

## **Titulo**

### Metodologías de investigación de fallas en estructuras de concreto

## **Resumen**

El desarrollo de metodologías de investigación de falla como procesos lógicos en las etapas de análisis contribuye al éxito del hallazgo de las diferentes causas raíz que originan determinadas manifestaciones patológicas sobre las estructuras de concreto. La importancia del empleo y manejo correcto de las metodologías radica en su capacidad para el diagnóstico de deficiencias estructurales de manera que se logren establecer estrategias “curativas” para estructuras “enfermas”. La generación de este tipo de prácticas tendrá soporte esencial en la experiencia del investigador, por tanto, su éxito estará condicionado al buen criterio a la hora de su formulación dado a que cada proceso de investigación será único para un proyecto determinado.

## **Palabras clave**

Patologías, concreto, deficiencias, causas de falla, investigación.

## **Introducción**

La durabilidad en estructuras de concreto se ha convertido en una de las principales preocupaciones para la ingeniería estructural dada la gran inversión e impacto económico y social que representan sus proyectos. Existen diferentes fenómenos que pueden afectar el funcionamiento y comportamiento de una estructura de manera que se vea perjudicado su desempeño y por tanto su durabilidad; será entonces necesario generar estrategias que permitan determinar a tiempo las deficiencias estructurales de tal forma que sea posible asegurar su correcto desempeño.

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

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

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

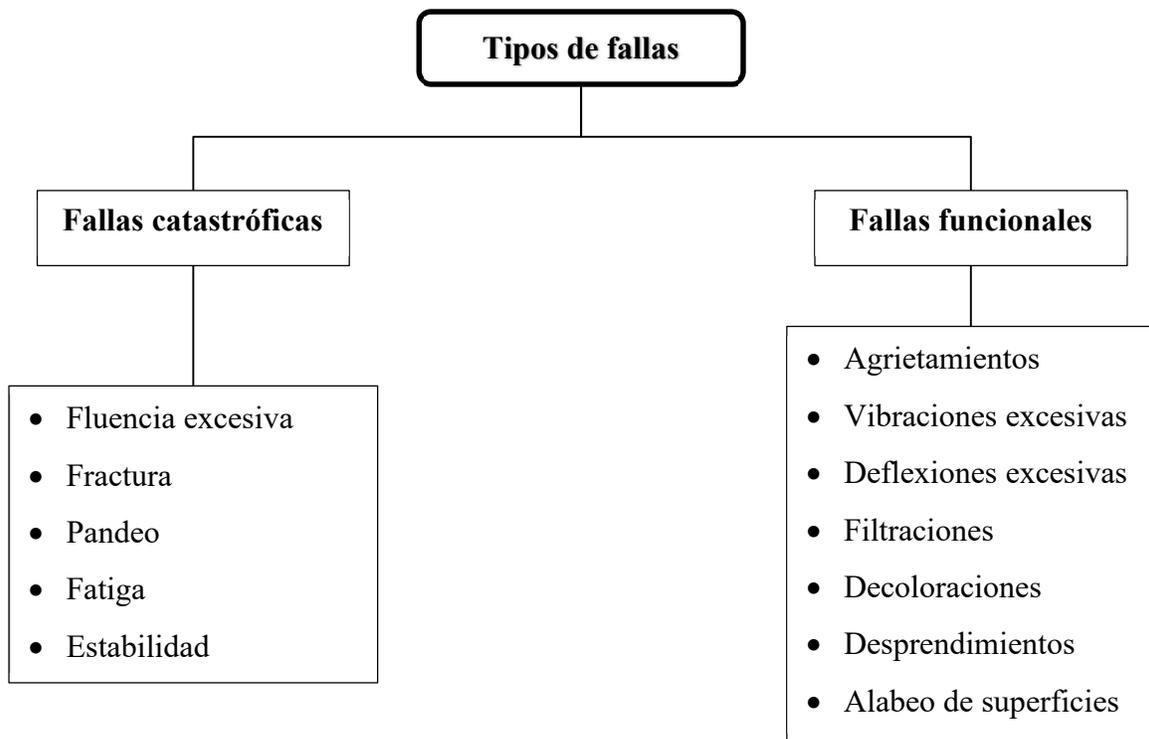
Es clave anotar que la evaluación patológica no limita su aplicación únicamente a labores investigativas relacionadas con la ingeniería forense; por su parte esta es implementada con mucha mayor frecuencia en labores de evaluación y reparación de estructuras, en estos casos su finalidad será el determinar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

## **Metodologías para la identificación de fallas en estructuras**

El propósito del análisis de una estructura mediante estos métodos será determinar las causas a partir de los “síntomas” que refleja la estructura, de tal modo será posible establecer procedimientos para la “cura” de la estructura “enferma” generando procesos de preservación, reparación, restauración, rehabilitación o repotenciación de la estructura.

