepto multifacético. El Diccionario de la Lengua Española la define como la cualidad de “continuar siendo y sirviendo” y “subsistir y permanecer”. En el ámbito técnico, el American Concrete Institute (ACI Committee 201, 2023) la describe como la capacidad del concreto para resistir los mecanismos de deterioro asociados a su ambiente de exposición, manteniendo su forma, calidad y servicio durante su vida útil. Por su parte, la Asociación Internacional de Control de Calidad y Patología de la Construcción (ALCONPAT) la define como la capacidad de una estructura para resistir acciones físicas, químicas y biológicas durante un período proyectado, conservando sus propiedades y condiciones de servicio sin incurrir en costos de mantenimiento inesperados. En consecuencia, la ingeniería civil contemporánea considera la durabilidad como un pilar estratégico para la seguridad y sostenibilidad de las obras. En el contexto venezolano, la norma NTF 4015:2012 (FONDONORMA, 2012) define la durabilidad del concreto como su capacidad para comportarse satisfactoriamente frente a acciones físicas, químicas y electroquímicas durante su vida útil. Esta norma establece requisitos técnicos específicos, como la relación agua/cemento máxima y el contenido mínimo de cemento, basados en la clase de exposición ambiental, para prevenir la degradación prematura. Sin embargo es desconocida por muchos profesionales y por tanto poco aplicada. Desde una perspectiva de ingeniería de patologías, se consolida la

definición de durabilidad como la aptitud intrínseca de una estructura de concreto para soportar los mecanismos de degradación inherentes a su entorno, manteniendo los niveles de seguridad, funcionalidad y estética para los cuales fue diseñada, durante toda su vida útil proyectada.

Es fundamental diferenciar el concepto técnico de durabilidad, del tiempo de servicio asociado a la responsabilidad legal del constructor, que generalmente se limita a cinco o diez años. Mientras la responsabilidad legal es un plazo acotado por normativas contractuales, la durabilidad es un parámetro de diseño intrínseco que busca garantizar el desempeño de la estructura durante décadas, superando ampliamente las garantías legales.

Para comprender y planificar esta longevidad, es indispensable utilizar un modelo conceptual que articule las distintas fases de la vida de servicio de una estructura de concreto. Entender la durabilidad no como un estado estático, sino como un proceso dinámico a lo largo del tiempo, es crucial para la ingeniería moderna. El modelo conceptual de vida de servicio es una herramienta fundamental que permite a los ingenieros, proyectistas y propietarios planificar el diseño, construcción y mantenimiento de una estructura de manera informada y predictiva, visualizando el deterioro como un proceso secuencial y manejable.

Basado en las recomendaciones de ALCONPAT, el ciclo de vida de una estructura de concreto se divide en siete etapas clave, desde la concepción del proyecto hasta el final de su operatividad:

- **Etapas 1:** Planeación de vida de servicio de proyecto. Fase inicial y crítica donde se establecen los criterios de diseño arquitectónico, estructural y de durabilidad. Se definen los materiales, recubrimientos y características del concreto en función del ambiente de exposición y la vida útil esperada, y se diseña el plan de mantenimiento.
- **Etapas 2:** Preparación para la vida de servicio. Corresponde a la fase de construcción y supervisión. La correcta ejecución de lo especificado en el proyecto es clave, cuidando aspectos como la calidad del concreto, el posicionamiento del acero, el espesor del recubrimiento y un curado adecuado.
- **Etapas 3:** Inicio de la vida de servicio. Momento en que la estructura es entregada al usuario y puesta en operación. Se realiza una verificación final para corregir posibles errores constructivos y comienza la implementación del plan de mantenimiento.
- **Etapas 4:** Vida de servicio (Etapas de propagación 1). En esta fase agentes agresivos como el CO<sub>2</sub> o los cloruros comienzan a penetrar el recubrimiento de concreto. Aunque no hay daño visible, el proceso de deterioro ha iniciado. El mantenimiento preventivo es fundamental.
- **Etapas 5:** Vida de servicio residual (Etapas de propagación 2). Los agentes agresivos alcanzan el

acero de refuerzo y comienza el proceso de corrosión. La estructura aún es funcional, pero ya presenta manifestaciones de daño como lixiviaciones o pequeñas fisuras. El mantenimiento se vuelve correctivo.

