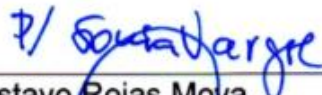


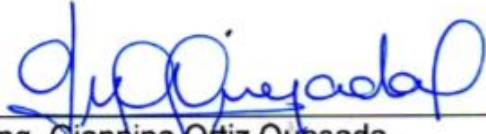
**CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE  
PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Giannina Ortiz Quesada, Ing. Hugo Navarro Serrano, Ing. Ángel Navarro Mora, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



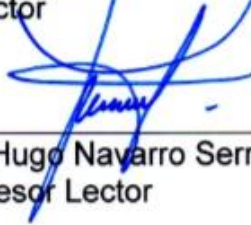
---

Ing. Gustavo Rojas Moya.  
Director



---

Ing. Giannina Ortiz Quesada.  
Profesora Guía



---

Ing. Hugo Navarro Serrano.  
Profesor Lector



---

Ing. Angel Navarro Mora.  
Profesor Observador

Puntarenas, 24 de noviembre de 2017

Señores:  
Escuela de Ingeniería en Construcción  
Tecnológico de Costa Rica  
Sede Cartago

Por este medio hago constar que he revisado y corregido la sintaxis, la morfología y la semántica del texto denominado: "Evaluación y clasificación de patologías que influyen en la vida útil de las losas de concreto en puentes", propiedad de Ana Emilia Matarrita Soto, cédula 603820397, el cual se ha presentado como requisito para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería en Construcción.

Cordialmente,



Lcda. Magdalena  
Filóloga  
Carné 10785  
Cédula 6-230-116

Venegas Porras

# Evaluación y clasificación de patologías que influyen en la vida útil de las losas de concreto en puentes



# Abstract

Determining the service life of bridges depends on the type of structure, materials and applied loads. It is a complicated subject that requires a detailed analysis that involves all these factors.

In this case, the problem that affects the service life of concrete slabs in 29 national route bridges was investigated, detailing the mechanisms and evidences of degradation and the degree and location of the damage.

The work focused on the study of the concrete slabs of bridges, as they are part of the structural elements of them that present the greatest evidence of damage.

The focus of the research lies in the study of the main mechanisms of deterioration presented by the particular characteristics of the bridges and their impact on the life of these, because there is a lack of information regarding the duration of life based on its structure.

Information about design for durability is emphasized as an option to reduce the factors that cause such variability of structural elements; in addition, three methods are proposed to determine the service life: analytical method, method based on spatial variability and method focused on the mechanisms of degradation. Those mentioned could be obtained the calculation of the service life of the element under study as of the general structures of bridges.

**Keywords:** Service life, concrete slabs, durability.

# Resumen

La determinación de la vida útil de puentes depende del tipo de estructura, materiales y cargas aplicadas. Es un tema complejo que requiere de un análisis detallado, el cual involucra todos estos factores.

En este caso, se indagó sobre la problemática que afecta la vida útil en las losas de concreto en 29 puentes de rutas nacionales, donde se detalla los mecanismos y evidencias de degradación, además de establecer el grado y la ubicación del daño.

El trabajo se enfoca en el estudio de las losas de concreto de los puentes, por ser parte de los elementos estructurales que presentan mayores evidencias de daño.

El enfoque de la investigación radica en el estudio de los principales mecanismos de deterioro que presentan las losas de concreto en los puentes y su afectación en la vida útil de estas, puesto que existe poca información en cuanto a la duración de la vida en función de su estructura.

Se destaca información sobre el diseño por durabilidad como una opción para disminuir los factores que causan tal variabilidad de los elementos estructurales, además, se proponen tres métodos para determinar la vida útil: método analítico, método basado en la variabilidad espacial y método enfocado en los mecanismos de degradación. Con lo mencionado se podría obtener el cálculo de la vida útil del elemento en estudio y de las estructuras de los puentes en general.

**Palabras clave:** Vida útil, losas de concreto, durabilidad.

# **Evaluación y clasificación de patologías que influyen en la vida útil de las losas de concreto en puentes**

# **Evaluación y clasificación de patologías que influyen en la vida útil de las losas de concreto en puentes**

ANA EMILIA MATARRITA SOTO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre, 2017

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

Prefacio .....	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Marco Teórico .....	5
Metodología .....	11
Resultados .....	13
Análisis de los resultados .....	44
Conclusiones y Recomendaciones.....	48
Apéndice .....	50
Anexos .....	51
Referencias .....	52

# Prefacio

La Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica, ha venido promoviendo el desarrollo de proyectos de graduación e investigación en materia de puentes con el fin de contribuir a atender una problemática que padece el país en materia de infraestructura.

Uno de los temas propuestos es la determinación de la vida útil de esas estructuras, debido a la escasez de información referente a dicha temática en Costa Rica. Es así como surge la idea de investigar sobre las principales causas de daños en las losas de concreto de los puentes, mediante investigación respecto de algunas metodologías que se podrían implementar para extender el periodo de servicio, proponer distintos elementos que ayuden a proteger las estructuras y brindar recomendaciones para el buen desempeño del elemento estructural.

Se destaca la participación de la coordinadora del Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes, la Ingeniera Giannina Ortiz Quesada, quien además es profesora guía del proyecto.

Finalmente, un agradecimiento especial para el profesor Ing. Hugo Navarro Serrano, Ing. Roberto Yglesias Cuadra, Ing. Gerardo Páez González y Ing. Katherine Vargas Padilla, quienes brindaron información y consultas profesionales del tema.



# Resumen ejecutivo

La determinación de la vida útil en estructuras de puentes ha sido un tema complejo que requiere de un análisis detallado. En Costa Rica, en el área de puentes, existe una escasez de información referente a la vida útil de estas estructuras de concreto; por ello, la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica propuso, a través de la coordinadora del área de puentes, investigar sobre metodologías que se puedan implementar para alargar el periodo de servicio de los elementos en estudio.

Se recopiló información sobre inspecciones a 29 puentes en rutas nacionales realizadas por el Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes del Tecnológico de Costa Rica, para definir factores que contribuyen a un deterioro de la losa de concreto en ellos.

Se clasificó el grado de daño en las losas utilizando como referencia el Manual de Inspecciones de Puentes del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT); además, se identificó el desgaste y los agentes que deterioran la estructura, lo cual facilita la cuantificación a través de cuadros y gráficas.

Se investigó acerca de tres metodologías que se pueden implementar para el cálculo de la vida útil de las estructuras, las cuales son: método analítico, método de variabilidad espacial y método de mecanismos de degradación.

Se indagó sobre el diseño por durabilidad como un mecanismo de implementación a la hora del diseño estructural, para contribuir con la extensión de la vida útil; además, se logró identificar en los 29 puentes, agentes que afectan la durabilidad del concreto en las losas.

Las losas de concreto en los puentes evaluados, en general, presentan daños de regulares a severos; exponen en un 28% manifestaciones de cuatro daños visibles por cada losa estudiada. El 90% presenta eflorescencia y agrietamientos en una dirección como su principal patología. En la parte superior de la losa se observan agrietamientos, agujeros y descascaramientos; en la parte inferior se encontraron nidos de piedra, eflorescencia y acero de refuerzo expuesto.<sup>1</sup>

Existen varios métodos de evaluación de patologías que se presentan en las losas de concreto de los puentes; dentro de los cuales se enfatiza:

- ✓ El método analítico determina la probabilidad de falla a través de parámetros de entrada, con lo que se logra así obtener la vida útil del elemento.
- ✓ El método de variabilidad espacial se enfoca en la ubicación o lugar del deterioro en la losa, que modela un área relativa de corrosión, agrietamiento y desprendimiento para lograr obtener el cálculo de la vida útil.
- ✓ El método de mecanismos de degradación está basado en modelos de deterioros físicos (carbonatación y ataques por cloruros) producidos por condiciones ambientales locales y estados límites, con los periodos de iniciación y propagación para abordar el problema y así predecir la vida útil del elemento que se está analizando.

El modelo de durabilidad de Tuutti se postula como el más acertado para el 90% de las losas estudiadas, pues permite reconocer las etapas o periodos de corrosión; así mismo, determinar el periodo de vida útil de los elementos de concreto.

Se recomienda implementar estudios o pruebas de laboratorio destructivas o no destructivas, que brinden la información requerida para la determinación de la vida útil de las losas de concreto, establecidas en las metodologías expuestas. Los daños exhibidos son producto de la falta de un programa de mantenimiento de puentes; con un correcto plan de cuidado de las estructuras, se lograría una extensión en su vida de servicio.

En cuanto a reparación o rehabilitación del elemento a causa de grietas, se sugiere seguir procedimientos para restablecer y aumentar la resistencia y rigidez, mejorar funcionalidad, lograr impermeabilidad, mejorar apariencia y durabilidad e impedir que se desarrolle un ambiente corrosivo

# Introducción

Los puentes son estructuras viales que influyen de manera importante en el ámbito económico de un país; son un enlace en la comunicación a través del servicio de transporte.

Esta infraestructura vial es diseñada con el fin de proporcionar, en periodos largos, actividades con seguridad; no obstante, la adecuada función del servicio y estabilidad de este, no solo considera las cargas del diseño, sino que otros factores son tomados en cuenta para la efectividad del puente, tales como fenómenos naturales, edad, procesos constructivos, materiales y el mantenimiento.

En Costa Rica, según el Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes (PEEP) del Tecnológico de Costa Rica (TEC), se cuenta con 1400 puentes ubicados en rutas nacionales y 6000 en rutas cantonales, de los cuales el 77% son de concreto. La condición en la que se encuentran respecto a su estructura es considerada de regular a deficiente; ello genera problemas de deterioro en alguno o varios de sus elementos estructurales, lo cual reduce su periodo de vida y ocasiona problemas de circulación, entre otros inconvenientes.

Este proyecto tiene como objetivo general identificar y definir los factores que contribuyen a un deterioro en las losas de concreto de los puentes y basados en estas causas; se trata de obtener métodos que se puedan implementar para determinar la vida útil de los elementos estructurales. Para tal efecto, se recopiló información de inspecciones de 29 puentes en rutas nacionales brindadas por el PEEP del Tecnológico de Costa Rica. Además, se consultó al Manual de Inspecciones de Puentes del MOPT, tomando el apartado de inspecciones de losas de concreto.

Los deterioros observados en las losas de concreto impulsaron a la búsqueda de una solución para contrarrestar el daño y poder extender el periodo de vida útil; por ello, se propone la implementación del diseño por

durabilidad como un elemento para mejorar el desempeño ante las condiciones de servicio del puente y disminución en las reparaciones, que en términos económicos disminuyen costos.

Por otra parte, se investigó acerca de tres metodologías para estimar la vida útil de las losas de concreto. Cada método aporta distintas fórmulas basadas en las características del material, antecedentes del elemento, entre otros aspectos; las cuales son:

- Método analítico: Es un método de fiabilidad a base de la teoría de evaluar la vida útil de los puentes antiguos, con el fin de obtener una rehabilitación de la infraestructura. Utiliza el método Monte Carlo y se plantea utilizando un módulo del programa ANSYS; sin embargo, se podría utilizar otro programa a preferencia del diseñador.
- Método de variabilidad espacial: Trata de demostrar la predicción de la vida útil de un elemento de concreto que se deteriora debido a la corrosión iniciada por cloruro, donde se incluye la variabilidad espacial para considerar mejor simulación de la realidad.
- Método basado en los mecanismos de degradación: Establece la carbonatación y el ataque por cloruros como los procesos de degradación más importantes en medios salinos, por lo tanto, plantea estos procesos como modelos para lograr la estimación de la vida útil del elemento.

# Marco Teórico

## Vida útil

Se entiende por vida útil al periodo durante el cual una estructura es capaz de desempeñar las funciones para las cuales fue proyectada sin necesidad de intervenciones no previstas (Helene, 1997). Existen dos tipos de vida útil: vida útil de diseño y vida útil real.<sup>1</sup>

- Vida útil de diseño: Es la proyectada específicamente para una obra en particular o las que siguen especificaciones de los códigos o normas.
- Vida útil real: Se manifiesta cuando se ha alcanzado un nivel crítico o inaceptable de deterioro en la estructura, de tal forma, que hace a esta inservible para el propósito con el cual fue proyectada o diseñada. La vida útil real puede ser prolongada si se aplican providencias de mantenimiento preventivas o reparaciones curativas.

## Metodologías para estimar la vida útil

La predicción de la vida útil no se puede considerar una ciencia exacta debido a múltiples factores diferentes, lo que hace de la misma una actividad interdisciplinaria. Algunos de los métodos utilizados son:<sup>2</sup>

1. Métodos deterministas: Se basan en el estudio de los factores que influyen en la degradación de los elementos estudiados, en la comprensión de sus mecanismos de actuación y, por último, en su

---

<sup>1</sup> Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista del comportamiento del material, 2010.

<sup>2</sup> Propuesta metodológica para estimar la vida útil de los sistemas constructivos, 2012.

determinación, transcrita en funciones de degradación. Los factores se traducen en fórmulas que expresan su acción en el tiempo.

2. Métodos probabilísticos: Consideran la degradación como un proceso estocástico (teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria). Para su aplicación es necesario poseer datos reales recogidos durante un periodo.

3. Métodos semideterminista-semiprobabilista:

Son aquellos que utilizan distribuciones o funciones de probabilidad para definir los factores que influyen en la degradación de los elementos objeto de estudio.

4. Métodos de ingeniería: Armonizan los métodos probabilísticos y deterministas. Según Daniotti (2003) se pueden utilizar para identificar los fenómenos de degradación de forma más analítica y así controlarlos en proyecto a través de la planificación del mantenimiento.

## Metodologías para estimar la vida útil

Método analítico para predecir la vida útil:

Según Wu (2009), con este método analítico se puede determinar la probabilidad de falla utilizando los parámetros de entrada. La vida útil es determinada variando la resistencia, el área transversal y densidad del refuerzo, modificando la resistencia a la fuerza de tracción y compresión del concreto y variando la densidad de este. Para poder llegar a la falla estructural se necesita un cierto periodo de tiempo; no obstante, como se utiliza un programa para obtener las cargas y deformaciones, no se necesita simular la fiabilidad del elemento a cada minuto como se haría en un análisis dinámico. Después, se divide la vida útil del elemento en un número de

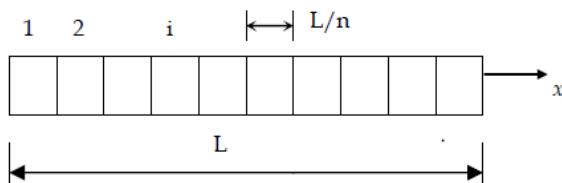
intervalos de tiempo; al final de cada intervalo se toma el valor de cada parámetro propuesto en los modelos mencionados, estos siguen distribuciones normales.

Método de variabilidad espacial:

Según Ying (2007), la especificación de una cantidad aleatoria en el modelo de vida útil para estructuras de concreto debe incluir: tipo de distribución, parámetros como el valor medio y la desviación estándar, un patrón de fluctuación en el tiempo y un patrón de fluctuación en el espacio. También, debe tener un tipo común de campo el cuál es conocido como el campo de Gauss. El campo homogéneo gaussiano puede ser una herramienta útil en la descripción estadística de las propiedades aleatorias espaciales. En este proceso es utilizado el método de análisis Monte Carlo, traducido en una descripción probabilística completa el estado de la estructura en función del tiempo.

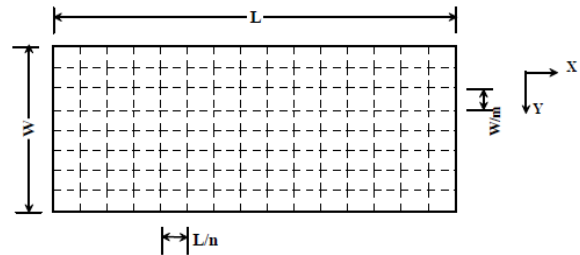
La determinación de la fiabilidad se logra al dividir en regiones el elemento en estudio; esta separación se obtiene basada en criterios como la vulnerabilidad a los daños, las condiciones ambientales, la carga, entre otros. Para habilitar un procedimiento de cálculo numérico, esas regiones deben dividirse en elementos más pequeños, lo cual requiere modelar un área relativa de corrosión, agrietamiento y desprendimiento, durante un tiempo determinado, donde se define de manera posible y arbitraria, el final de la vida, basados en dos criterios: el del 5 % de la superficie que sufre desprendimiento o el del 30% de la superficie agrietada.