El empleo de una metodología basada en una herramienta específica para el análisis de una estructura dependerá de las habilidades del ingeniero evaluador y el alcance del estudio definido en un principio; por esto será importante contar con evaluadores capacitados en el campo de la investigación, así como establecer de manera clara los objetivos de la evaluación.

La identificación de fallas se basa en hallar la incapacidad de un elemento, sistema o estructura para cumplir su función con desempeños adecuados dados por la ingeniería estructura (funcional, estético, económico, sostenible y seguro). Este tipo de fallas podrán ser categorizadas como se muestra en la ilustración 1 en fallas catastróficas o fallas funcionales, de esta manera se deberán fijar límites de desempeño para las propiedades de servicio que al ser excedidas conducirán a fallas funcionales (relacionadas con la presencia de agrietamientos, vibraciones excesivas, deflexiones excesivas, filtraciones, decoloraciones, desprendimientos o alabeo de superficies) y para las propiedades relacionadas con la capacidad y estabilidad de la estructura (relacionadas con la estabilidad general de la estructura o elementos particulares, fluencia excesiva de miembros, fracturas, pandeo o fatiga) con el fin de establecer criterios de tolerancia para el buen funcionamiento.

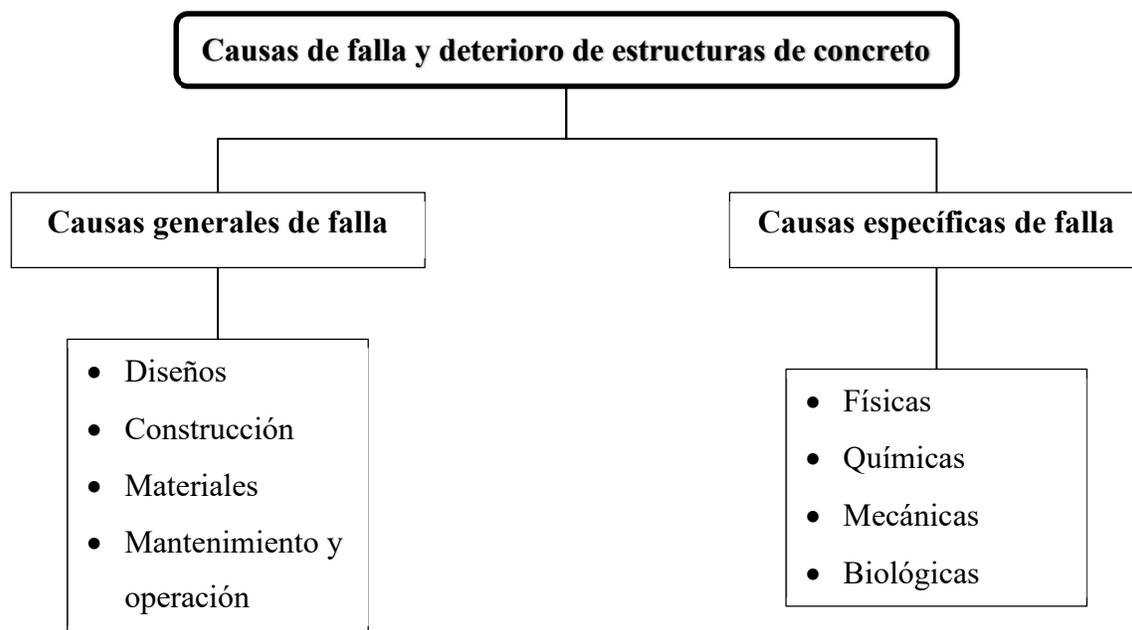


*Ilustración 1 Clasificación de tipos de falla  
Fuente: elaboración propia*

Durante la etapa de estudio de las fallas será necesario incurrir en el campo de la investigación encontrando múltiples causas que alimentarán las hipótesis iniciales; de esta manera se tendrá que el desarrollo de un evento de falla será la relación fortuita de una serie de eventos infortunados que conducirán a un tren de falla. Durante el proceso de investigación será necesaria la evaluación de cada una de las hipótesis proporcionando argumentos racionales a cada una de las preguntas de hecho asociadas a la problemática y buscando siempre el apoyo de toda la evidencia disponible.