- **Etapas 6:** Vida residual. El daño se vuelve significativo, con agrietamientos, desprendimientos y pérdida de sección del acero que comprometen la confiabilidad estructural o funcional. Las reparaciones son costosas y no logran recuperar el desempeño mínimo original.
- **Etapas 7:** Fin de la vida residual. La estructura presenta colapsos parciales o un deterioro tal que cualquier intervención es económicamente inviable o no garantiza la seguridad. Se expide un certificado de inseguridad y se procede a la demolición.

Este ciclo de vida es directamente influenciado por los factores ambientales a los que se expone la estructura, los cuales dictan la velocidad y la severidad de los mecanismos de deterioro. Identificar los mecanismos de deterioro potenciales y clasificar correctamente la agresividad del ambiente son los primeros pasos para un diseño duradero y una reparación efectiva. Tanto la normativa EN 1504 como las recomendaciones de ALCONPAT establecen que un diagnóstico preciso de las causas de la degradación es un requisito indispensable antes de seleccionar cualquier estrategia de intervención. En este aspecto en Venezuela, para asegurar el cumplimiento del desempeño de una estructura a lo largo de las distintas etapas de su vida de servicio, se aprobó la norma NTF 4069:2021 (FONDONORMA, 2021) la cual proporciona la metodología de Inspección Técnica de Seguridad en Edificaciones (ITSE). Esta herramienta permite realizar una evaluación especializada del estado de conservación y seguridad (estructural y no estructural) de los inmuebles, identificando amenazas y vulnerabilidades para mitigar riesgos y prolongar su vida útil. La ITSE clasifica las intervenciones necesarias en grados (del I al V), desde mantenimiento preventivo hasta actuaciones inmediatas por riesgo de colapso, garantizando así la resiliencia del patrimonio construido, pero lamentablemente también esta una norma es poco conocida y menos aplicada.

La selección de estrategias de diseño, materiales y métodos de reparación depende directamente de la correcta clasificación de la estructura dentro de estos ambientes. Una clasificación errónea conducirá a un desempeño deficiente y a una vida de servicio reducida. Una vez identificados los riesgos ambientales, se pueden establecer los principios de diseño y los requisitos de materiales necesarios para mitigarlos de manera efectiva.

De acuerdo con lo mencionado, el diseño por durabilidad adopta un enfoque proactivo, fundamentado en la selección de materiales adecuados y la especificación de propiedades clave del concreto para resistir los mecanismos de deterioro. Este enfoque se alinea con el principio de verificación del Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón,  $S_d \leq R_d$ , donde  $S_d$  representa la acción de diseño (el efecto del

ambiente) y  $R_d$  es la resistencia de diseño de la estructura. Para garantizar la durabilidad, la resistencia del material debe ser superior a la agresividad del entorno durante la vida útil proyectada.

Finalmente, este análisis demuestra que la durabilidad de las estructuras de concreto no es una propiedad inherente del material, sino el resultado de un proceso deliberado y riguroso. Es una disciplina que integra el diseño inteligente, la selección meticulosa de materiales, una ejecución de obra precisa y un mantenimiento planificado a lo largo de todo el ciclo de vida de la infraestructura. La transición de un simple diseño por resistencia a un enfoque de desempeño garantizado a largo plazo es un cambio fundamental en la ingeniería moderna.

La importancia de normativas como la europea EN 1504 y las recomendaciones técnicas de organizaciones como ALCONPAT es innegable. Estas herramientas proporcionan a los profesionales del sector un lenguaje común y un marco metodológico estandarizado para tomar decisiones informadas, desde la especificación de una mezcla de concreto hasta la selección del principio de reparación más adecuado para una patología concreta. Al estandarizar los requisitos de productos y procedimientos, se eleva la calidad y la fiabilidad de las intervenciones, asegurando reparaciones que son verdaderamente duraderas.

En última instancia, la adopción de un enfoque integral de la durabilidad es un imperativo para el futuro de nuestras infraestructuras. Garantizar la seguridad, la funcionalidad y la sostenibilidad económica y ambiental de las construcciones de concreto a largo plazo no es solo una buena práctica de ingeniería; es una responsabilidad estratégica para preservar el valor de nuestro patrimonio construido y asegurar su servicio a las generaciones futuras.