Se supone que no hay variación espacial dentro de un elemento, por lo que la distancia entre dos centros de elementos debe estar en el orden de la mitad de la escala de fluctuación  $d$ . Se utiliza el método Monte Carlo para realizar el análisis de confiabilidad respecto a la ocurrencia de cada modo de fallo.



**Figura 1:** Esquemización del modelo en una dimensión ( $L/n < 0,5d$ )

Fuente: Service life prediction and repair of concrete structures with spatial variability.



**Figura 2:** Esquemización del modelo en dos dimensiones. Fuente: Service life prediction and repair of concrete structures with spatial variability.

Método basado en los mecanismos de degradación:

Para estos mecanismos de degradación (ataque por cloruros y carbonatación), la corrosión va a tomar el papel principal. Según Branco y Brito (2009), se debe tener en cuenta que la tasa de corrosión es mucho mayor en los procesos iniciados por cloruro que en los procesos iniciados por carbonatación; sin embargo, ambos presentan periodos de iniciación y propagación, lo cual da como resultado un tiempo total indispensable para notar que el ataque es significativo, y por ende, disminución en la vida útil del elemento que se esté analizando.

**Durabilidad en el concreto**

La durabilidad es una propiedad importante del concreto. Es indispensable que el concreto tenga la capacidad y calidad para resistir las condiciones de servicio. El ACI-201 (1997) la define como: “la habilidad para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable mantendrá su forma, calidad y condiciones de servicio originales, cuando se exponen a su ambiente”.

Es difícil determinar las causas de problemas de durabilidad en estructuras de concreto, pero se sabe que para obtener un concreto durable se deben considerar los aspectos de calidad de materiales, un conocimiento de las condiciones de servicio, un correcto diseño y un adecuado proceso constructivo.

## Agentes que afectan la durabilidad

Existen dos categorías: agentes externos (se encuentran en el medio ambiente o se deben a condiciones de servicio) y agentes internos (se encuentran dentro del mismo concreto).<sup>1</sup>

Se clasifican por su origen en agentes físicos, químicos, biológicos y mecánicos. Los físicos son debido a cambios en el medio ambiente, tales como cargas, otros. Los agentes químicos pueden ser ataques por sulfatos, ácidos, agua de mar y cloruros. Los biológicos pueden ser microorganismos, algas, otros. Los agentes mecánicos se deben a las condiciones a las cuales se expone el concreto; entre ellas, la abrasión y la erosión.

Según el entorno donde se encuentre el elemento, la velocidad de penetración y el medio de transporte, se presentan agentes agresivos, entre ellos: exposición al ataque químico, corrosión del acero, reacciones químicas de agregados, abrasión y congelamiento-deshielo.

## Principales evidencias de daños

### 1. Ataques producidos en el concreto:<sup>2</sup>

- Ataques químicos: Estos pueden ser producidos por ácidos, bases, sales y agua; agua pura, casi pura, agua de pantano, agua de mar, aguas de desagüe.
- Ataques por gases: Anhídrido carbónico (superficie afectada se tornará blanda y pulverulenta.), anhídrido sulfuroso (en combinación con el agua forma ácido sulfuroso, el cual reacciona con el oxígeno y forma ácido sulfúrico; ambos ácidos corroen el concreto), otros gases (gases industriales disueltos en agua pueden formar ácidos.)
- Ataques por sulfatos: Los sulfatos de calcio, sodio, potasio y magnesio son responsables de algunos de los más destructivos ataques del concreto. El ataque se presenta en forma de expansión debida a la formación de

productos sólidos, cuyo volumen es mayor al de las sales que entran en la reacción.

- Ataque por sustancias orgánicas: Los ácidos orgánicos atacan al concreto con una severidad que depende de la concentración y temperatura.
- Ataque por congelación: Se ven afectados los concretos húmedos, expuestos a temperaturas menores a 0° C; pueden presentar agrietamiento debido a la presión interna que se desarrolla en los poros capilares como resultado del paso del agua al hielo.
- Ataque por reacción del agregado: Reacción álcali-sílice (produce expansiones excesivas y el correspondiente deterioro del concreto; ejemplos de daños: expansión, fisuramiento, formación de escamas endurecidas), reacción cemento-agregado (se presentan expansiones excesivas, acompañadas de agrietamientos importantes en concretos preparados con agregados gruesos de pequeño tamaño y altamente silicosis), reacción álcali- agregados carbonatados (expansión excesiva y fisuramiento en concretos recién colocados donde se emplean agregados gruesos provenientes de rocas carbonatadas), agregados contaminados (el carbón presente en el agregado puede contener compuestos de azufre, que por oxidación puede generar ataques de sulfatos).
- Ataque por desgaste superficial: Desgaste por abrasión (desgaste de la superficie por procesos de fricción o rozamiento, la mayor causa de abrasión se da por paso de personas o circulación de vehículos), desgaste por erosión (deterioro causado por la acción abrasiva de fluidos o sólidos en movimiento), desgaste por cavitación (erosión progresiva del concreto originada por el flujo no lineal de aguas limpias a velocidades sobre los 12 m/s).
- Ataques por altas temperaturas: Se da una disminución de la resistencia, alargamiento de la longitud inicial, considerable expansión permanente, disminución del módulo de elasticidad y dureza, descascamiento superficial,

<sup>1</sup> Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico, 2006.

<sup>2</sup> Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material, 2010.

fisuramiento y desprendimiento de trozos de concreto.

2. Corrosión en el acero de refuerzo: La corrosión consiste en la oxidación destructiva del acero por el medio que lo rodea.

La aparición de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado se debe a que el concreto es discontinuo, duro, de alta densidad y tiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados para generar permeabilidad a líquidos y gases; por ello, los agentes que desencadenan la corrosión en la atmósfera pueden introducirse en el concreto, formar una celda electroquímica y dar inicio así a la corrosión del acero.<sup>1</sup> Esto provoca que se rompa la película pasivante por sustancias agresivas que penetran en el concreto; el óxido formado en exceso ocupa un volumen mayor que el acero sin corroer, por lo que disminuye la sección de la varilla y hace perder la adherencia inicial deseada entre el acero y el concreto.

Los factores que afectan la corrosión son principalmente la dosificación; la compactación y la homogeneidad del concreto; el espesor del recubrimiento de concreto; el estado superficial de la varilla y la humedad ambiental. Por ello se establece que el concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, para garantizar la protección de la varilla de refuerzo contra las acciones agresivas de los agentes externos.

2.1 Tipos de corrosión más frecuentes:<sup>2</sup>

- Corrosión uniforme/generalizada: Es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva resultante de la carbonatación de concreto, presencia excesiva de iones cloruros o lixiviación del concreto.
- Corrosión localizada: Puede ser corrosión por picaduras, formada por la disolución localizada de la película pasiva, resultante del ingreso de iones cloruros al medio.
- Corrosión galvánica: Esta se da cuando hay presencia de dos metales diferentes en el medio electrolítico. En el caso del acero en el concreto, se dará cada vez

que en alguna zona se dañe o no se forme la película pasiva característica.

## Métodos de diseño por durabilidad

La teoría del diseño por durabilidad está basada en la teoría de seguridad tradicional usada en diseño estructural (diseño por confiabilidad estructural). El término *seguridad de una estructura* se define como la capacidad de una estructura de resistir, con un grado de certidumbre aceptable, la posibilidad de falla debido a la degradación gradual de la estructura producida por agentes agresivos del medio ambiente.<sup>3</sup> El nuevo giro que se le ha dado a la teoría de seguridad estructural es la incorporación del factor tiempo, esto permite incluir la degradación del concreto como una parte esencial en el diseño de estructuras.

## Daños en las losas de concreto

Las losas están sujetas a una variedad de daños causados por diferentes factores. Los daños más comunes presentes en ellas son<sup>4</sup>: grietas en una y dos direcciones, descascaramiento, acero de refuerzo expuesto, nidos de piedra, eflorescencia y agujeros.

1. Grietas en una dirección: Las grietas en una dirección son fisuras lineales en el concreto causadas, en muchos casos, por los esfuerzos, debido a la carga viva y muerta; son el indicativo más fiable de futuros problemas en el elemento. El ancho y distancia entre grietas es el aspecto más importante a la hora de la inspección.

2. Grietas en dos direcciones: Las grietas en dos direcciones se dan usualmente por la fatiga causada por la repetición de carga viva.

3. Descascaramiento: El descascaramiento es la delaminación local o desprendimiento de una superficie terminada de concreto endurecido como resultado de cambios de temperatura, pobre procedimiento constructivo o algún daño en el acero de refuerzo.

---

<sup>1</sup> Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos, 2006.

<sup>2</sup> Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material, 2010.

---

<sup>3</sup> Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad, 2001.

<sup>4</sup> Manual de Inspecciones del MOPT, 2007.

4. **Acero de refuerzo expuesto:** Hace referencia a la exposición del acero de refuerzo que debe estar embebido en el concreto.

5. **Nidos de piedra:** Son una segregación de los agregados gruesos, de los agregados finos y la pasta de cemento, causados por la vibración inapropiada durante el colado del concreto.

6. **Eflorescencia:** La eflorescencia es una mancha blanca que se forma en el concreto por causa del cloruro de calcio que es traído a la superficie del concreto por el agua. La eflorescencia indica que las grietas son profundas y han penetrado a través de la losa.

7. **Agujeros:** Cuando se observan agujeros, escamas, reventaduras en el concreto es una clara evidencia del deterioro de la losa de concreto.

## Grado de daño en las losas

Según el Manual de inspecciones de puentes del MOPT (2007), el grado de daño se define como la medida de daño o deterioro y esta no es una medida de deficiencia de diseño, Los inspectores de campo asignan la calificación en función de las evidencias de deterioro presentes en las losas de concreto.

Las evidencias de deterioro que se presentan en las losas de concreto se evalúan respecto a una escala progresiva que va de 1 a 5, donde 1 hace referencia a la ausencia de daño y 5 la presencia de gran deterioro en el elemento.

A continuación se presenta una descripción de la escala de evaluación:

### 1. Grietas en una dirección:

Grado de daño	Descripción
1	No se observan grietas.
2	El ancho de las grietas es menor a 0.2mm en intervalos de más de 1.0m
3	El ancho de las grietas es mayor a 0.2mm en intervalos de más de 1.0m
4	El ancho de las grietas es mayor a 0.2mm en intervalos entre 1.0 m y 0.5 m
5	El ancho de las grietas es mayor a 0.2mm en intervalos de menos de 0.5m

**Figura 3:** Grado de daño en las grietas en una dirección.  
Fuente: Manual de inspecciones del MOPT.

### 2. Grietas en dos direcciones:

Grado de daño	Descripción
1	No se observan grietas
2	No aplica
3	El ancho de grieta es menor a 0.2 mm con intervalos mayores a 50cm
4	El ancho de grieta es mayor a 0.2 mm con intervalos menores a 50cm
5	El ancho de grieta es mayor a 0.2 mm y el concreto de esta descascarando.



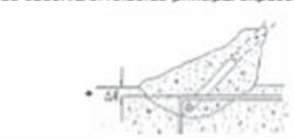
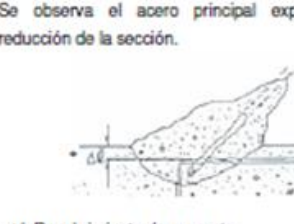
**Figura 4:** Grado de daño en las grietas en dos direcciones.  
Fuente: Manual de inspecciones del MOPT.

### 3. Descascaramiento:

Grado de daño	Descripción
1	No se observa descascaramiento en la superficie de la estructura
2	Se observa el principio del descascaramiento
3	Ha crecido el descascaramiento en algunas partes de la superficie de la estructura.
4	Se observa un considerable descascaramiento.
5	Se observa un considerable descascaramiento y óxidación.

**Figura 5:** Grado de daño del descascaramiento.  
Fuente: Manual de inspecciones del MOPT.

### 4. Acero de refuerzo expuesto:

Grado del daño	Descripción
1	Descascaramiento en la superficie del concreto
2	Se observan cáscaras a lo largo del refuerzo principal 
3	El refuerzo está expuesto en pequeñas partes 
4	Se observa el refuerzo principal expuesto y oxidado 
5	Se observa el acero principal expuesto y con reducción de la sección. 

**Figura 6:** Grado de daño del acero de refuerzo expuesto.  
Fuente: Manual de inspecciones del MOPT

### 5. Nidos de piedra:



Grado de daño	Descripción
1	No se observaron nidos de piedra
2	Se observaron nidos de piedra en algunos sitios.
3	Se observan mas de diez nidos de piedra.
4	Se observan nidos de piedra en muchos sitios
5	No aplica

**Figura 7:** Grado de daño de nidos de piedra.  
Fuente: Manual de inspecciones del MOPT

#### 6. Eflorescencia:

Grado	Descripción
1	No se observó eflorescencia.
2	Se observaron pequeñas manchas blancas en la superficie de concreto.
3	Se observó eflorescencia a lo largo de la grieta en menos de la mitad del área de losa.
4	Se observó eflorescencia en más de la mitad del área de losa.
5	Se observaron estalactitas en muchos lugares causadas por el cloruro de calcio.

**Figura 8:** Grado de daño de Eflorescencia.  
Fuente: Manual de inspecciones del MOPT

#### 7. Agujeros:

Grado de daño	Descripción
1	No se observaron agujeros
2	Se observaron escamas en la superficie de concreto
3	Se observan pequeños agujeros a lo largo del refuerzo en la losa
4	Se desarrollan agujeros con mas de 1.0 m <sup>3</sup> del área bajo la losa
5	Existen evidencias de que el agujero se extiende a través la losa.

**Figura 9:** Grado de daño de agujeros.  
Fuente: Manual de inspecciones del MOPT

# Metodología

Para el desarrollo del proyecto de investigación se realizó, inicialmente, una búsqueda de documentos sobre los mecanismos de degradación que afectan al concreto; de ahí se partió a indagar sobre los daños más frecuentes en las losas de concreto de los puentes en Costa Rica. Para tal efecto se tomó como referencia el Manual de inspecciones de puentes del Ministerio de obras Públicas y Transportes (2007). Seguidamente, se recopiló información de las inspecciones realizadas por el Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes para obtener estadísticas de las evidencias del daño presente en el país.

Las infraestructuras analizadas fueron proporcionadas por PEEP del Tecnológico de Costa Rica. Se escogieron las primeras inspecciones que fueron realizadas en el 2015 basadas en las rutas primarias, de la ruta 1 a la ruta 39. De estas rutas primarias, algunas ya habían sido inspeccionadas o estaban a cargo de otro ente, por ende, no se cuenta con todas las rutas abarcadas en ese rango.

Se analizaron 29 puentes para destacar los daños frecuentes en las losas de los puentes en Costa Rica. Los criterios de inclusión para la escogencia de estos se mencionan a continuación:

- El material: Puentes con superestructuras de concreto.
- Elemento en estudio: Losas de concreto con evidencias de deterioro.
- Longitud del puente: Se analizaron puentes con longitudes: cortas (6-15m), medianas (15-50 m) y largas (50-100 m).

Debido a la longitud que se establecía como criterio de inclusión, se propuso obtener tres puentes por cada ruta. No obstante, existían rutas cuyos puentes no presentaban las características prestablecidas, por lo tanto, en algunos casos se tomaron los

que cumplían con las especificaciones estipuladas.