### **Causas de fallas**

Se podrá generar una clasificación general de las causas de falla y deterioro de estructuras de concreto como se muestra seguidamente:



*Ilustración 2 Clasificación de causas de falla y deterioro de estructuras de concreto  
Fuente: Elaboración propia*

Así entonces se podrá clasificar al tipo de falla de manera general en donde se encontrará la posible causa de falla asociada a deficiencias en diseños, construcción, materiales o mantenimiento y operación. Por otra parte, al avanzar en la investigación se reconocerán patrones que permitirán asociar la falla específica a uno de los factores generales mencionados anteriormente. Así, se tendrá una clasificación de fallas específicas relacionadas con factores mecánicos, químicos, físicos y biológicos. Será de radical importancia la experiencia del evaluador en el reconocimiento de las fallas dadas a una sintomatología asociada a cada una de ellas.

### **Técnicas de análisis**

Existen diferentes técnicas que permiten el análisis de una estructura (técnicas no destructivas, técnicas semi – destructivas y técnicas destructivas); sin embargo, se recomienda inicialmente partir por las técnicas menos invasivas y por tanto menos costosas dadas por una evaluación preliminar en donde se recopilará información como planos y documentos relevantes, se realizará una inspección visual, se realizarán pruebas de campo

poco invasivas, se generará un análisis y evaluación con los datos recolectados y finalmente se emitirá un informe de la evaluación preliminar.

Posterior a esto se establecerá la necesidad de una investigación más profunda con miras a otorgar un veredicto sobre el estado de la estructura; esto se logra mediante una evaluación detallada en donde se deberá realizar una revisión de fuentes y documentos adicionales. Seguidamente se realizarán observaciones, mediciones y pruebas de campo y laboratorio que permitan establecer con mayor claridad las propiedades físicas de la estructura para posteriormente realizar una análisis y evaluación detallado de la misma.

### **Causas de falla y tecnicas para su identificación**

El desarrollo de la patología estructural ha permitido la identificación de patrones generales en las causas de fallas, de la misma forma se ha logrado relacionar estas con algunas de las posibles causas específicas que pueden presentarse en estructuras de concreto, estas serán una herramienta clave para procesos investigativos y, por tanto, serán de esencial conocimiento para el desarrollo de las tareas de análisis y estudio de estructuras.

La correcta identificación de las patologías presentadas en una estructura permitirá la elección adecuada de las metodologías propias y únicas para la investigación de fallas, será entonces clave la intervención de personal ampliamente capacitado y experimentado en labores investigativas con el fin de seleccionar de la mejor manera la metodología adecuada a emplear en el proceso de identificación de fallas; las metodologías podrán clasificarse en métodos de carácter cualitativo, semi-cualitativo y cuantitativo como se muestra en la ilustración 3.



*Ilustración 3 Técnicas analíticas para la identificación de fallas*

### **Métodos cualitativos**

Los métodos de análisis cualitativos están basados en técnicas abstractas de un primer nivel de evaluación que permiten al profesional valorar diferentes escenarios de falla mediante técnicas de diagramación y caracterización de la estructura basadas en características superficiales como su geometría, arquitectura, ubicación, tipo de uso entre otros, de manera que sea posible la formulación de hipótesis iniciales sobre un tren de falla o causas específicas de deterioro.

### Métodos semi-cualitativos

Por su parte, los métodos de análisis semi-cualitativos serán técnicas que permiten la determinación y clasificación de prioridades de investigación o análisis con una base probabilística, esto sin llegar a realizar intervenciones de mayor impacto físico sobre la estructura. De esta manera serán análisis con mayor sustentabilidad que los cualitativos pero que a su vez requerirán de una mayor inversión en materia de tiempo.