## 8. CONCLUSIONES

Basado en el contenido integral de este artículo, se extraen las siguientes conclusiones, que sintetizan la importancia de la Patología de la Construcción y las lecciones aprendidas de la experiencia iberoamericana:

- **Sistematización de la Disciplina:** La Patología de la Construcción ha evolucionado de ser una práctica reactiva y aislada a convertirse en una especialidad científica fundamental y sistematizada dentro de la ingeniería y la arquitectura. Esta evolución, impulsada significativamente por organizaciones como ALCONPAT, ha permitido establecer marcos metodológicos rigurosos para la investigación, el diagnóstico y la rehabilitación de estructuras, garantizando su seguridad y sostenibilidad.
- **Primacía del Diagnóstico sobre la Terapéutica:** Un diagnóstico técnico preciso, que distinga claramente entre causas, efectos y consecuencias, es el requisito indispensable antes de proponer cualquier plan de mantenimiento, reparación o reforzamiento. La

aplicación de una metodología secuencial, desde la inspección visual y el “ojo clínico” del experto, hasta ensayos detallados y pruebas de carga, es lo que garantiza que las intervenciones sean efectivas y no solo paliativos que oculten fallas o vulnerabilidades subyacentes.

- **Origen de las Fallas en las Fases de Proyecto y Ejecución:** La evidencia recolectada a través de los casos de estudio presentados en este artículo, y también respaldados por diversos casos en Europa y América Latina, revela que la gran mayoría de las “enfermedades” de las construcciones son de naturaleza congénita. Errores en el diseño, una selección inadecuada de materiales y deficiencias en el proceso constructivo representan más del 80% de las causas de lesiones detectadas, lo que subraya la necesidad de implementar programas rigurosos de control de calidad desde la concepción de la obra.
- **La Durabilidad como Pilar Estratégico:** La durabilidad ya no debe entenderse simplemente como un tiempo de servicio ligado a responsabilidades legales, sino como un proceso preventivo que abarca todo el ciclo de vida de la edificación. El diseño por durabilidad, que considera proactivamente la agresividad del entorno (como el ataque por cloruros en zonas marinas o la carbonatación en ambientes urbanos), es esencial para preservar el patrimonio construido y reducir costos de mantenimiento correctivo inesperados.
- **Necesidad de un Enfoque Interdisciplinario:** Los casos analizados —que involucran desde la corrosión y el asentamiento de fundaciones, hasta incendios y siniestros viales; desde materiales de construcción hasta complejos sistemas estructurales; y desde casos concentrados solo en una porción de la obra, hasta otros que impactan globalmente un gran número de edificaciones— demuestran que la patología requiere la sinergia de diversas disciplinas (ingenieros y arquitectos especializados en materiales de construcción, estructuras y componentes no estructurales, electroquímica, geotecnia, hidráulica, entre otros). La colaboración interdisciplinaria y el intercambio de lecciones aprendidas son claves para enfrentar los retos técnicos y sociales involucrados en la preservación de las construcciones actuales y futuras.
- **Impacto de la Normalización y la Formación Continua:** El desconocimiento de normativas técnicas de diseño, construcción e inspección (como la norma NTF sobre durabilidad en Venezuela) conduce a la degradación prematura de las obras. Por ello, el fortalecimiento de la educación y la difusión de estándares nacionales e internacionales son vitales para elevar la calidad de las intervenciones y asegurar que las reparaciones sean verdaderamente duraderas.

En conclusión, la Patología de las Construcciones trasciende la reparación empírica de edificaciones para consolidarse como una ciencia que promueve la sostenibilidad, abarcando desde la prevención en la fase

constructiva hasta la reducción de la vulnerabilidad durante el servicio. El análisis crítico de la experiencia iberoamericana aquí expuesto demuestra que la sinergia entre el rigor científico, el intercambio en sociedades especializadas y el juicio experto permite transformar las lecciones aprendidas en una praxis de excelencia. Este enfoque integral es la vía para garantizar que la ingeniería no solo intervenga el daño, sino que asegure la integridad y durabilidad del patrimonio construido frente a los crecientes retos futuros.

## 9. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

- *Alfredo Urich*: concepción general de objetivos, contenido y estructura del artículo; desarrollo y redacción de los apartados 6.1 y 6.4; co-redacción de los apartados 1 y 8; edición final del artículo.
- *Carlos Rodríguez A.*: desarrollo y redacción de los apartados 5.3 y 6.3; revisión general del artículo.
- *Gustavo Izaguirre*: desarrollo y redacción del apartado 5.6.
- *José Luis Beaupérthuy*: recopilación y edición preliminar de las contribuciones de todos los autores; desarrollo y redacción del resumen y los apartados 2, 4 y 6.2; desarrollo y redacción general del apartado 5 en colaboración con otros autores.
- *Liana Arrieta de Bustillo*: desarrollo y redacción de los apartados 3 y 6.9.
- *Oladis Troconis de Rincón*: desarrollo y redacción del apartado 6.7; co-redacción del apartado 5.2.
- *Riad Bujana*: propuesta original y colaboración en la concepción de objetivos y contenido de la investigación; desarrollo y redacción del apartado 6.8.
- *Rosa Malavé*: desarrollo y redacción de los apartados 6.5 y 7; co-redacción de los apartados 1 y 8; edición general del artículo.
- *Sergio Valle*: desarrollo y redacción del apartado 6.6.