Para el análisis de los puentes seleccionados se consideraron los criterios determinados en el Manual de inspecciones de puentes del MOPT (2007), el cual establece los grados de deterioro que las estructuras poseen. Por otra parte, se tomaron los informes de los puentes evaluados por el PEEP en el año 2015, esto con el fin de obtener datos actualizados.

La muestra seleccionada está conformada por 29 puentes, analizados de acuerdo con el lugar de procedencia. Por otra parte, se tomaron en cuenta las evidencias de daño que poseían, así como el grado de deterioro. Se recopilaron los datos en torno a la ubicación del desgaste y los agentes agresivos del ambiente que deterioran la estructura. Para facilitar la cuantificación de los problemas, se realizaron cuadros y gráficas que detallan las características y daños de cada puente.

Se realizó una revisión teórica acerca de metodologías utilizadas para calcular la vida útil de las losas de concreto, así como su durabilidad. Por otra parte, se enumeraron los daños más comunes que presentan las losas y el grado de daño que se puede generar.

La indagación del diseño por durabilidad se limitó en la teoría de probabilidad de falla y métodos de integrales de diseño, los cuales se subdividen en el método determinista, estocástico y factores de seguridad. Además, se expusieron modelos de durabilidad tales como: modelo de Tuutti (1982), Beeby (1983), Bazant (1979) y Browne (1980).

Las metodologías investigadas para la determinación y análisis de la vida útil se confinaron en tres tipos. La primera, un método analítico, haciendo uso del método Monte Carlo y un programa de modulación de cargas (ANSYS). La segunda, un método basado en la variabilidad espacial y la tercera, un método que involucra los mecanismos de degradación del concreto.

En cuanto a la recopilación de información de los métodos de durabilidad y vida útil, se indagó diferentes fuentes como tesis, libros, artículos científicos, entrevistas a expertos y la web.

En cuanto a la metodología, se realiza un esquema en el cual se detalla la estructura de lo realizado en la investigación (ver figura 8).

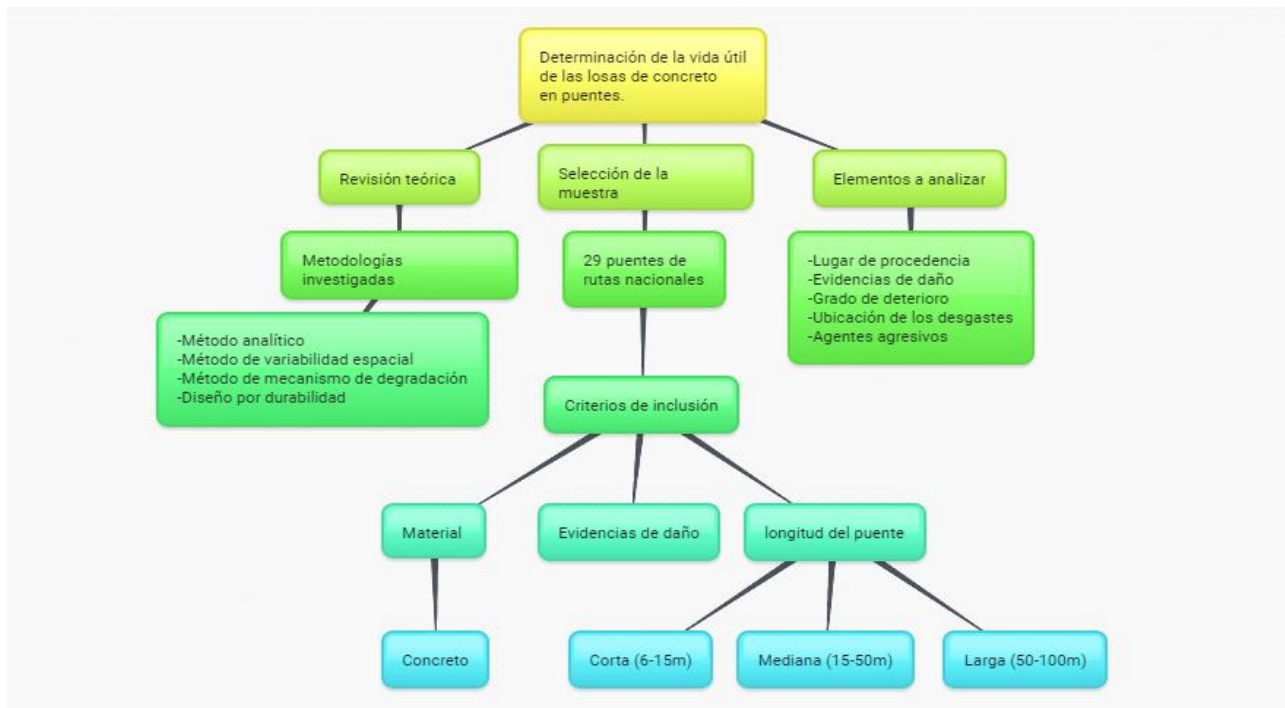


Figura 10: Esquema de metodología.

# Resultados

## PUENTES EN ESTUDIO

La información inicia con las características de cada puente (Lugar: provincia, longitud, ancho), evidencias de daño (grado de daño según Manual de inspecciones del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2007.)

**Ruta 1:** Río grande de Tárcoles.

Provincia: Alajuela.

Longitud total: 43.76 m.

Ancho: 10.32 m.

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 5) 2. Grietas en dos direcciones (grado 4) 3. Descascaramiento (grado 2) 4. Eflorescencia (grado 3)



Figura 11: Agrietamiento grado 4.



Figura 12: Eflorescencia grado 2 y 3.

**Ruta 2:** Quebrada el Ceibo.

Provincia: Puntarenas

Longitud total: 15 m

Ancho: 9 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Descascaramiento (grado 2). 3. Acero de refuerzo (grado 3) 4. Eflorescencia (gr.2: parte inferior)



Figura 13: Eflorescencia grado 2 y acero de refuerzo grado 3.



Figura 14: Agrietamiento grado 3.

**Ruta 2:** Río Tiribí B.

Provincia: Cartago

Longitud total: 35 m

Ancho: 10.32 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 4) 2. Grietas en dos direcciones (grado 4) 3. Eflorescencia (grado 2)



Figura 15: Agrietamiento grado 4.



Figura 16: Eflorescencia grado 4.

**Ruta 2: Río Convento.**

Provincia: Puntarenas

Longitud total: 84 m

Ancho: 8.8 m

Evidencias de daños: 1. Eflorescencia (grado 2)



Figura 17: Eflorescencia grado 2.

**Ruta 3: Río Cuajiniquil.**

Provincia: Alajuela

Longitud total: 12.8 m

Ancho: 8.05m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Acero de refuerzo (grado 3) 3. Nidos de piedra (grado 2) 4. Eflorescencia (grado 2)



Figura 18: Eflorescencia grado 2.



Figura 19: Agrietamiento grado 3.

**Ruta 3: Quebrada Seca.**

Provincia: Heredia

Longitud total: 22.1 m

Ancho: 18.1m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3)

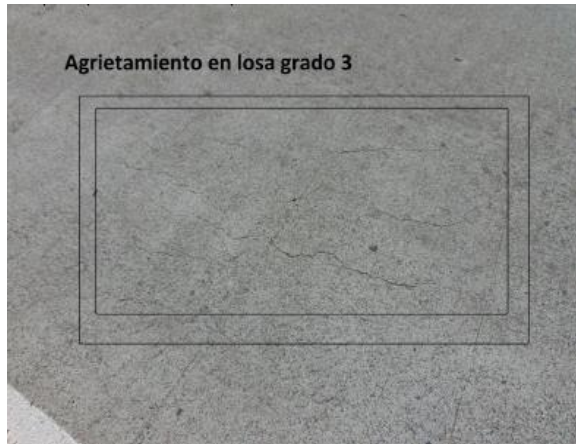


Figura 20: Agrietamiento grado 3.

**Ruta 4:** Quebrada Plata.

Provincia: Alajuela

Longitud total: 10.45 m

Ancho: 6.25 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 5) 2. Grietas en dos direcciones (grado 5) 3. Descascaramiento (grado 4) 4. Eflorescencia (grado 3) 5. Acero de refuerzo (grado 3)



Figura 21: Agrietamiento grado 5.



Figura 22: Agrietamiento y descascaramiento.



Figura 23: Eflorescencia grado 3.

**Ruta 4:** Río Aguazarcas

Provincia: Alajuela

Longitud total: 22.5 m

Ancho: 10.30 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 5) 2. Eflorescencia (grado 2)



Figura 24: Agrietamiento grado 5.



Figura 25: Eflorescencia grado 2.

**Ruta 4:** Río San Carlos.

Provincia: Alajuela

Longitud total: 81.5 m

Ancho: 10.30 m

Evidencias de daños: 1. Eflorescencia (grado 2) 2. Grietas en una dirección (grado 3)



Figura 26: Agrietamiento grado 3.



Figura 27: Eflorescencia grado 2.

**Ruta 6:** Canal de Riego.

Provincia: Guanacaste

Longitud total: 25.5 m

Ancho: 9.10 m

Evidencias de daños: 1. Eflorescencia (grado 2)



Figura 28: Eflorescencia grado 2.

**Ruta 6:** Río Zapote.

Provincia: Alajuela

Longitud total: 74.73 m

Ancho: 4.3 m

Evidencias de daños: 1. Eflorescencia (grado 3)

2. Grietas en una dirección (grado 3)



Figura 29: Eflorescencia grado 3.

**Ruta 10:** Río Chiz.

Provincia: Cartago.

Longitud total: 8.4 m

Ancho: 6.41 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Descascaramiento (grado 3) 3. Eflorescencia (grado 2)



Figura 30: Eflorescencia grado 2.



Figura 31: Agrietamiento grado 3.

**Ruta 10:** Paso Superior Acceso Mall Paseo

Metrópolis.

Provincia: Cartago

Longitud total: 19.5 m

Ancho: 27.55 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (gr.5: parte superior)

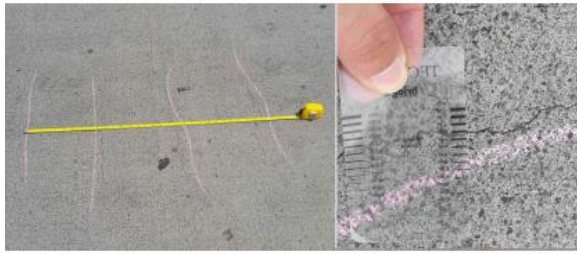


Figura 32: Agrietamiento grado 4.

**Ruta 18:** Quebrada Piñuela.

Provincia: Guanacaste.

Longitud total: 35.5 m

Ancho: 10.25 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 5) 2. Grietas en dos direcciones (grado 4) 3. Acero de refuerzo (grado 3) 4. Eflorescencia (grado 2)



Figura 33: Agrietamiento grado 5.



Figura34: Acero de refuerzo grado 3.

**Ruta 21:** Río San Pedro.

Provincia: Puntarenas

Longitud total: 15.45 m

Ancho: 4.25 m

Evidencias de daños: 1. Eflorescencia (grado 2)



Figura 35: Desgaste de superficie de rodamiento.

**Ruta 21:** Quebrada San Pedro.

Provincia: Guanacaste

Longitud total: 72 m

Ancho: 4.3 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Grietas en dos direcciones (grado 4) 3. Descascaramiento (grado 3) 4. Eflorescencia (grado 2)



Figura 36: Agrietamiento grado 4.



Figura 37: Descascaramiento y eflorescencia.



**Ruta 22:** Río Pacacua.

Provincia: San José Longitud total: 23 m Ancho: 11.20 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3)



**Figura 38:** Agrietamiento grado 3.

**Ruta 23:** Estero Mata Limón.

Provincia: Puntarenas

Longitud total: 73.5 m

Ancho: 11.4 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Grietas en dos direcciones (grado 4) 3. Descascaramiento (grado 4) 4. Acero de refuerzo (grado 4) 5. Eflorescencia (grado 3) 6. Nidos de piedra (grado 2)



**Figura 39:** Acero de refuerzo grado 4.



**Figura 40:** Eflorescencia y descascaramiento.

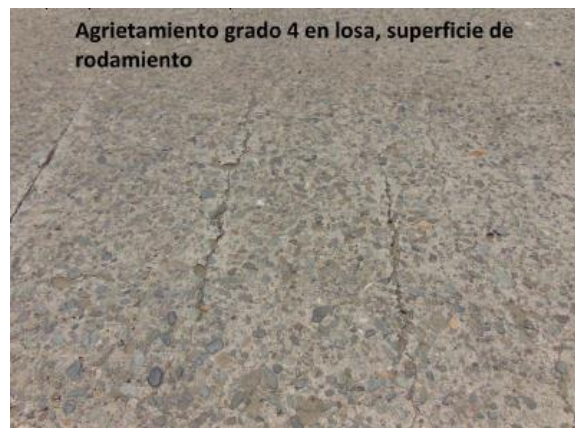
**Ruta 32:** Río Hondo.

Provincia: Limón

Longitud total: 45.5 m

Ancho: 10.3 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 2) 2. Grietas en dos direcciones (grado 3) 3. Descascaramiento (grado 2) 4. Eflorescencia (grado 2)



**Figura 41:** Agrietamiento grado 4.



**Figura 42:** Agrietamiento y eflorescencia.

**Ruta 34:** Quebrada Seca.

Provincia: Puntarenas

Longitud total: 12 m

Ancho: 10.3 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Eflorescencia (grado 2)



**Figura 43:** Eflorescencia grado 2

**Ruta 34:** Quebrada sin nombre.

Provincia: Puntarenas

Longitud total: 43 m

Ancho: 10.3 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Nidos de piedra (grado 2) 3. Eflorescencia (grado 2)



**Figura 44:** Eflorescencia grado 2.

**Ruta 34:** Quebrada Poza Azul.

Provincia: Puntarenas

Longitud total: 59.5 m

Ancho: 10.3 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Grietas en dos direcciones (grado 3) 3. Descascaramiento (grado 2) 4. Nidos de piedras (grado 2) 5. Eflorescencia (grado 2)



**Figura 45:** Eflorescencia y Agrietamiento.

**Ruta 35:** Río San Rafael.

Provincia: Alajuela

Longitud total: 47.6 m

Ancho: 4.9 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 2) 2. Grietas en dos direcciones (grado 4) 3. Descascaramiento (grado 2) 4. Eflorescencia (grado 2)



**Figura 46:** Agrietamiento grado 2 y 4.



**Figura 47:** Agrietamiento y Eflorescencia.

**Ruta 36:** Río Cocles.

Provincia: Limón

Longitud total: 9.4 m

Ancho: 10.3 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 2) 2. Grietas en dos direcciones (grado 3) 3. Eflorescencia (grado 2)



Figura 48: Agrietamiento grado 2.



Figura 49: Agrietamiento y eflorescencia.

**Ruta 36:** Quebrada dos aguas.

Provincia: Limón

Longitud total: 26 m

Ancho: 7.98 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 2) 2. Eflorescencia (grado 2)



Figura 50: Agrietamiento y Eflorescencia.

**Ruta 36:** Río Hone.

Provincia: Limón

Longitud total: 76.5 m

Ancho: 8.15 m

Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 3) 2. Descascaramiento (grado 2) 3. Nidos de piedra (grado 2) 4. Eflorescencia (grado 2)



Figura 51: Agrietamiento y descascaramiento.



Figura 52: Eflorescencia grado 2.

**Ruta 39:** P.S.S.R.N. 177 A.  
 Provincia: San José  
 Longitud total: 10.5 m  
 Ancho: 14.09 m  
 Evidencias de daños 1. Grietas en una dirección (grado 2) 2. Eflorescencia (grado 2)



Figura 53: Eflorescencia grado 2.

**Ruta 39:** P.S.S.R.N. 1  
 Provincia: San José  
 Longitud total: 30.6 m  
 Ancho: 19.16 m  
 Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 5) 2. Grietas en dos direcciones (grado 5) 3. Descascaramiento (grado 2) 4. Eflorescencia (grado 2) 5. Agujeros (grado 3)



Figura 54: Agujeros grado 3.