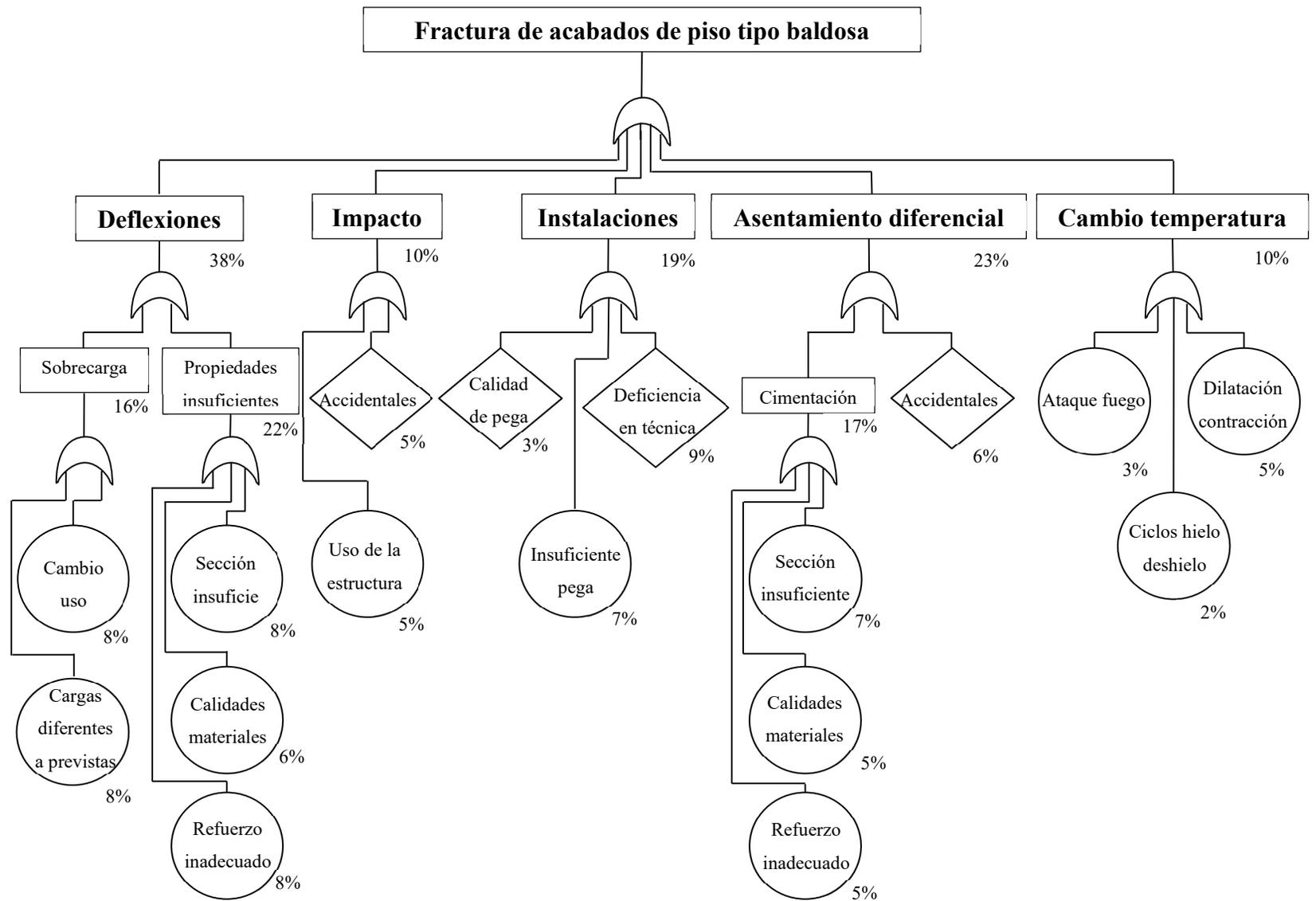
*Ilustración 4 Fractura en acabados de piso  
Fuente: (Arqa, 2020)*

En la ilustración 4 se presentan para ejemplarizar las metodologías casos de fallas de estructuras en donde se evidencian fallas por fractura en las baldosas cerámicas de un nivel; seguidamente en la ilustración 5 se muestra el desarrollo de la metodología de análisis de investigación de falla mediante un árbol de análisis de falla, donde se observa entonces que cada ruta tendrá una probabilidad de ocurrencia, esta posibilidad estará dada por la identificación de todas las eventuales causas que puedan intervenir en la falla, posterior a esto y basado en análisis estadísticos se determinará

el porcentaje de probabilidad de falla que tendrá la estructura asociada a una causa de falla; de esta manera el soporte matemático de esta metodología será valioso y fundado en fuentes con mayor peso de confiabilidad.