Este trabajo se realiza en el marco del convenio institucional entre la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat de Venezuela y la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – Delegación Venezuela.

*Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa*: durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron la herramienta Google Gemini con el único propósito de revisar la redacción, mejorar la fluidez lingüística y optimizar la estructura gramatical del manuscrito original. Los autores declaran que la IA no se utilizó para la generación de contenido técnico, análisis de datos, interpretación de resultados ni para la formulación de las conclusiones, asumiendo la total responsabilidad por la integridad y precisión del contenido publicado.

## 10. REFERENCIAS

ACI Committee 201 (2023). *Durable concrete—Guide* (ACI PRC-201.2-23). American Concrete Institute.

- ACI Committee 318. (2025). *Building code requirements for structural concrete and commentary* (ACI 318-25). American Concrete Institute
- ACI Committee 562. (2025). *Assessment, repair, and rehabilitation of existing concrete structures* (ACI 562-25). American Concrete Institute.
- Arrieta de Bustillo, L. (1999) *Patología de edificaciones residenciales de interés social en el área metropolitana de Barquisimeto. Modelo alternativo de calidad en la construcción. Lecciones aprendidas*. CONPAT 99, Montevideo Uruguay: Alconpat Internacional.
- ASCE/SEI 41 (2023). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers. USA
- ASTM C-876 (2022). REV B Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- ATC-20 (2005), *Field Manual: Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Buildings*, Second Edition, ATC-20-1 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Beauperthuy, J. y Scannone, R. (2009). *Evaluación y Reparación de Estructuras de Concreto Armado Dañadas por Incendios*. En: Ingeniería Forense y Estudios de Sitio. Capítulo XIX. Ediciones Citeci-Consulibris. Caracas.
- Bjerrum, L. (1963). *Allowable settlement of structures*. Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Germany, Vol. 2, pp. 135-137.
- Burland, J. (2006). *Check Your Ground: The Case for the Geotechnical Triangle*. Ground Engineering, Vol. 39, No. 10, pp. 24-25. (Basado en la Nash Lecture, 1987).
- Burland, J. (2007) *Terzaghi: back to the future*. Bulletin of Engineering Geology and Environment, Vol 66, N.º 1, pp 29-33
- Castro Borges, Pedro; Briceño Mena, José Alberto y Torres Acosta, Andrés Antonio, (2020). *Recomendaciones generales sobre Durabilidad, Recomendaciones Técnicas*. DOI: <https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-01-recomendacionesdurabilidad>. México 2020
- Centro de Estudios de Corrosión (2013-2014). *Asesoría técnica en evaluación, diagnóstico y protocolos de reparación/rehabilitación de un muelle expuesto al mar, cliente industrial (confidencial)*. Autores: Troconis de Rincon, O., Sanchez, M., Delgado, S., Millano, V., Fernandez, M.
- Dikdan, M. Y. (2003). *Modelo de Aseguramiento de la Calidad en el Diseño y Construcción de Desarrollos Masivos de Viviendas de Interés Social*. En: Memorias del VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad (CONPAT 2003). Mérida, México: ALCONPAT, pp. 467-474.
- Domene, D. (2003). *Historia de ALCONPAT*. En: Memorias del VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad (CONPAT 2003). Telchac, Yucatán, México. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- EN 1504-3 (2005). *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 3:*