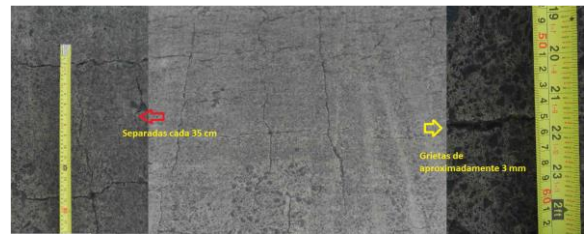


Figura 55: Agrietamiento grado 5.

**Ruta 39:** Río María Aguilar A.  
 Provincia: San José  
 Longitud total: 76.3 m  
 Ancho: 14.9 m  
 Evidencias de daños: 1. Grietas en una dirección (grado 2) 2. Descascaramiento (grado 2) 3. Eflorescencia (grado 2)



Figura 56: Agrietamiento y eflorescencia.

## DAÑOS EN LAS LOSAS DE CONCRETO

En los siguientes cuadros se resumen los resultados obtenidos de los daños más frecuentes en las losas de concreto de los puentes.

El cuadro 1 muestra la cantidad de puentes evaluados, por provincia, que presentan

evidencias de deterioro en sus losas. La figura 55 señala la cantidad de daños encontrados por cada losa. El cuadro 2 es la cantidad de losas que presentan daños según las clasificaciones del Manual de inspecciones de puentes del MOPT.

Los cuadros 3, 5, 7, 9,11, 13 y 15 refieren el grado y ubicación de cada uno de los daños encontrados en las losas.

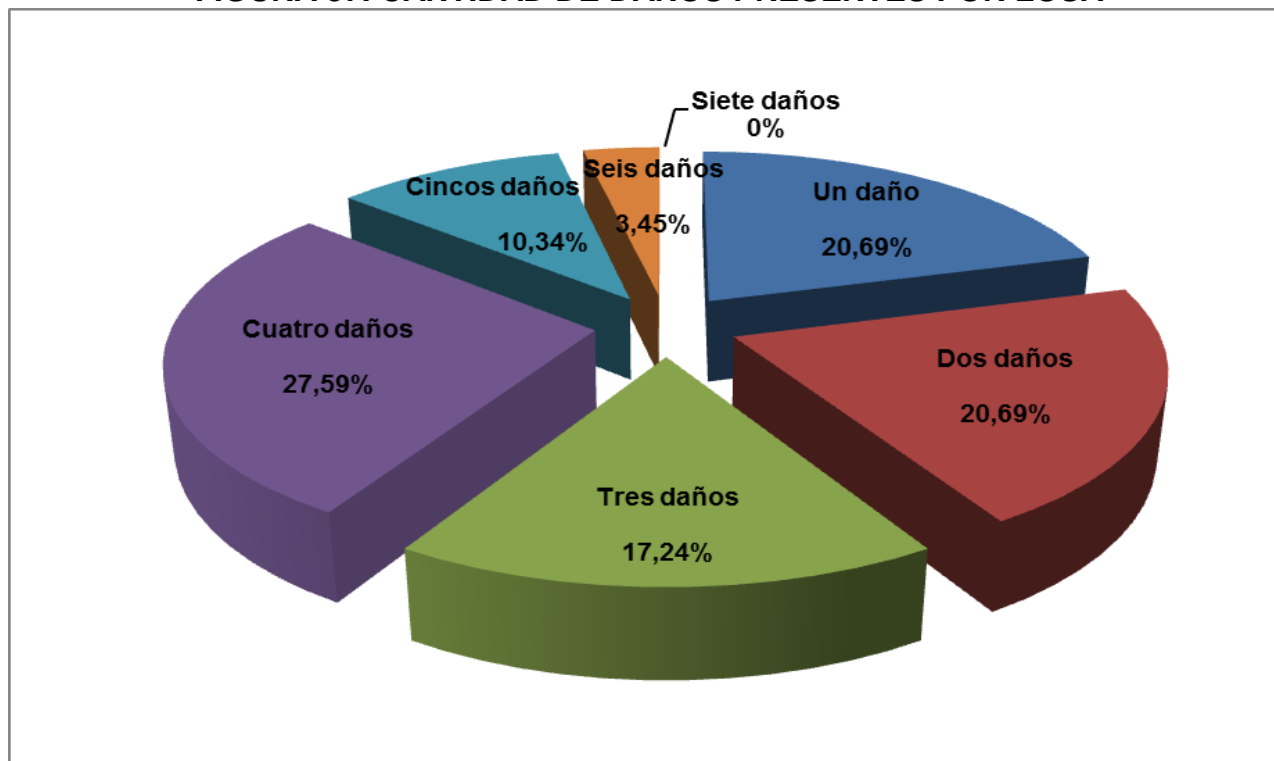
Los cuadros 4, 6, 8, 10, 12,14 y 16 muestran la cantidad de losas afectadas, según el grado de daño clasificado por el Manual de inspecciones de puentes del MOPT.

Las figuras entre la 58 y la 64, revelan la cantidad en porcentaje de los daños exhibidos, según la ubicación en las losas.

<b>CUADRO 1. PUENTES EVALUADOS POR PROVINCIA</b>		
<b>Provincia</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
San José	4	13,79
Alajuela	7	24,14
Heredia	1	3,45
Cartago	3	10,34
Puntarenas	7	24,14
Limón	4	13,79
Guanacaste	3	10,34

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 57. CANTIDAD DE DAÑOS PRESENTES POR LOSA**



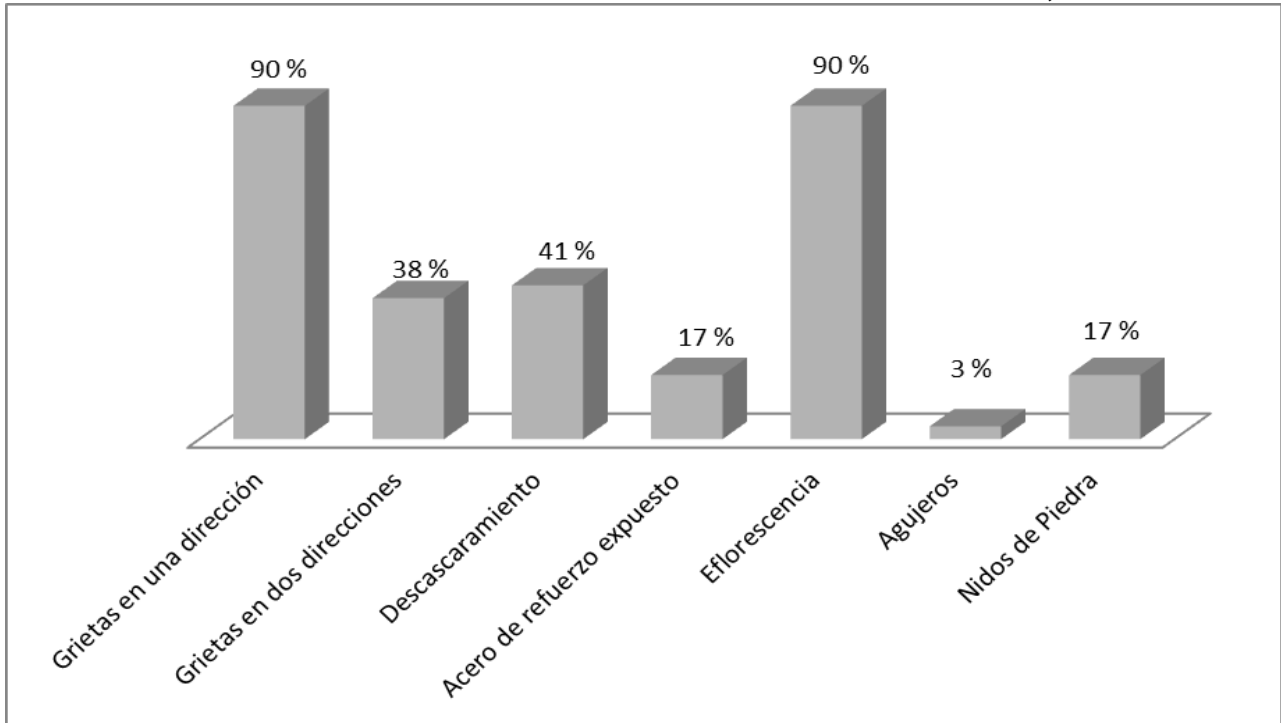
**Fuente:** Realización propia con datos proporcionados por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Excel.

**CUADRO 2. TIPOS DE DAÑO QUE PRESENTAN LAS LOSAS**

Daños	Cantidad de losas dañadas	Porcentaje (%)
Grietas en una dirección	26	90
Grietas en dos direcciones	11	38
Descascaramiento	12	41
Acero de refuerzo expuesto	5	17
Eflorescencia	26	90
Agujeros	1	3
Nidos de Piedra	5	17

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 58. PORCENTAJE DE DAÑOS PRESENTES EN LAS LOSAS, SEGÚN TIPO.**



**Fuente:** Realización propia con datos del cuadro 2. Elaborado con Microsoft Office Excel.

**CUADRO 3. GRADO Y UBICACIÓN DEL DAÑO POR GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN**

Nombre de puente	Provincia	Grado de daño	Ubicación del daño en la losa		
			Superior	Inferior	Borde
Río Grande de Tárcoles	Alajuela	5	✓	✓	-
Quebrada el Ceibo	Puntarenas	3	✓	-	-
Río Tiribí B.	Cartago	4	✓	-	✓
Río Cuajiniquil	Alajuela	3	-	✓	-
Quebrada Seca	Heredia	3	✓	-	-
Quebrada Plata	Alajuela	5	✓	-	-
Río Aguazarcas	Alajuela	5	✓	-	-
Río San Carlos	Alajuela	3	-	✓	-
Río Zapote	Alajuela	3	✓	-	-
Río Chiz	Cartago	3	✓	-	-
Paso Superior Acceso Mall Paseo Metrópoli	Cartago	5	✓	-	-
Quebrada Piñuela	Guanacaste	5	✓	-	-
Quebrada San Pedro	Guanacaste	3	✓	-	-
Río Pacacua	San José	3	✓	✓	-
Estero Mata Limón	Puntarenas	3	✓	✓	-
Río Hondo	Limón	2	✓	-	-
Quebrada Seca	Puntarenas	3	-	✓	-
Quebrada sin nombre	Puntarenas	3	-	✓	-
Quebrada Poza Azul	Puntarenas	3	-	✓	-
Río San Rafael	Alajuela	2	-	✓	-
Río Cocles	Limón	2	-	✓	-
Quebrada dos aguas	Limón	2	-	✓	-
Río Hone	Limón	3	✓	-	-
P.S.S.R.N. 177 A	San José	2	-	✓	-
P.S.S.R.N. 1	San José	5	✓	-	-
Río María Aguilar A	San José	2	-	✓	-

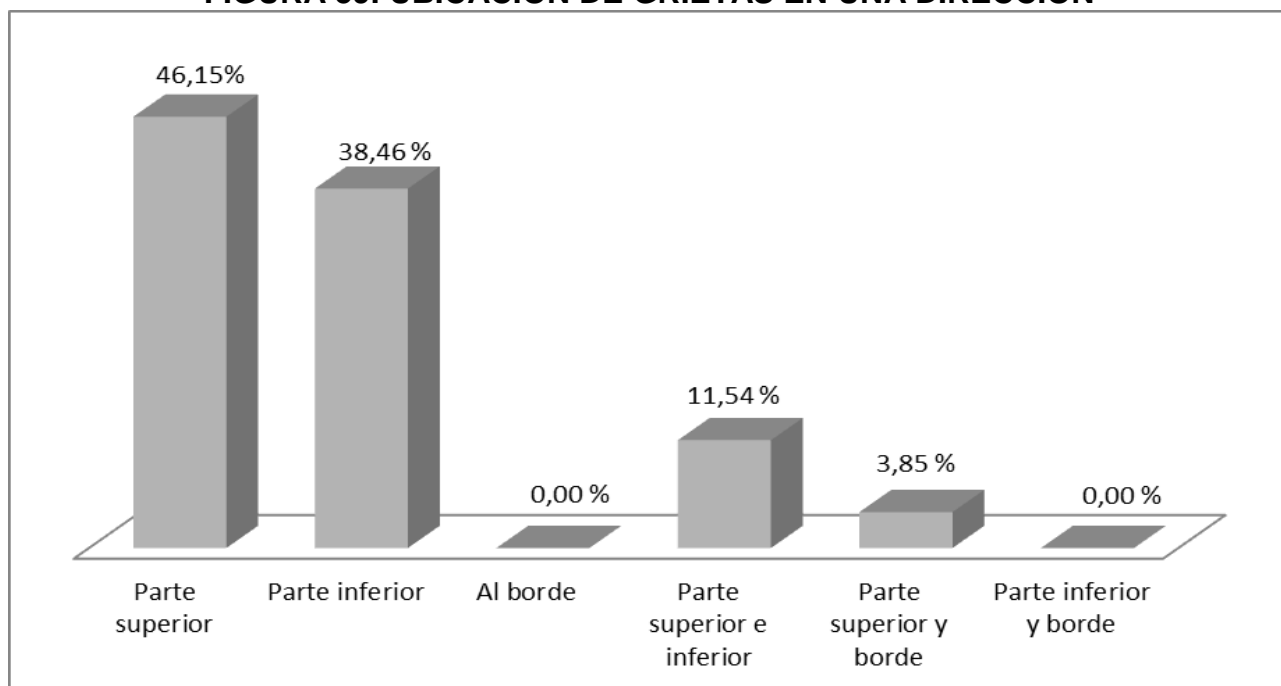
**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.