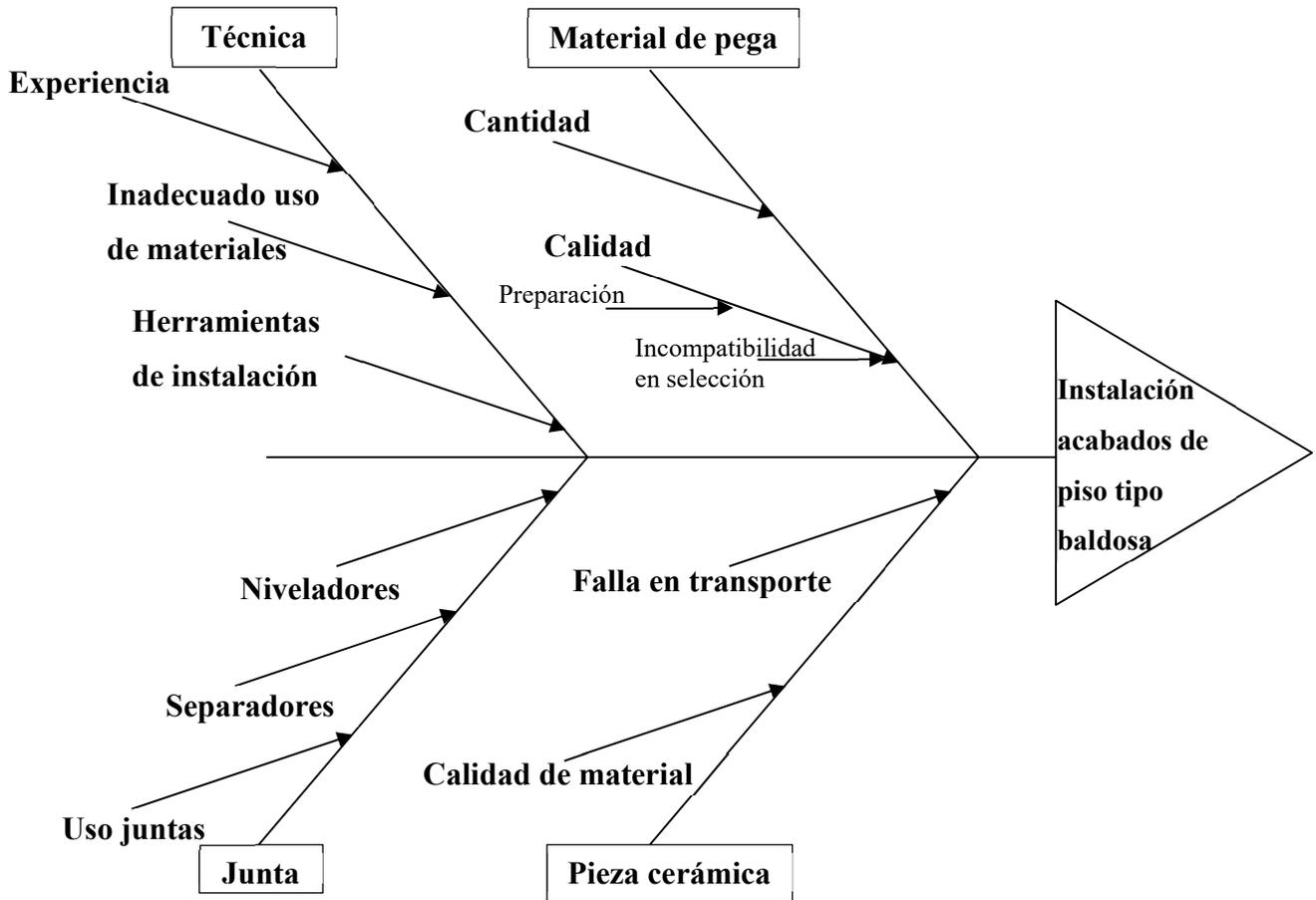
Determinadas las probabilidades de falla por cada evento puntual podrá evidenciarse que establecer una única causa de falla para la caracterización del problema será erróneo ya que la deficiencia en la estructura típicamente se deberá a la suma de varias afectaciones; por tanto, será más propio hablar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

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



*Ilustración 5 Árbol de análisis de problemas para caso de fractura de elementos de acabado de piso tipo baldosa*  
 Fuente: Elaboración propia

La metodología presentada anteriormente podrá ser complementada mediante el uso de otra metodología de investigación de falla de carácter semi cualitativo, de esta forma se propone el uso de la metodología de análisis por causa y efecto en donde se verifica el proceso de instalación de acabados de piso con el fin de detectar las posibles fallas asociadas como se muestra en la ilustración 6.