- Reparación estructural y no estructural*. Comité Europeo de Normalización.
- FEMA 547 (2006). *Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. Federal Emergency Management Agency. USA.
- FEMA P-2335 (2025) *Guidelines for post-earthquake repair and retrofit of buildings based on assessment of performance-critical damage*. Federal Emergency Management Agency. USA.
- FEMA P-58 (2018) *Seismic Performance of Buildings, Methodology and Implementation*. Federal Emergency Management Agency. USA.
- Fernández Cánovas, M. (1977). *Patología y terapéutica del hormigón armado*. 1ra ed. Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Fernández Cánovas, M. (1994). *Patología y terapéutica del hormigón armado*. 3ra ed. Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- FONDONORMA (2012). NTF 4015:2012. *Concreto. Durabilidad*. Venezuela
- FONDONORMA (2021). NTF 4069:2021. *Inspección técnica de seguridad en edificaciones, ITSE, vocabulario, principios y requisitos*. Venezuela.
- González R., S. (2008). *NTP 200: Estructuras metálicas: comportamiento frente al fuego*. Madrid, España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Ministerio de Trabajo e Inmigración. Disponible en: <https://www.insst.es/>
- Helene, P., & Pereira, F. (2003). *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón: Reparación, refuerzo y protección*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Izaguirre I., G. (2009). *Calidad en el diseño y la construcción de edificios*. Caracas, Venezuela: Ediciones de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Central de Venezuela (UCV). ISBN: 978-980-00-2506-2.
- Jacobs, J. P. (Ed.) (2007). *Comprehensive fire protection and safety with concrete*. Brussels, Belgium: European Concrete Platform ASBL. 30 p.
- López, O. A.; Coronel D., G.; y Rojas, R. (2014) *Índices de priorización para la gestión del riesgo sísmico en edificaciones existentes*. Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V., Vol. 29, N° 4, pp. 107-126.
- López, O. A.; Coronel D., G.; Ginés, C.; Fierro, F.; Marinilli, y Urich, A. (2023) *Evaluación rápida de daños en edificaciones*. Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat., N° 61. Octubre-Diciembre. Caracas. ISSN 1317-678.
- Lossier, H. (1952). *Pathologie et thérapeutique du béton armé*. 1ère édition, Éditions Dunod, Paris, France.
- Malavé, R. E.; Morón, A. J.; Anzola, E.; Mirabal, C. E. Y Parra, M. (1998). *Evaluación, Diagnóstico y Reparación de un Tanque Digestor Afectado por Corrosión*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia (LUZ), Vol. 21, N° 3, pp. 212-225.
- McCarthy, R. J., & Stith, J. C. (1992). *Concrete tanks: Evaluation and rehabilitation*. Concrete International, 14(4), 51-54
- Mehta, P. K. (1976). *Scanning electron micrographic studies of ettringite formation*. Cement and Concrete Research, V6, N2, pp. 169-182. DOI: 10.1016/0008-8846(76)90115-0.
- NACE International (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies (IMPACT) Study*.
- NACE SP0169 (2024). *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*.
- Organización Internacional de Normalización. (2015). *ISO 9001:2015. Sistemas de gestión de la calidad: Requisitos*.
- Organización Internacional de Normalización (2017). *ISO 9223:2017. Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation*.
- Pardo, M. Y Chollet, E. (2001). *Caso de Estudio: Solución Estructural del Conjunto Residencial Rio Lama*. En: Memorias de las XI Jornadas Venezolanas de Estructuras. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela (UCV) / Asociación Venezolana de Ingeniería Estructural (AVIE).
- Peck, R. B. (1962). *Art and Science in Subsurface Engineering*. Géotechnique, Vol. 12, N° 1, pp. 60-66. DOI: 10.1680/geot.1962.12.1.60.
- Real Academia Española. (2023). *Diccionario de la lengua española* (Edición del Tricentenario, actualización 23.7). rae.es
- Shupack, M., & Suarez, M. G. (1989). *Corrosion in prestressed concrete tanks*. Concrete International, 11(1), 52-58
- Skempton, A. W., & MacDonald, D. H. (1956). *The allowable settlements of buildings*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part III, Vol. 5, pp. 727-768.
- Troconis de Rincón, O. and coauthors (2007). *The Effect of the Marine Environment on the Reinforced Concrete Durability in Iberoamerican Countries: Duracon Project/Cyted*. Corrosion Science. Vol. 49, 7. July 2007. pp. 2832 – 2843.
- Troconis de Rincón, O. and coauthors, DURACON Collaboration (2016). *Reinforced Concrete Durability in Marine Environments DURACON Project: Long Term Exposure*. CORROSION Journal Vol. 72. No. 6. Junio, 2016.
- Troconis de Rincón, O., Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., Díaz, I. y Miembros de la Red DURAR. *Manual de inspección, Evaluación y Diagnóstico por Corrosión en Estructuras de Concreto Armado*. CYTED. ISBN 983-296-541-1. 1997 (First Edition).
- Venezuela. (1989). *Ley de Política Habitacional*. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, N° 4.124 (Extraordinaria), fecha 14 de septiembre de 1989.