<b>CUADRO 4. GRADO DE DAÑO POR GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN</b>		
<b>Grado de daño</b>	<b>Cantidad de losas</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
No se observan grietas. (Grado 1)	0	0,00
El ancho de las grietas es menor a 0.2mm en intervalos de más de 1.0m (Grado2)	6	23,08
El ancho de las grietas es mayor a 0.2mm en intervalos de más de 1.0m (Grado 3)	13	50,00
El ancho de las grietas es mayor a 0.2mm en intervalos entre 1.0 m y 0.5m (Grado 4)	1	3,85
El ancho de las grietas es mayor a 0.2mm en intervalos de menos de 0.5m (Grado 5)	6	23,08

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 59. UBICACIÓN DE GRIETAS EN UNA DIRECCIÓN**



**Fuente:** Realización propia con datos del cuadro 3. Elaborado con Microsoft Office Excel.

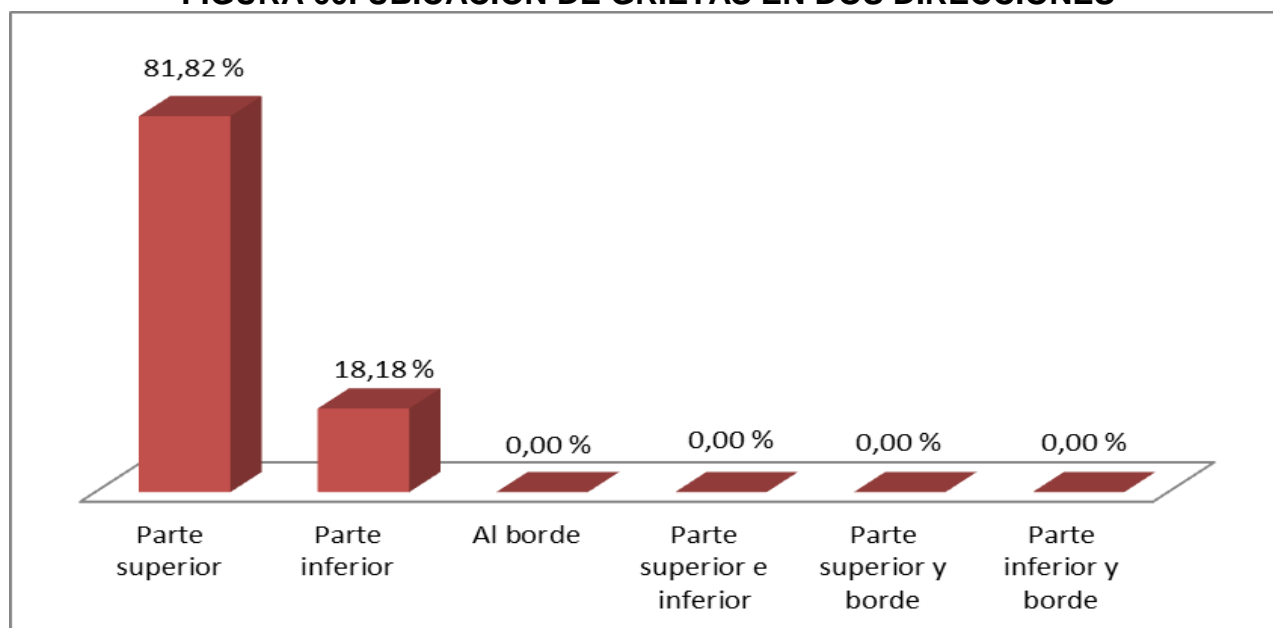
<b>CUADRO 5. GRADO Y UBICACIÓN DEL DAÑO POR GRIETAS EN DOS DIRECCIONES</b>					
			<b>Ubicación del daño en la losa</b>		
<b>Nombre de puente</b>	<b>Provincia</b>	<b>Grado de daño</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Borde</b>
Río Grande de Tárcoles	Alajuela	4	✓	-	-
Río Tiribí B.	Cartago	4	✓	-	-
Quebrada Plata	Alajuela	5	✓	-	-
Quebrada Piñuela	Guanacaste	4	✓	-	-
Quebrada San Pedro	Guanacaste	4	✓	-	-
Estero Mata Limón	Puntarenas	4	✓	-	-
Río Hondo	Limón	3	✓	-	-
Quebrada Poza Azul	Puntarenas	3	-	✓	-
Río San Rafael	Alajuela	4	✓	-	-
Río Cocles	Limón	3	-	✓	-
P.S.S.R.N. 1	San José	5	✓	-	-

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

<b>CUADRO 6. GRADO DE DAÑO POR GRIETAS EN DOS DIRECCIONES</b>		
<b>Grado de daño</b>	<b>Cantidad de losas</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
No se observan grietas. (Grado 1)	0	0,00
No aplica (Grado 2)	0	0,00
Ancho de grieta es menor a 0.2 mm con intervalos mayores a 50cm (Grado 3)	3	27,27
Ancho de grieta es mayor a 0.2 mm con intervalos menores a 50cm (Grado 4)	6	54,55
Ancho de grieta es mayor a 0.2 mm y el concreto se está descascarando. (Grado 5)	2	18,18

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 60. UBICACIÓN DE GRIETAS EN DOS DIRECCIONES**



Fuente: Realización propia con datos del cuadro 5. Elaborado con Microsoft Office Excel

**CUADRO 7. GRADO Y UBICACIÓN DEL DAÑO POR DESCASCARAMIENTO**

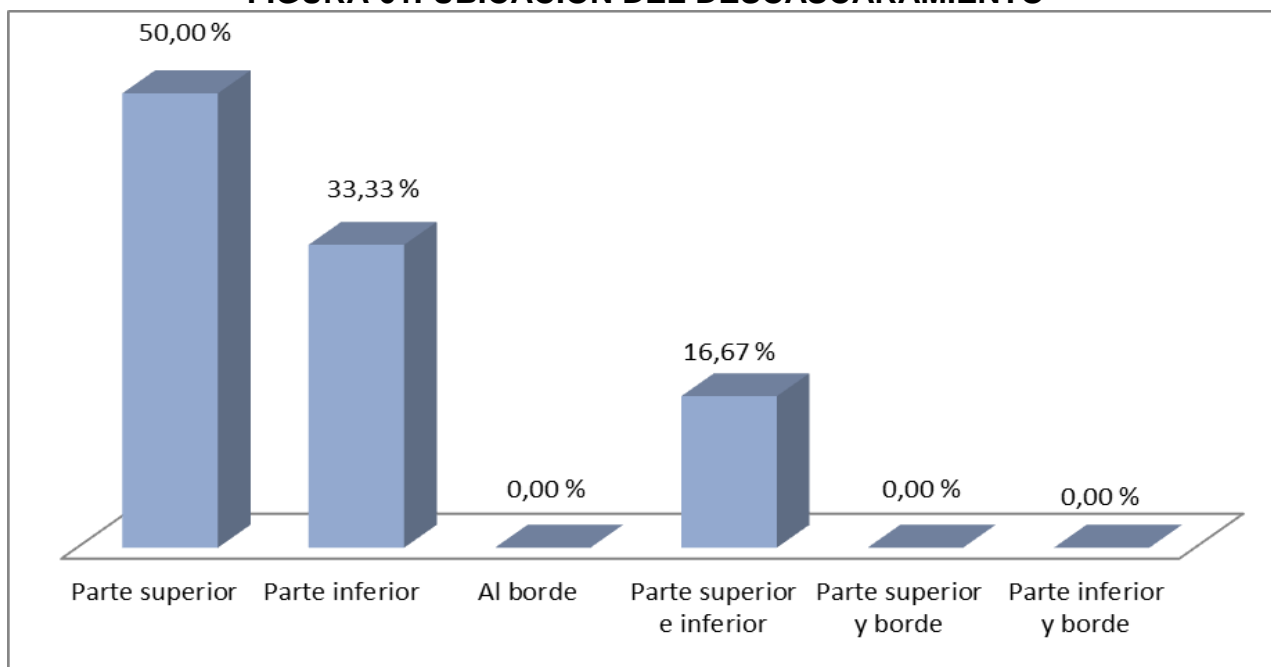
			Ubicación del daño en la losa		
Nombre de puente	Provincia	Grado de daño	Superior	Inferior	Borde
Río Grande de Tárcoles	Alajuela	2	✓	✓	-
Quebrada el Ceibo	Puntarenas	2	-	✓	-
Quebrada Plata	Alajuela	4	✓	-	-
Río Chiz	Guanacaste	3	-	✓	-
Quebrada San Pedro	Guanacaste	3	✓	-	-
Estero Mata Limón	Puntarenas	4	✓	✓	-
Río Hondo	Limón	2	✓	-	-
Quebrada Poza Azul	Puntarenas	2	-	✓	-
Río San Rafael	Alajuela	2	✓	-	-
Río Hone	Limón	2	✓	-	-
P.S.S.R.N. 1	San José	2	✓	-	-
Río María Aguilar A	San José	2	-	✓	-

Fuente: Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

<b>CUADRO 8. GRADO DE DAÑO POR DESCASCARAMIENTO</b>		
<b>Grado de daño</b>	<b>Cantidad de losas</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
No se observa descascaramiento. (Grado 1)	0	0,00
Se observa el principio del descascaramiento. (Grado2)	8	66,67
Ha crecido el descascaramiento en algunas partes de la superficie de la estructura. (Grado 3)	2	16,67
Se observa un considerable descascaramiento (Grado 4)	2	16,67
Se observa un considerable descascaramiento y oxidación. (Grado 5)	0	0,00

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 61. UBICACIÓN DEL DESCASCARAMIENTO**



**Fuente:** Realización propia con datos del cuadro 7. Elaborado con Microsoft Office Excel.

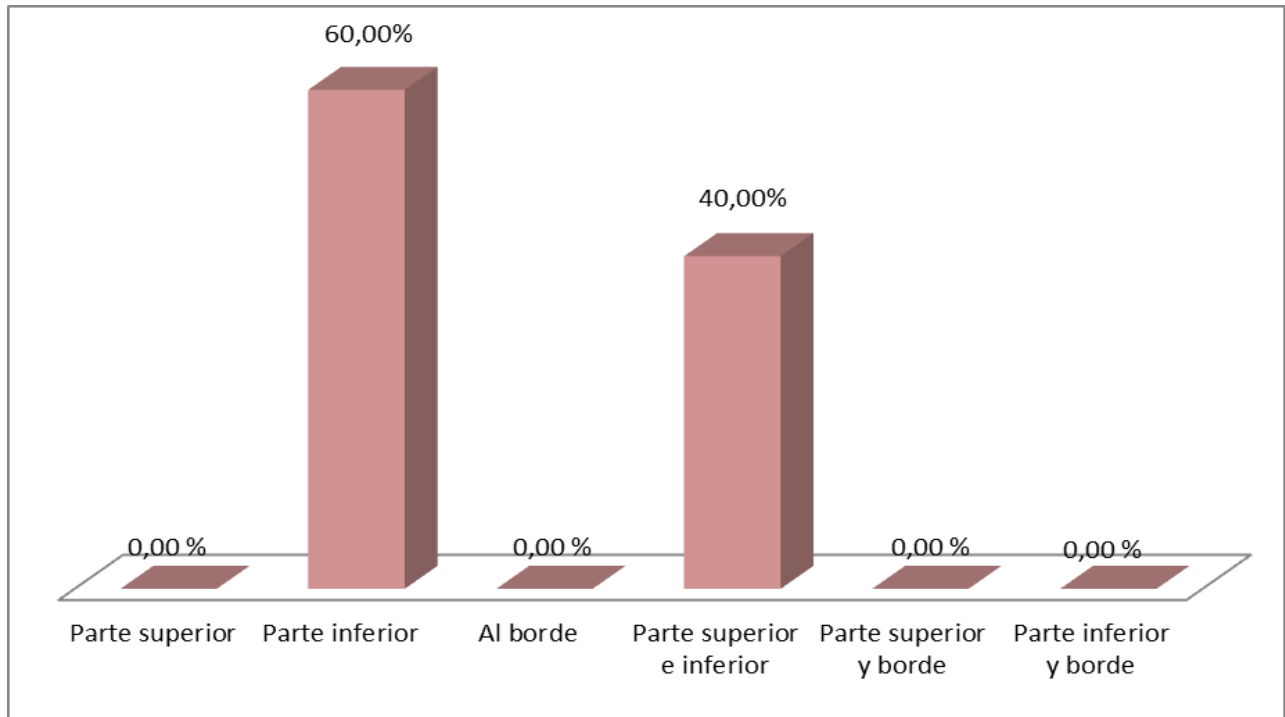
<b>CUADRO 9. GRADO Y UBICACIÓN DEL DAÑO POR ACERO DE REFUERZO EXPUESTO</b>					
			<b>Ubicación del daño en la losa</b>		
<b>Nombre de puente</b>	<b>Provincia</b>	<b>Grado de daño</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Borde</b>
Quebrada el Ceibo	Puntarenas	3	-	✓	-
Río Cuajiniquil	Alajuela	3	-	✓	-
Quebrada Plata	Alajuela	3	✓	✓	-
Quebrada Piñuela	Guanacaste	3	-	✓	-
Estero Mata Limón	Puntarenas	4	✓	✓	-

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

<b>CUADRO 10. GRADO DE DAÑO POR ACERO DE REFUERZO EXPUESTO</b>		
<b>Grado de daño</b>	<b>Cantidad de losas</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Descascaramiento en la superficie del concreto (Grado 1)	0	0,00
Se observan cáscaras a lo largo del refuerzo principal (Grado2)	0	0,00
El refuerzo está expuesto en pequeñas partes (Grado3)	4	80,00
Se observa el refuerzo principal expuesto y oxidado (Grado 4)	1	20,00
Se observa el acero principal expuesto y con reducción de la sección (Grado 5)	0	0,00

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 62. UBICACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EXPUESTO**



**Fuente:** Realización propia con datos del cuadro 9. Elaborado con Microsoft Office Excel.

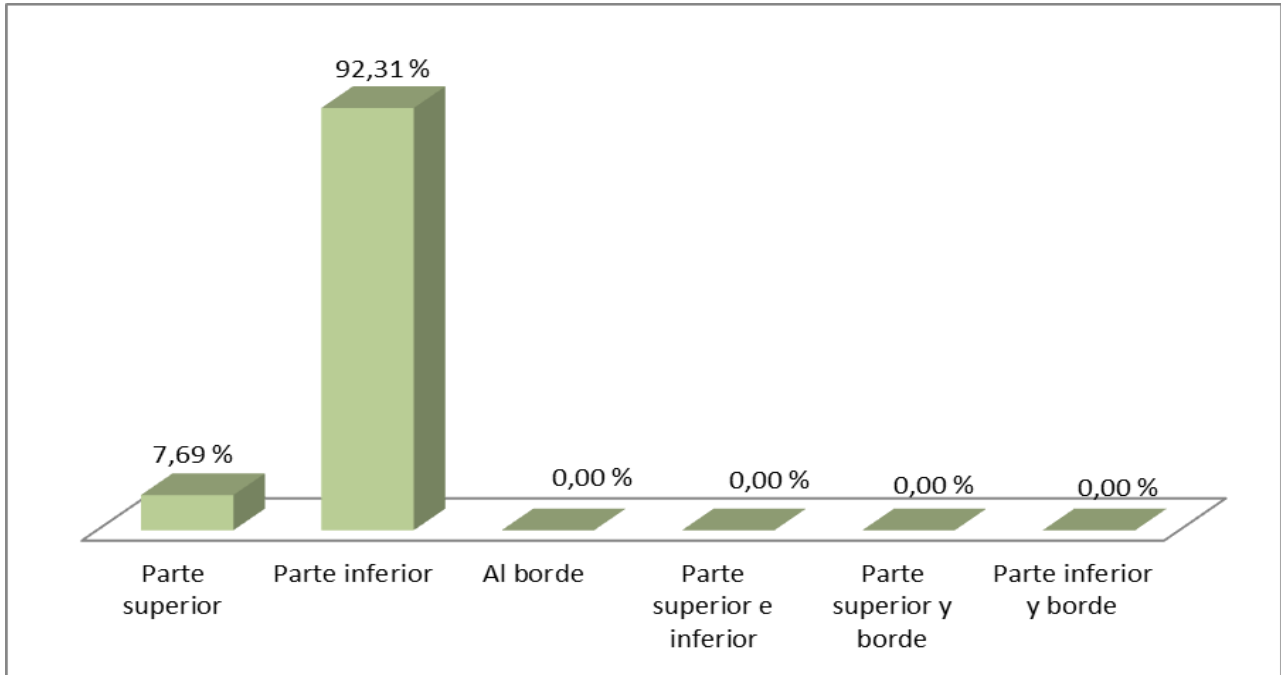
<b>CUADRO 11. GRADO Y UBICACIÓN DEL DAÑO DEBIDO A EFLORESCENCIA</b>					
			<b>Ubicación del daño en la losa</b>		
<b>Nombre de puente</b>	<b>Provincia</b>	<b>Grado de daño</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Borde</b>
Río Grande de Tárcoles	Alajuela	3	-	✓	-
Quebrada el Ceibo	Puntarenas	2	-	✓	-
Río Tiribí B.	Cartago	2	-	✓	-
Río Convento	Puntarenas	2	-	✓	-
Río Cuajiniquil	Alajuela	2	-	✓	-
Quebrada Plata	Alajuela	3	-	✓	-
Río Aguazarcas	Alajuela	5	-	✓	-
Río San Carlos	Alajuela	3	-	✓	-
Canal de Riego	Guanacaste	2	✓	-	-
Río Zapote	Alajuela	2	-	✓	-
Río Chiz	Cartago	2	-	✓	-
Quebrada Piñuela	Guanacaste	3	✓	-	-
Río San Pedro	Puntarenas	2	-	✓	-
Quebrada San Pedro	Guanacaste	2	-	✓	-
Estero Mata Limón	Puntarenas	2	-	✓	-
Río Hondo	Limón	2	-	✓	-
Quebrada Seca	Puntarenas	3	-	✓	-
Quebrada sin nombre	Puntarenas	2	-	✓	-
Quebrada Poza Azul	Puntarenas	2	-	-	-
Río San Rafael	Alajuela	2	-	✓	-
Río Cocles	Limón	2	-	✓	-
Quebrada dos aguas	Limón	2	-	✓	-
Río Hone	Limón	2	-	✓	-
P.S.S.R.N. 177 A	San José	2	-	✓	-
P.S.S.R.N. 1	San José	2	-	✓	-
Río María Aguilar A	San José	2	-	✓	-