*Ilustración 6 Diagrama de causa efecto para evaluación de proceso de instalación de acabados de piso tipo baldosa*  
*Fuente: Elaboración propia*

Dado el análisis anterior se tendrá entonces una metodología de análisis única para el estudio del caso de falla presentado anteriormente, esta metodología no se inclinará únicamente por un tipo de análisis ni será totalmente determinista para seleccionar una única causa posible

de falla, por tanto, será propio como se describió anteriormente pensar en un acumulado de causas que provocan una falla.

### **Métodos cuantitativos**

Los métodos de análisis cuantitativos también conocidos como físicos basan su confiabilidad en la investigación mediante ensayos físicos cuantificables que reflejen las propiedades características de la estructura. Esta cuantificación de las propiedades permitirá determinar de manera lógica y sustentable la viabilidad de las hipótesis de fallas planteadas inicialmente.

Este tipo de metodologías serán las más costosas e invasivas con la estructura, pero a su vez serán las más precisas y fiables; serán las indicadas en los casos en los que no se proporcionen suficientes evidencias mediante las metodologías cualitativas o semi -cualitativas.

Dado el veredicto de la investigación de la estructura y condición se tomarán medidas sobre su afectación (“enfermedad”) determinando si es requerida una intervención sobre la misma; en caso de requerirse se establecerán las opciones más convenientes dado a su estado. Si no se requiere ningún tipo de intervención se deberán establecer proyecciones sobre el comportamiento a futuro de la estructura e inclusive indicar futuros planes de mantenimiento.

Los resultados encontrados en el proceso de investigación deberán ser emitidos bajo responsabilidad del equipo investigador en el entregable del estudio conocido como informe patológico en donde se mencionarán el análisis realizado, las evidencias recopiladas y las recomendaciones sobre el caso particular.

### **Aplicación caso de estudio**

Dado el reconocimiento teórico mencionado anteriormente se presenta de nuevo a modo de ejemplo un caso de estudio en el que se aplican las metodologías de investigación de falla. Es complejo realizar el diseño de una metodología general para aplicar en todo tipo de casos dado a que se deberá idear una específica para cada proyecto, estas serán únicas y su eficacia

dependerá de la experiencia del evaluador. Por tanto, se precisa la aclaración del empleo de la metodología de evaluación siguiente únicamente para el caso en mención.

La transversal de Cusiana es un importante corredor vial que comunica los municipios de Sogamoso (Boyacá) con Aguazul (Casanare), propuesto como solución a una vía alterna que a lo largo de la historia ha presentado constantes dificultades a nivel de operatividad por su inestabilidad del terreno. Este sector se caracteriza por su permanente humedad dada a la alta tasa de lluvias y escorrentías de la ladera hacia la vía, como consecuencia se presenta un grado alto de movimientos de masa de tierra que incrementan la accidentalidad como se muestra en la ilustración 7.



*Ilustración 7 Derrumbe en la vía sector Peña de Gallo  
Fuente: (Garcia Castillo, Murcia Forero, & Torres Romero, 2020)*

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

sobre lo sucedido, únicamente se encaminará el ejercicio investigativo omitiendo todo tipo de suposiciones dado a la sensibilidad del asunto.

Para el desarrollo del procedimiento investigativo se propondrá una metodología de investigación de falla basada en una combinación de las metodologías expuestas anteriormente y representada por la ilustración 8.

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

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

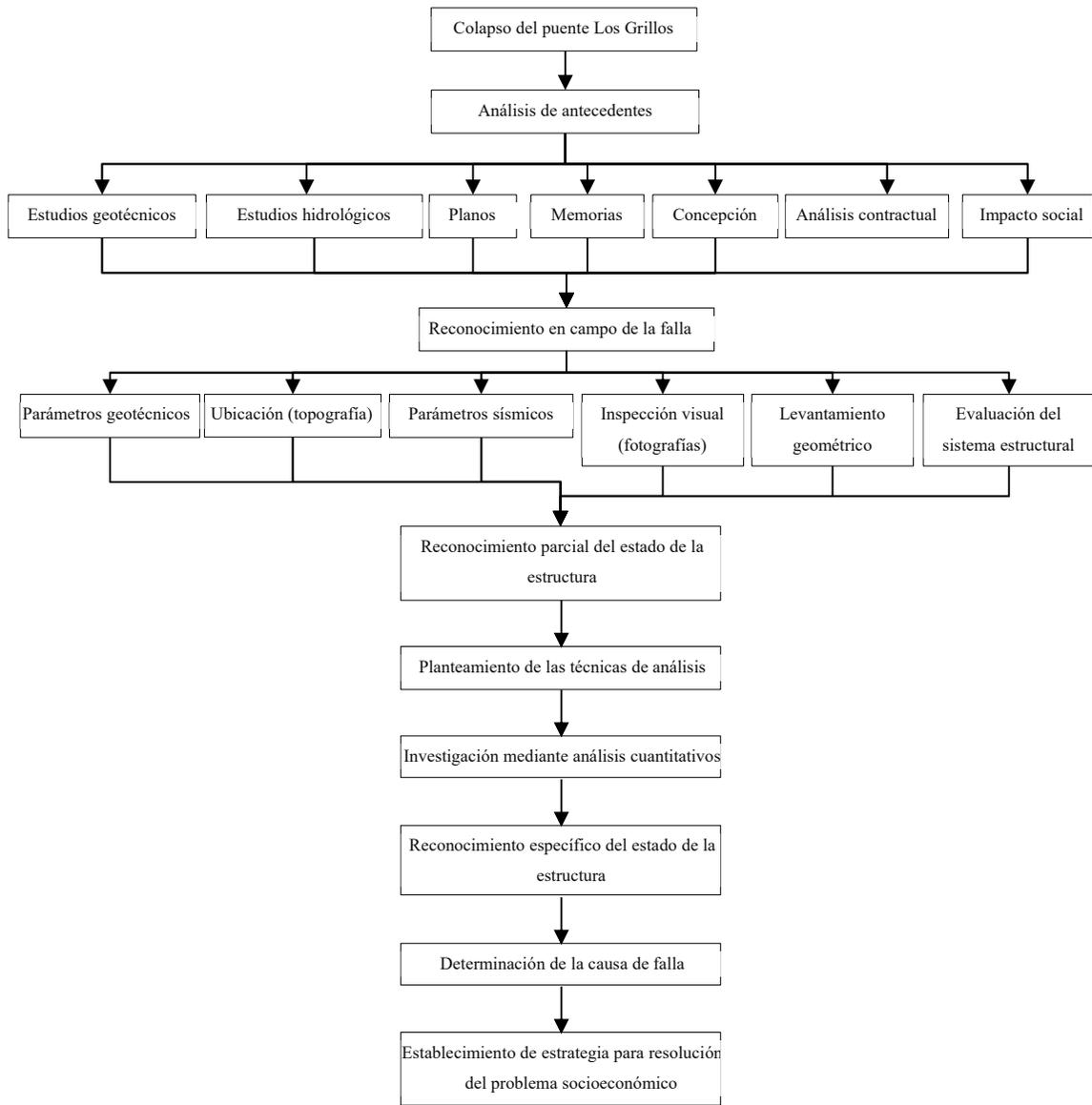
Establecidas y determinadas todas las propiedades físicas, de acuerdo con la metodología planteada, será propio continuar el análisis mediante la metodología cuantitativa, en donde se determine mediante análisis estructural el estado actual de la estructura (refiriéndose tanto al tramo de puente colapsado como al que continua en pie). Es importante este análisis ya que permitirá la determinación de la causa específica de falla con el fin de establecer soluciones socioeconómicas para la región afectada.

Finalmente, será esencial realizar análisis por metodologías físicas y mediante el uso de técnicas de análisis destructivas equivalentes a pruebas de cargas sobre los segmentos del

puede que no colapsaron, esto siempre que la estrategia de solución para dar continuidad a la conectividad de las regiones se base en la reconstrucción del tramo de puente colapsado.

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

Es importante resaltar que la ejecución particular de esta investigación requerirá de involucrar profesionales expertos a fines en diferentes campos, no solo en ingeniería estructural; será necesaria la intervención de especialistas en temas hidráulicos, hídricos, geotécnicos, geológicos, topográficos, contractuales, ambientales entre otros.