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

<b>CUADRO 12. GRADO DE DAÑO POR EFLORESCENCIA</b>		
<b>Grado de daño</b>	<b>Cantidad de losas</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
No se observó eflorescencia (Grado 1)	0	0,00
Se observaron pequeñas manchas blancas en la superficie de concreto (Grado2)	22	84,62
Se observó eflorescencia a lo largo de la grieta en menos de la mitad del área de losa (Grado 3)	4	15,38
Se observó eflorescencia en más de la mitad del área de losa (Grado 4)	0	0,00
Se observaron estalactitas en muchos lugares causadas por el cloruro de calcio (Grado 5)	0	0,00

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 63. UBICACIÓN DE LA EFLORESCENCIA**



**Fuente:** Realización propia con datos del cuadro 11. Elaborado con Microsoft Office Excel



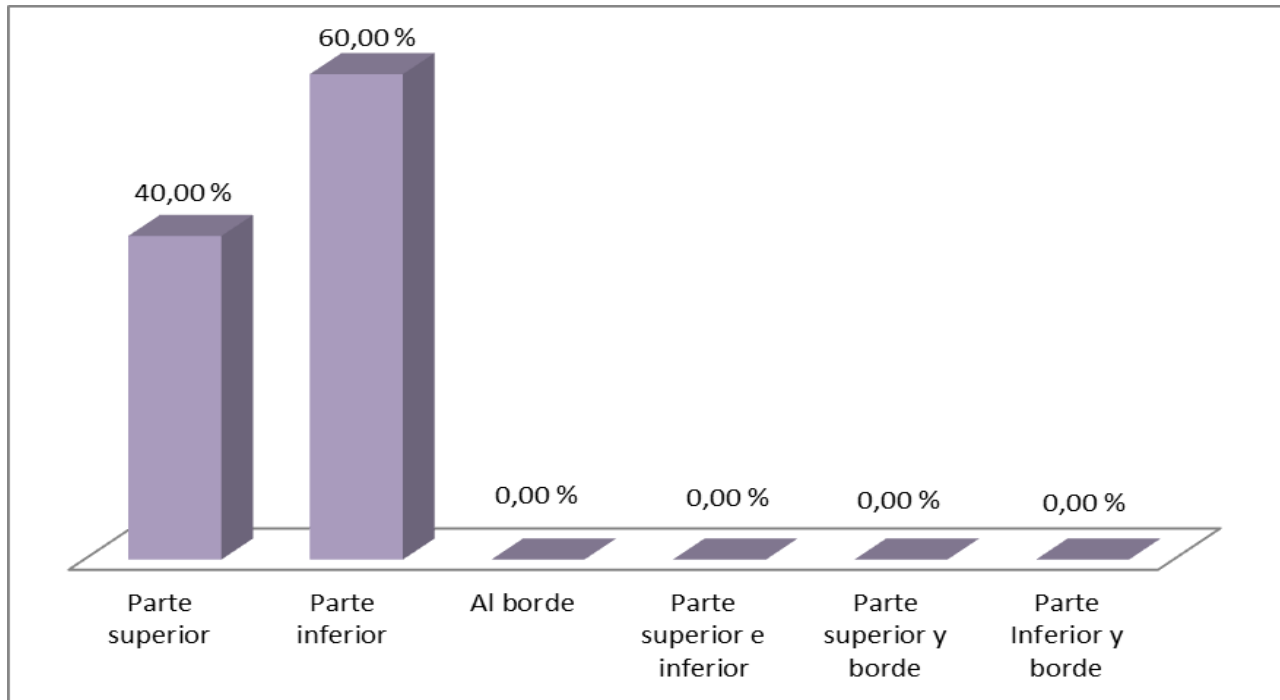
<b>CUADRO 13. GRADO Y UBICACIÓN DEL DAÑO POR NIDOS DE PIEDRA (HORMIGUEROS)</b>					
			<b>Ubicación del daño en la losa</b>		
<b>Nombre de puente</b>	<b>Provincia</b>	<b>Grado de daño</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Borde</b>
Río Cuajiniquil	Alajuela	2	-	✓	-
Estero Mata Limón	Puntarenas	2	✓	-	-
Quebrada sin nombre	Puntarenas	2	-	✓	-
Quebrada Poza Azul	Puntarenas	2	-	✓	-
Río Hone	Limón	2	✓	-	-

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

<b>CUADRO 14. GRADO DE DAÑO POR NIDOS DE PIEDRA</b>		
<b>Grado de daño</b>	<b>Cantidad de losas</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
No se observaron nidos de piedra (Grado 1)	0	0,00
Se observaron nidos de piedra en algunos sitios (Grado2)	5	100,00
Se observan más de diez nidos de piedra (Grado 3)	0	0,00
Se observan nidos de piedra en muchos sitios (Grado 4)	0	0,00
No aplica (Grado 5)	0	0,00

**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 64. UBICACIÓN DE LOS NIDOS DE PIEDRA**



Fuente: Realización propia con datos del cuadro 13. Elaborado con Microsoft Office Excel

**CUADRO 15. GRADO Y UBICACIÓN DEL DAÑO POR AGUJEROS**

			Ubicación del daño en la losa		
Nombre de puente	Provincia	Grado de daño	Superior	Inferior	Borde
P.S.S.R.N. 1	San José	3	✓	-	-

Fuente: Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**CUADRO 16. GRADO DE DAÑO POR AGUJEROS**

Grado de daño	Cantidad de losas	Porcentaje (%)
No se observaron agujeros (Grado 1)	0	0,00
Se observaron escamas en la superficie de concreto (Grado 2)	1	100,00
Se observan pequeños agujeros a lo largo del refuerzo en la losa (Grado 3)	0	0,00
Se desarrollan agujeros con más de 1.0 m3 del área bajo la losa (Grado 4)	0	0,00
Existen evidencias de que el agujero se extiende a través la losa (Grado 5)	0	0,00

Fuente: Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

## DURABILIDAD EN LAS LOSAS DE CONCRETO

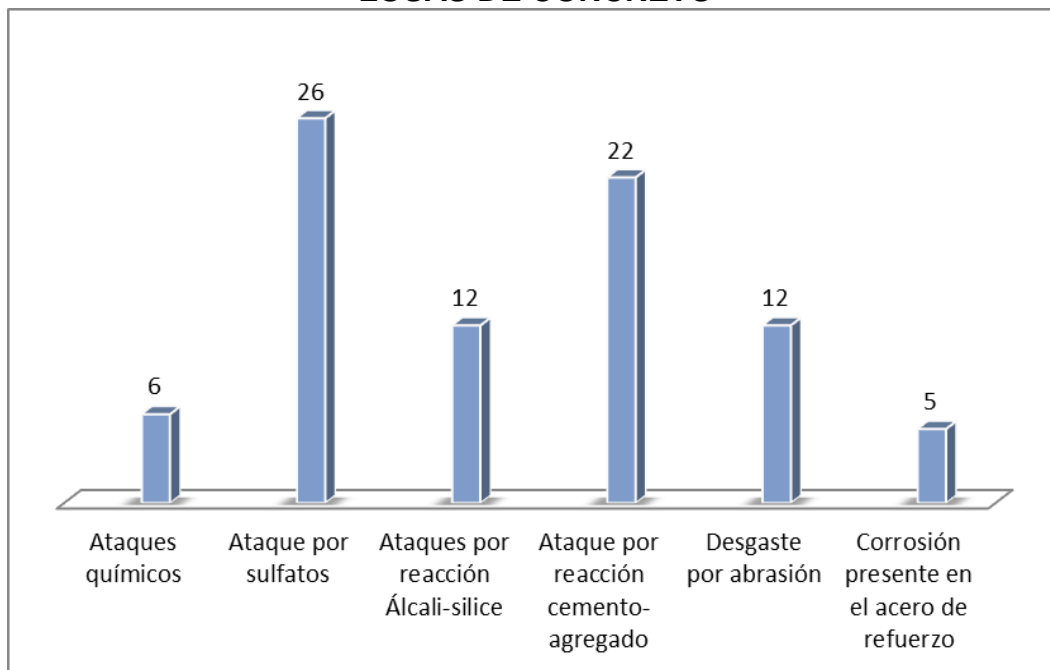
El cuadro 17 y las figuras 65 y 66 muestran las evidencias de los agentes que ocasionan problemas en la durabilidad del concreto, presentes en las losas de los puentes en estudio y la cantidad de daños manifestados en el elemento estructural de dicho material.

<b>CUADRO 17. AGENTES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD EN LAS LOSAS DE LOS PUENTES EN ESTUDIO</b>	
<b>Puentes</b>	<b>Agentes</b>
1. Río Grande de Tárcoles	Ataques por sulfatos, ataques por reacción álcali-silice y reacción cemento- agregado.
2. Quebrada el Ceibo	Ataques por reacción álcali- silice, ataque por sulfatos y corrosión.
3. Río Tiribirí B.	Ataque por sulfatos y ataques por reacción álcali-silice.
4. Río Convento	Ataque por sulfatos y ataques químicos.
5. Río Cuajiniquil	Ataque de sulfatos, reacción cemento- agregado, corrosión.
6. Quebrada Seca H.	Reacción cemento- agregado, abrasión.
7. Quebrada Plata	Reacción cemento- agregado, ataques por reacción álcali- silice, ataque por sulfatos, corrosión y abrasión
8. Río Agua Zarcas	Reacción cemento - agregado, Ataque por sulfatos y abrasión.
9. Río San Carlos	Reacción cemento - agregado, Ataque por sulfatos y abrasión
10. Canal de Riego	Ataque por sulfatos y ataques químicos.
11. Río Zapote	Reacción cemento - agregado y ataques por sulfatos.
12. Río Chiz	Reacción cemento - agregado, ataque por sulfatos y ataques por reacción álcali- sílice.
13. Paso Superior Acceso Mall Paseo Metrópoli	Reacción cemento- agregado y abrasión.
14. Quebrada Piñuela	Reacción cemento - agregado, ataque por sulfatos, corrosión y abrasión.
15. Río San Pedro	Ataque por sulfatos y abrasión.
16. Quebrada San Pedro	Reacción cemento- agregado, ataques por reacción álcali- silice, ataques por sulfatos y abrasión.

17. Río Pacacua	Reacción cemento, abrasión y ataques químicos.
18. Estero Mata Limón	Ataques químicos, sulfatos, ataques por reacción álcali-silice, reacción cemento-agregado, abrasión y corrosión.
19. Río Hondo	Reacción cemento- agregado, ataques por reacción álcali- silice, ataques por sulfatos y ataques químicos.
20. Quebrada Seca P.	Reacción cemento- agregado, ataque por sulfatos y ataques químicos.
21. Quebrada sin nombre	Reacción cemento- agregado y ataque por sulfatos.
22. Quebrada Poza Azul	Reacción cemento- agregado, ataques por reacción álcali- silice y ataque por sulfatos.
23. Río San Rafael	Reacción cemento- agregado, ataques por reacción álcali- silice y ataque por sulfatos.
24. Río Cocles	Reacción cemento- agregado y ataques por sulfatos.
25. Quebrada dos aguas	Reacción cemento- agregado y ataque por sulfatos.
26. Río Hone	Reacción cemento- agregado, ataque por reacción álcali- silice, ataque por sulfatos y abrasión.
27. P.S.S.R.N. 177 A	Ataque por sulfatos.
28. P.S.S.R.N. 1	Reacción cemento- agregado, ataque por reacción álcali- silice, ataque por sulfatos y abrasión.
29. Río María Aguilar A	Ataque por reacción álcali- silice y ataque por sulfatos.

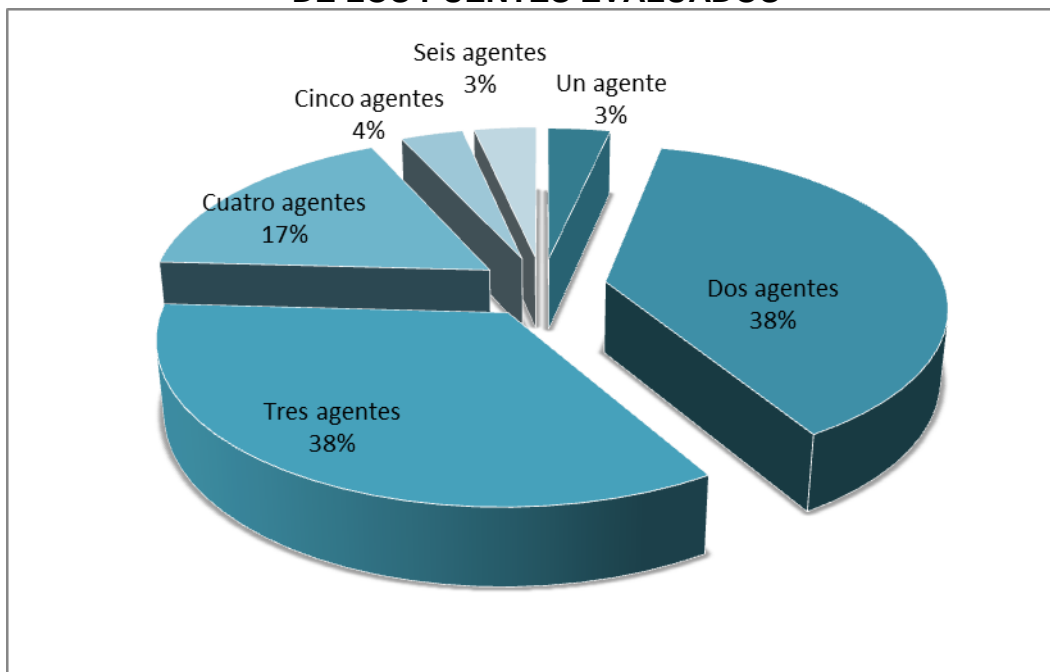
**Fuente:** Realización propia con datos de las inspecciones realizadas por PEEP. Elaborado con Microsoft Office Word.

**FIGURA 65. CANTIDAD DE PUENTES AFECTADOS POR EL DETERIORO EN LAS LOSAS DE CONCRETO**



Fuente: Realización propia con datos del cuadro 17. Elaborado con Microsoft Office Excel.

**FIGURA 66. CANTIDAD DE AGENTES QUE OCASIONAN DAÑOS EN CADA LOSA DE LOS PUENTES EVALUADOS**



Fuente: Realización propia con datos del cuadro 17. Elaborado con Microsoft Office Excel.

## Diseño por durabilidad

Se investigó acerca de la teoría de probabilidad de falla y los métodos integrales de diseño como opciones para el diseño por durabilidad. Estos se presentan en los siguientes párrafos.

Teoría de probabilidad de falla: El evento de falla involucra una variable de cargas externas, S, y una variable de resistencia del material, R. El evento falla podría expresarse de la siguiente manera<sup>1</sup>:

$$\{\text{Falla}\} = \{S < R\} \quad (1)$$

La falla ocurrirá si la resistencia del concreto o de la estructura es menor que las cargas externas. Tanto S como R, pueden ser cantidades que varían con el tiempo. Por lo tanto, la probabilidad de falla varía con el tiempo. Usualmente S y R no se consideran valores instantáneos en el tiempo; se tratan más como funciones probabilísticas que dependen del tiempo, por lo que la probabilidad de falla se expresa como<sup>2</sup>:

$$P_f(t) = P \{S(t) < R(t)\} \quad (2)$$

Las funciones R(t), S(t) y P<sub>f</sub>(t) tienen la propiedad de ser funciones de distribución probabilística.