*Ilustración 8 Metodología propuesta para encaminar el proceso de investigación de falla del puente Los Grillos*  
*Fuente: Elaboración propia*

## **Conclusiones**

Es evidente el trabajo adicional que es requerido en el área de las patologías estructurales dada la escasa formación de profesionales en el área de la investigación de fallas de estructuras, por tanto, se presenta un escaso conocimiento en la materia, especialmente en la nación. Dicho desconocimiento contribuye a muchas de las tipologías de fallas de estructuras, siendo evidente que en su mayoría las fallas generadas se producen por errores humanos, bien sea por deficiencias en la formación y conocimiento del comportamiento de los materiales dada a la escasa capacitación particular del ingeniero en temáticas básicas como el diseño o construcción o por conocimiento escaso de la mecánica estructural y comportamiento del material.

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

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

Es esencial por parte de los evaluadores contar con el conocimiento sobre las causas generales y específicas de falla, de esta manera se logrará un diagnóstico adecuado y una correcta aplicación de las metodologías de identificación de fallas. La experiencia y criterio de los evaluadores es de esencial importancia al momento de seleccionar la mejor metodología para investigación de falla aplicable para el proyecto; esta determinará la

eficiencia en los procedimientos evaluativos. En los casos de falla no se podrá atribuir la responsabilidad a una única causa; esta será un acumulado de varias causas de falla que sumadas desencadenan un tren de falla.

Existe en el país una necesidad latente de implementación de organismos que contribuyan a la divulgación y análisis de los casos de fallas nacionales, de esta manera las lecciones aprendidas no se limitaran a aquellas asociaciones herméticas con escaso reconocimiento en el gremio de la ingeniería del país, sino que se lograrán transmitir a todos aquellos involucrados en las actividades de construcción; esto contribuirá a evitar errores comunes que por falta de conocimiento se ejecutan en el día a día en la industria de la construcción.

Así mismo, será de especial interés el fomentar el acceso a construcciones formales que garanticen el cumplimiento de los mejores estándares en la construcción en pro de la seguridad y de la vida. Una de las principales preocupaciones en el país es la construcción informal en donde se hace complejo evaluar la durabilidad con las buenas prácticas de la construcción; para esta tarea difícil es aconsejable el empleo de las recomendaciones emitidas por el comité 400 del AIS vulnerabilidad sísmica y evaluación de daños (Comité AIS 400, 2023).

Finalmente, se hace evidente la necesidad de trabajos de investigación de metodologías de fallas en estructuras diferentes al concreto, estos deberán basarse en el uso de los materiales más típicos de la construcción nacional como la guadua, la mampostería, el acero, la tapia o el bahareque, de manera que se cuente con documentos provechosos para la industria colombiana.

## Referencias

- ACI 364.1R-19. (2019). *Guide for Assessment of Concrete Structures before Rehabilitation*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Alva Ortega, M. (2019). *Determinación y evaluación de patologías del concreto en el reservorio del sistema de agua potable en la localidad de Cochaongo, distrito de Yungay, provincia de Yungay, Region Ancash -2017*. Chimbote: Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote.
- Arqa. (05 de Agosto de 2020). *Patología de las construcciones: desprendimientos de cerámicos*. Obtenido de <https://arqa.com/empresas/novedades/patologia-de-las-construcciones-desprendimientos-de-ceramicos.html>
- Basset Salom, L. (2023). *Proceso de diagnóstico y técnicas de inspección en estructuras de hormigón*. València: Universidad Politecnica de Valencia.
- Comité AIS 400. (2023). *AIS 410-23: Evaluación Y Reducción De La Vulnerabilidad Sísmica En Viviendas De Mampostería*. Bogotá: Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica.
- FEMA P-154. (2015). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook - Third Edition*. California: Federal Emergency Management Agency.
- Gagg, C. R. (2020). *Forensic Engineering The Art And Craft Of A Failure Detective*. New York: Taylor & Francis Group.
- García Castillo, D. F., Murcia Forero, J. A., & Torres Romero, C. E. (2020). *Análisis del contexto regional sobre la incidencia de las inestabilidades geotécnicas en el sector Peña de Gallo en la vía del Cusiana del municipio de Pajarito*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Seclen Falen, L. A. (2019). *Patología y terapéutica en estructuras de concreto armado de instituciones educativas públicas del distrito de Pimentel*. Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio De Mogrovejo.