Métodos integrales de diseño (durabilidad + cargas): Existen tres métodos diferentes para el diseño integral por durabilidad:<sup>3</sup>

1. El método determinístico: S(t), R(t) y la vida útil son consideradas como cantidades únicas, estimadas directamente de fórmulas analíticas o empíricas previamente calculadas.
2. El método estocástico: S(t), R(t) y la vida útil son consideradas funciones de distribución probabilísticas.
3. El método de factores de seguridad: Se basa en el principio de seguridad y confiabilidad; el procedimiento sigue la metodología de un proceso determinístico.

<sup>1</sup> Durability design of concrete structures, 1996.

<sup>2</sup> Durability design of concrete structures, 1996.

<sup>3</sup> Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad, 2001.

$$T_D = \lambda_T * T_{vu} \quad (3)$$

T<sub>D</sub>: Periodo de durabilidad.

T<sub>vu</sub>: Periodo de la vida útil de la estructura.

λ<sub>T</sub>: Factor de seguridad.

## Modelos de durabilidad

Se han propuesto varios modelos, estos relacionan la degradación por corrosión del acero de refuerzo en concreto, en función del tiempo; algunos son:

1. El modelo de Tuutti: Diferencia dos etapas de la corrosión: T1 y T2 (periodos de iniciación y propagación), donde T1 es el lapso que tarda el ion cloruro en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación. En tanto T2 se refiere al periodo entre la pérdida de protección de la película pasiva y la manifestación interna de los daños por corrosión (manchas de óxido, agrietamientos o desprendimientos de la cobertura de concreto.)<sup>4</sup> Donde:

$$T_{vu} = T1 + T2 \quad (4)$$

T<sub>vu</sub>: Periodo de la vida útil de la estructura.

2. Los modelos de Bazant<sup>5</sup> y Browne<sup>6</sup>: Similares al propuesto por Tuutti, dividen las dos etapas T1 y T2; especifican que T2 finaliza al encontrarse daños visibles en la estructura o elemento estructural.
3. El modelo de Beeby: Basado en el modelo propuesto por Tuutti, especifica que T2 finaliza hasta que se haya alcanzado un nivel inaceptable en la corrosión; quiere decir que el elemento puede estar más allá de su vida útil y encontrarse en la etapa de su vida residual.<sup>7</sup>

<sup>4</sup> Corrosion of steel in concrete, 1982.

<sup>5</sup> Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - theory, 1979.

<sup>6</sup> Mechanism of corrosion of steel in concrete in relation to design, inspection and repair of offshore and coastal structures, 1980.

<sup>7</sup> Cracking, cover, and corrosion of reinforcement, 1983.

# METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL

Las siguientes son metodologías que se pueden implementar para obtención del cálculo de la vida útil.

## 1. Método analítico para predecir la vida útil

Debido a la falta de un mecanismo de evolución razonable de la vida útil, se propone un método de fiabilidad a base de la teoría de evaluar la vida útil de los puentes antiguos y así conducir a su rehabilitación y reconstrucción.

Para dicho caso, se utiliza el método Monte Carlo, que es una simulación numérica para resolver problemas prácticos de ingeniería relacionados con variables aleatorias; se utiliza un módulo del programa ANSYS para determinar el esfuerzo y la deformación del elemento, sin embargo, se podría utilizar cualquier otro programa a conveniencia del diseñador.

En la fiabilidad de cálculos de puentes, es tomado relativamente como un método preciso<sup>1</sup>. El análisis que presenta este método fue realizado en puentes de concreto armado de uso universal.

### Propuesta del modelo estructural del puente

Modelo de resistencia del concreto según la variación del tiempo (Zou,1998): La media y la desviación estándar en función de  $t$  pueden ser tomadas como un punto de tiempo arbitrario:

$$\mu_f(t) = 1.3998 \mu_{f0} e^{[-0.0195(\ln(t+0.0892) - 1.7322)^2]} \quad (5)$$

$$\sigma_f(t) = \sigma_{f0} [0.318(t+0.03742) + 0.9881] \quad (6)$$

Donde:

$\mu_{f0}$ : La media de la resistencia a la compresión del concreto en 28 días.

$\sigma_{f0}$ : La desviación estándar de la resistencia a la compresión del concreto en 28 días.

<sup>1</sup> An analytical method for predicting the service life of bridge structure, 2009.

Modelo de resistencia del refuerzo según la variación del tiempo (Zou,1998): Este modelo se puede expresar como:

$$f_{sk} = f_{yk} (0.986 - 1.1992 \eta_s) \quad (7)$$

Donde:

$f_{sk}$ : Valor característico del límite elástico nominal del refuerzo corroído.

$f_{yk}$ : Valor característico del límite elástico, se toma como 320 MPa en este documento.

$\eta_s$ : Corrosión del área de la sección transversal del refuerzo. (Relación entre el área de la sección transversal corroída y la sección original).

Modelo para el cambio en el área de la sección transversal del refuerzo (Jin and Zhao 2002): Después de  $t$  años de uso, la media y la desviación estándar del área de la sección transversal de una barra de refuerzo pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$\mu_{As}(t) = \lambda(t) \mu_o \quad (8)$$

$$\sigma_{As}(t) = \eta(t) \sigma_o \quad (9)$$

$$\lambda(t) = c_1 + c_2(t - 52.5) + c_3(t - 52.5)^2 + c_4(t - 52.5)^3 \quad (10)$$

$$\eta(t) = d_1 + d_2(t - 52.5) + d_3(t - 52.5)^2 + d_4(t - 52.5)^3 \quad (11)$$

En donde:

$\mu_o$  y  $\sigma_o$  son la media y la desviación estándar del área de la sección transversal inicial del refuerzo.

Las letras  $c$  y  $d$ , representan la variación en el tiempo de los parámetros según el programa utilizado.

### Criterios para la vida útil

Criterio de esfuerzo: Se obtiene un valor característico de la resistencia del concreto en la siguiente figura:

Types of strength		Symbol	Concrete grade						
			15	20	25	30	40	50	60
Characteristic value	Axial compressive	$R_c$	10.5	14.0	17.5	21.0	28.0	35.0	42.0
	Tensile	$R_t$	1.3	1.60	1.90	2.10	2.60	3.00	3.40

Valor característico del esfuerzo del concreto en MPa.  
Fuente: An analytical method for predicting the service life of bridge structure

**Criterio de deformación:** La deflexión del centro del vano del puente debe ser menor o igual a  $L/600$ , donde L es la longitud del puente.

**Criterio de probabilidad de falla:** La confiabilidad de los criterios de evaluación se basa generalmente en los índices fiables, tomando como criterio de falla estructural:

$$\beta_t < 0.85 \beta_o \quad (12)$$

Los índices de fiabilidad con periodo de referencia de diseño de 100 años, se muestran en la figura:

Structure class	First class		Second class		Third class	
	Ductile	Brittle	Ductile	Brittle	Ductile	Brittle
Combination action effect	failure	failure	failure	failure	failure	failure
Primary combination	4.7	5.2	4.2	4.7	3.7	4.2
Additional combination	4.2	4.7	3.7	4.2	3.2	3.7

Índices de fiabilidad de los elementos estructurales de carretera y Puente. ( $\beta_o$ )  
Fuente: An analytical method for predicting the service life of bridge structure

## 2. Variabilidad espacial

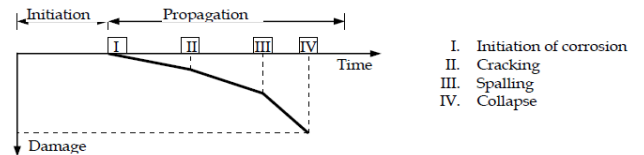
En este procedimiento se trata de demostrar la predicción de la vida útil de un elemento de un puente de concreto, que se deteriora debido a la corrosión iniciada por cloruro, incluyendo la variabilidad espacial, donde los resultados pueden considerarse como una mejor simulación de la realidad. La variabilidad espacial<sup>1</sup> incluye la variación espacial sistemática (variación del valor medio y desviación estándar) y la variación espacial aleatoria.

### Modelos de vida útil

<sup>1</sup> Service life prediction and repair of concrete structures with spatial variability, 2007.

La vida útil de las estructuras de concreto se modela como un proceso de dos etapas:

- 1. Etapa de iniciación:** es un período durante el cual se produce la entrada de cloruro en el recubrimiento de hormigón hasta que, finalmente, se lleva a cabo la despasivación<sup>2</sup> y comienza la corrosión de las barras de refuerzo.
- 2. Etapa de propagación:** El periodo de propagación es donde la corrosión tiene lugar.



**Figura 67:** Principales eventos relacionados con la vida útil de las estructuras de hormigón. (I. Inicio de corrosión, II. Agrietamiento, III. Rotura-desconchamiento y IV. Colapso.)  
Fuente: Service life prediction and repair of concrete structures with spatial variability.

### Predicción de la vida útil

Según Ying (2007), el final de la vida útil se define de dos maneras:

1. Cuando 5% del área del concreto se observa desconchado o resquebrajado.
2. Cuando el 30% de la superficie del concreto presenta grietas.

### Cuantificación estadística de las variables

Se suponen campos gaussianos homogéneos. Para describir este campo, se requiere un valor para la media, un valor para la desviación estándar y una función de correlación dependiendo solamente de la distancia  $\Delta x$ . La correlación  $\rho$  entre diferentes pares de puntos a la distancia  $\Delta x$  puede describirse por la siguiente expresión, generalmente conocida:

$$\rho(\Delta x) = \rho_0 + (1 - \rho_0) \exp(-(\Delta x/d)^2) \quad (13)$$

Donde:

- $\rho_0$ : Fuente común de correlación.
- d: Escala de fluctuación. [m]

<sup>2</sup> Aumento de la velocidad de corrosión de un metal pasivo por hecho de una eliminación total o parcial de su capa de pasivación. (Real Academia de Ingeniería).



La función de estado límite para el inicio de la corrosión de las varillas de refuerzo y el contenido de cloruros en la profundidad de la cubierta en el año  $t$ , pueden modelarse mediante las siguientes ecuaciones (Duracrete, 1998):

$$g(t) = c_{Cl;Cr} - c_{Cl}(t) \quad (14)$$

$$c_{Cl}(t) = c_{Cl;s} * \operatorname{erfc} \frac{C}{\sqrt{4D_{Cl} * t}} \quad (15)$$

Donde:

$c_{Cl;s}$ : Concentración de cloruros en la superficie.

$c_{Cl}(t)$ : Concentración de cloruros a una profundidad  $c$ .

$c_{Cl;Cr}$ : Concentración crítica de cloruro.

$D_{Cl}$ : Coeficiente de difusión del cloruro.

$C$ : Profundidad del recubrimiento de la superficie a la barra de refuerzo.

El periodo de propagación es controlado por el ancho de las fisuras de corrosión inducida en el recubrimiento del concreto, por lo tanto, la función del estado límite es:

$$g(t_p) = w_{Cr,i} - w(t_p) \quad (16)$$

Donde,  $w_{Cr,i}$  es el valor crítico del ancho de la grieta ( $i = 1$  para el agrietamiento,  $i = 2$  resquebrajamiento o desconchamiento).

El ancho de la grieta real  $t_p$  (tiempo desde la iniciación) se puede estimar (Duracrete, 1998 y 1999 b):

$$w(t_p) = 0.05 + \beta [V_{corr,a} * w_t * \alpha * t_p - (a_1 + a_2 * C / \phi + a_3 * f_{t,sp})] \quad (17)$$

Donde:

$V_{corr,a}$ : Velocidad de corrosión.

$w_t$ : Fracción del tiempo donde la corrosión es activa (periodos húmedos).

$\alpha$ : Factor de picaduras.

$\phi$ : Diámetro de la barra.

$f_{t,sp}$ : Resistencia a la tracción del concreto.

$\beta$ ;  $a_1$ ;  $a_2$ ;  $a_3$ : Parámetros de ajuste.

### 3. Mecanismos de degradación

Los mecanismos de degradación más importantes están asociados con la carbonatación y ataque por cloruros en medios salinos. Se han establecido dos modelos donde se puede obtener una estimación de la vida útil,

del elemento basado en procesos de degradación, para características específicas del concreto y cubiertas de refuerzo.

- **Carbonatación:** La penetración de  $CO_2$  en los poros de concreto, tiende a moverse como un frente que procede a una velocidad controlada principalmente por el coeficiente de difusión de  $CO_2$  (Mangat y Elgarf 1991).

La evolución de la profundidad del frente de carbonatación, se puede estimar<sup>1</sup>:

$$d = k * \sqrt{t} \quad (18)$$

Donde:

$d$ : Profundidad del frente de carbonatación en mm.

$t$ : Tiempo en años.

$k$ : Constante de carbonatación, que depende del coeficiente de difusión efectivo de  $CO_2$  a través del concreto y de la concentración de  $CO_2$  en el entorno inmediato y dentro de la masa de concreto. Con base en datos experimentales, el parámetro  $k$  tiene valores de 1,0-1,5 (mm/año).

- **Ataque por cloruros:** En el caso del proceso por cloruros, coeficiente de penetración de cloruros es  $K_{cl}$ , que es función del tipo y cantidad de cemento, de la relación agua/cemento y de la clase de exposición<sup>2</sup>:

$$K_{cl} = \alpha \sqrt{12D(t)} \left[ 1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right]$$

(19)

Donde:

$\alpha$ : Factor de conversión de unidades cuyo valor es 56157.

<sup>1</sup> Concrete bridge management: From design to maintenance, 1998.

<sup>2</sup> La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto, 2012.

C<sub>th</sub>: Concentración crítica de cloruros, expresada en porcentaje del peso de cemento.

C<sub>b</sub>: Contenido de cloruros aportado por las materias primas.

C<sub>s</sub>: Concentración de cloruros sobre la superficie de concreto, expresada en porcentaje del peso de cemento.

D(t): Coeficiente de difusión efectiva de cloruros, expresada en cm<sup>2</sup>/s.

Según Muñoz (2012), tanto para la carbonatación como para los cloruros, el tiempo total T<sub>L</sub> necesario para que el ataque sea significativo es:

$$T_L = t_i + t_p \quad (20)$$

Donde,

t<sub>i</sub>: Tiempo de iniciación.

t<sub>p</sub>: Tiempo de propagación.

$$t_i = \left(\frac{d}{K}\right)^2 \quad (21)$$

$$t_p = \frac{80d}{\phi V_{corr}} \quad (22) \quad (\text{ver anexo})$$

Donde:

d: Espesor del recubrimiento en mm.

K: En el proceso de carbonatación es K<sub>c</sub> y en cloruros K<sub>cl</sub>

φ: Diámetro del refuerzo, en mm.

V<sub>corr</sub>: Velocidad de corrosión, en μm/año

$$K_c = c_{env} * c_{air} * a * f_{cm}^b$$

(23) (ver anexo)

Donde:

C<sub>env</sub>: Coeficiente de ambiente.

C<sub>air</sub>: Coeficiente de aire incluido.

f<sub>cm</sub>: Resistencia media del concreto a compresión, N/mm<sup>2</sup>.

a, b : Parámetros función del tipo de conglomerante.

# Análisis de los resultados

## PROBLEMÁTICA DE LAS LOSAS DE CONCRETO

La problemática de las losas de concreto de los puentes se ve reflejada en los daños encontrados en las inspecciones realizadas por el PEEP; exponen que el 55 % de las losas se encuentran en un estado regular, mientras que el 30% se localiza en estado deficiente.

El Manual de inspecciones del MOPT 2007, establece que existen siete daños por evaluar cuando se inspeccionan las losas de los puentes. Este también muestra que las principales causas de estos daños son provocadas por diferentes factores, tales como el tráfico, la exposición a la intemperie, las contaminaciones ambientales y otras similares. No obstante, no se puede dejar de lado las deficiencias en el diseño y construcción; entre ellas, se pueden mencionar recubrimientos insuficientes, vibraciones incorrectas, remoción de formaleta antes de tiempo y mezclas de concreto inapropiadas; todas contribuyen al deterioro.

De los resultados obtenidos se revela que no solo se muestra un daño por losa, sino que se presentan más daños. El 28% de los puentes estudiados manifiestan cuatro daños por losa, seguido por el 21% que indica la presencia de dos daños; ese porcentaje se repite para las losas que solo presentan un daño. Luego, un 17% muestra tres daños, hay cinco daños en una representación de un 10% y por último, seis daños en un 3%. Se debe rescatar que ninguna de las losas presenta los siete daños mencionados por el instructivo.

El estudio mostró que el 90% de las losas presentan problemas de eflorescencia y agrietamiento en una dirección, como su principal deterioro, seguido por el descascaramiento y agrietamiento en dos direcciones. El daño que se presenta en menor cantidad en las losas de

concreto son los agujeros; después, los nidos de piedra y el acero de refuerzo expuesto.

Se logró obtener la localización del daño en las losas. Aquellos que presentan daños en la parte superior de la losa son: el agrietamiento en una dirección, el descascaramiento, el agrietamiento en dos direcciones y los agujeros. Los que afectan la parte inferior de la losa son: la eflorescencia, el acero de refuerzo expuesto y los nidos de piedra. Las afectaciones en la parte superior de la losa son debido a esfuerzos, fatigas por repetición, desgastes ocasionados por el tránsito vehicular, cambios de temperatura, entre otros. La parte inferior de la losa se ve afectada por factores como la humedad y procesos constructivos deficientes.

Por último, la condición en la que se encuentran las losas es calificada según el grado de deterioro encontrado en el elemento. Para los puentes estudiados, el grado 2 se encuentra presente en el 57% de las losas evaluadas; significa que los elementos presentan principios de deterioro o pequeños desgastes. No obstante, el 29% presenta grado 3 lo cual aumenta cada vez el riesgo de producir severas lesiones a las losas. Como lo menciona el Manual de inspecciones, esta forma de evaluar el daño va en una escala progresiva; significa que conforme aumente el grado de daño, así aumenta el deterioro en el elemento.

Los cuadros de la sección de daños en las losas de concreto, presentes en los resultados, exponen de manera detallada cada evidencia de daño encontrado, según los párrafos anteriores.

# DURABILIDAD EN LAS LOSAS DE CONCRETO

En los resultados obtenidos se logró identificar algunos de los agentes que afectan la durabilidad del material, esto debido a las evidencias de daño que presentan las losas. Se enumeran:

1. Ataque por sulfatos: Eflorescencia - losas ubicadas cerca de zonas costeras.
2. Ataque por reacción cemento-agregado: Agrietamientos importantes en las losas.
3. Abrasión: Superficie de rodamiento desgastada.
4. Ataque por reacción Álcali –Sílice: Escamas y fisuramiento en las losas de concreto.
5. Ataques químicos: Ataque por agua: Losas en contacto con el agua: agua de mar o agua de desagüe.
6. Corrosión presente en el acero de refuerzo.

En los agentes que afectan al concreto, el 90% de las losas se ven vulnerables a los ataques por sulfatos, debido a que la mayoría se encuentra en constante exposición a la humedad en el ambiente; no obstante, existe una mayor afectación en puentes cercanos a zonas marítimas por las reacciones del agua con el concreto.

Por otra parte, el 79% de los ataques por reacción cemento-agregado se vieron evidenciados en agrietamientos importantes en la losa, así como expansiones excesivas.

El ataque por álcali-sílice se ve reflejado en el 41% de las losas en la formación de escamas y aparición de pequeñas grietas. Por otra parte, el ataque por abrasión representa un 45% de las losas y se muestra por el desgaste producido en la superficie de rodamiento.

Por último, el 21% de las losas presentan daños ocasionados por ataques químicos, debido al contacto directo con el agua pura, por la ubicación de los drenajes; otros por su cercanía con los mares.

En cuanto a la corrosión del acero de refuerzo, las losas perjudicadas se aproximan a un 17%, donde se manifiesta la destrucción de la capa de concreto que recubre el acero, dejándole expuesto, lo cual da paso al fenómeno de corrosión.

La figura 66 muestra que por cada losa evaluada, existen mínimo 2 agentes que deterioran el concreto y afectan la durabilidad del

elemento. Se puede decir que no solo se debe atacar una problemática, sino que se debe luchar contra varias.

En cuanto a los métodos de diseño por durabilidad, en el método de probabilidad de falla que se observa en la ecuación 2, las cargas externas y la resistencia del material se consideran como valores instantáneos en el tiempo que se convierten en funciones probabilísticas dependientes del tiempo. Si se hace una representación esquemática se lograría ver como  $R(t)$  disminuye en el tiempo debido a una degradación paulatina del material; por otro lado,  $S(t)$  puede incrementarse con el tiempo. Según Torres (2001), cuando el tiempo tiende a cero, ambas funciones normalmente se encuentran separadas una de la otra y por lo tanto, la probabilidad de falla es muy pequeña. Conforme el tiempo transcurre las funciones tenderán a acercarse cada vez más, formando un área de traslape. Estas tienen la propiedad de ser funciones de distribución probabilística; para estimarlas se necesitaría conocer los parámetros probabilísticos a los que pertenecen, los cuales queden fuera del alcance de este trabajo. En cuanto al método integrales de diseño, el más factible es el método integral de diseño por factor de seguridad, pues sigue un proceso determinístico, mientras que los otros involucran muchos factores y parámetros. Como se nota en la ecuación 3, se utiliza un factor de seguridad como en el diseño estructural; el valor de las cargas de servicio se multiplica por factores de seguridad, los cuales consideran la variabilidad en la magnitud de dichas cargas. Igual sucede con la resistencia a los materiales, se multiplica por factores de seguridad para considerar la posible variabilidad en la calidad de fabricación de los materiales. El diseño por factor de seguridad es muy similar al diseño estructural, con la diferencia que en el diseño por durabilidad la capacidad de carga de la estructura disminuye con el tiempo.

Con respecto a los modelos de durabilidad, el que mejor aplica a los elementos en estudio es el modelo de Tuutti (1982), expresado en la ecuación 4, debido a que las losas de concreto presentan la manifestación externa de daños como manchas de óxido, agrietamientos o desprendimientos de la cobertura del concreto.

Cuando se diseña por durabilidad los agentes que perjudican el material son tomados

en cuenta para un mejor desempeño ante las condiciones de servicio y disminuciones en las reparaciones, hecho que en términos económicos disminuye costos de mantenimiento y operativos, lo cual da al elemento mayor vida útil. Se ha expresado que el costo de dar una vida útil y larga a las construcciones, requiere mayor inversión de recursos; sin embargo, un diseño que considere los riesgos del ambiente, no es más caro que el diseño que los ignora.

Taylor (2002), expone que los costos de mantenimiento y reparaciones a largo plazo son los que pueden incrementar el costo final; esto sucede cuando la construcción se inicia con escaso control de calidad. La importancia es tener una visión estadística y comprender que el verdadero ahorro de una estructura diseñada por durabilidad se verá en la operación a largo plazo. Algunas estrategias que se han tomado para lograr bajos costos de mantenimiento y obtener ahorros grandes son:<sup>1</sup>

- A. Óptima selección de materiales.
- B. Procedimientos de diseño y construcción bien planeados.
- C. Programas de mantenimiento.

Las losas de concreto en estudio no poseen antecedentes o referencias que ayuden a conocer su proceso constructivo ni los materiales que utilizaron; de estos elementos se conocen las evidencias de daño que presentan. No obstante, se puede afirmar que un adecuado mantenimiento no ha sido implementado, el tiempo se ha encargado de mostrar los procesos deletéreos que involucran la durabilidad; en algunos casos, estos se han detectado cuando ya están muy avanzados y requieren una intervención, lo cual es sinónimo de costos.

## METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA VIDA ÚTIL

Se investigaron tres metodologías que podrían contribuir al cálculo de la vida útil de las losas de los puentes de concreto, las cuales se desglosan a continuación:

---

<sup>1</sup> Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico, 2006.

### **Método analítico para predecir la vida útil:**

Este método propone tres modelos estructurales, donde evalúa: la resistencia del concreto en función del tiempo, la resistencia del refuerzo según la variación del tiempo y el cambio de la sección transversal del área del refuerzo. También expone tres criterios para la vida útil; criterio de esfuerzo, de deformación y de probabilidad de falla.

El programa que utilizó este método para la modulación de la estructura es el módulo ANSYS, determinando esfuerzo y deformación del elemento en estudio, tomando en cuenta una simulación numérica con variables aleatorias (Método Monte Carlo).

Para obtener el cálculo de la fiabilidad de la esperanza de vida del elemento en estudio, Wu, Liu y Li (2009) proponen recolectar datos de la estructura relacionados con detalles característicos del elemento (largo, ancho, espesor, grado de concreto, otros) y detalles estructurales de este (año de construcción). Basados en los criterios de la vida útil, en el criterio de esfuerzo, en la figura 65 se obtiene el valor característico del esfuerzo del concreto, según el grado de concreto y el tipo de esfuerzo. Con el criterio de deformación, se según Li (1997), se concluye que en los puentes de concreto reforzado la deflexión vertical máxima de la superestructura no deberá exceder  $L/600$ , y, para el criterio de probabilidad de falla se aplica la ecuación 12 como razón de falla estructural cuando son distribuciones normales.

### **Variabilidad espacial:**

Se hace un análisis de la vida útil de las estructuras de concreto mediante el uso de un enfoque avanzado de variabilidad espacial, que implementa la variación espacial aleatoria de las diferentes propiedades a través de la estructura.

Las estructuras de concreto están sujetas a deterioro, como la corrosión de las varillas, el agrietamiento y el desprendimiento. Para este tipo de deterioros, normalmente, la variabilidad espacial no se toma en cuenta aunque este fenómeno afecta mucho el comportamiento de las estructuras de concreto. Se ha descuidado la variación espacial al azar dentro de una estructura o un elemento y se toma toda la estructura o elemento como si estuviera totalmente correlacionada, es decir, homogénea (donde el resultado en un punto se mantiene para todo el elemento). Si se aplicara correctamente el

uso de la variabilidad espacial, se repararía o sustituiría únicamente el elemento afectado.

En este método la vida útil se basa en dos etapas establecidas por el proceso de corrosión: la iniciación y la propagación. La iniciación de la corrosión de la barra de refuerzo no representa necesariamente un estado indeseable, pero sin iniciación, la probabilidad de estos fenómenos negativos está ausente. Esta es la razón por la cual en muchos enfoques de vida de servicio, la iniciación se toma como un indicador de la necesidad de llevar a cabo el mantenimiento; por lo general, el mantenimiento preventivo es suficiente para asegurar todos los niveles requeridos de rendimiento.

Para la cuantificación estadística los parámetros determinista y estocástico están presentes en los modelos de los periodos de iniciación y propagación. Según los estudios realizados por Rooij y Pólder (2002), el coeficiente de difusión, la concentración de cloruro en la superficie (presentes en la fase de iniciación), la tasa media de corrosión y la fracción del tiempo donde la corrosión es activa (presentes en la fase de propagación), son variables importantes que manifiestan la variación espacial, tal como se expone en las ecuaciones 14, 15 y 17.

### **Mecanismos de degradación:**

Las causas de la degradación estructural se pueden encontrar en el mal diseño por durabilidad, la falta de control de calidad durante la construcción, el aumento de los niveles de contaminación y, lo que es más importante, la ausencia de inspección regular y acciones de mantenimiento. Debido a esos inconvenientes, se han creado los sistemas de gestión de puentes; estos pueden utilizarse para obtener vidas de servicio más largas y reducir los costos de mantenimiento si el sistema de gestión se implementa durante la fase de diseño y continúa durante las etapas de construcción y servicio.

La duración de la vida útil se definirá por deterioro físico u obsolescencia funcional del puente, si no se presentan problemas importantes de degradación estructural. La vida útil termina cuando los beneficios obtenidos de la operación son superados por los costos funcionales de construcción y de inspección o mantenimiento. Según Mangat y Elgarf (1991), el estudio de la vida útil debe realizarse en términos

de modelos de deterioro físico, basados en las condiciones ambientales locales, la experiencia y los estados límite adoptados para el diseño. En la actualidad, estos modelos se han desarrollado principalmente para la carbonatación y la predicción de penetración de cloruro.

La carbonatación del concreto es causada por la reacción de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de los productos de hidratación del cemento en presencia de agua. El resultado principal es una pérdida de alcalinidad en la superficie del concreto, lo cual genera que los valores de pH se aproximen a la neutralidad. A partir de la ecuación 18 se logra obtener la profundidad del frente de carbonación.

El ataque por cloruros es el deterioro más común producido en el concreto reforzado; este no es provocado por el ataque químico del concreto sino por el acero de la armadura que lo conforma. En determinadas ocasiones, como en ambientes marinos, los cloruros pueden penetrar en el concreto hasta la armadura, con la presencia del oxígeno y la suficiente cantidad de iones cloruros disueltos en el agua de los poros del concreto se da la oxidación del acero. En estas circunstancias se pueden producir roturas y puntos débiles en la superficie del acero.

El tiempo de iniciación, ecuación 21, expone un coeficiente K, el cual va a variar el mecanismo de degradación que dicha estructura presente, tal y como se figura en la ecuación 19 y la 23. El tiempo de propagación, ecuación 22, se considera concluido cuando se produce una pérdida de sección del refuerzo inadmisibles o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de concreto, por tanto, sus variables incluyen espesor del recubrimiento, diámetro del refuerzo y velocidad de corrosión.

# Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados presentados sobre los 29 puentes se basan en la información de las inspecciones realizadas por el PEEP. Se muestra que las losas de concreto presentan daños de regulares a severos; en un 28% (la mayoría) hay manifestaciones de cuatro daños visibles en cada una. El 90% de las losas presentan eflorescencia y agrietamientos en una dirección como su principal deterioro, lo cual indica que el primordial problema es la humedad y los esfuerzos, debido a cargas vivas y muertas.

Se logró identificar la localización de los daños en las losas; en su parte superior se observan agrietamientos en una y dos direcciones, descascaramiento y agujeros, ocasionados por fatiga, desgaste y cambios de temperatura. En la parte inferior de las losas se encontró eflorescencia, nidos de piedra y exposición del acero de refuerzo, causados por humedad y procesos constructivos deficientes. No obstante, según el grado de deterioro establecido en el Manual de inspecciones de puentes, se logró obtener, como mayoría, que el 57% de las losas evaluadas presentan grado 2, lo cual es considerado como una condición buena.

El diseño por durabilidad se podría implementar como un paso más a la hora de diseñar la estructura de un puente, dado que las cargas externas y la resistencia del material se considerarían como valores instantáneos en el tiempo y ello las convierte en funciones de probabilidad que obedecen al tiempo, para así extender la vida útil del elemento.

El diseñar por durabilidad a largo plazo tiende a ser más factible económicamente, pues al identificar los agentes que perjudican la durabilidad del material, son tomados en cuenta para mejorar el desempeño de las condiciones de servicio y eso disminuye costos en reparaciones.

Para el diseño por durabilidad, haciendo referencia al método de diseño por integrales, se

recomienda usar el método integral de diseño por factores de seguridad, debido a su menor grado de complicación y por ser similar al diseño estructural.

El modelo de durabilidad de Tuutti resulta ser el más factible para el trabajo con las losas de concreto -en relación con los elementos estudiados- pues se presentan aspectos que caracterizan el periodo de propagación planteado por este modelo, tales como: manchas de óxido, agrietamientos y desprendimientos de la cobertura de concreto. Por lo tanto, se postula este modelo como el más acertado para el 90% de las losas estudiadas; este permite reconocer las etapas o periodos de corrosión, así mismo determinar el periodo de vida útil de los elementos de concreto.

El método analítico logra determinar la probabilidad de falla utilizando parámetros de entrada. Se logra obtener la vida útil del elemento en estudio a través de la variación de: la resistencia, área transversal, densidad del refuerzo, fuerza de tracción y compresión del concreto y el volumen de este.

El método de variabilidad espacial se enfoca en la ubicación o lugar del deterioro en la losa; destaca la importancia de tomar en cuenta la parte dañada, dividiendo en regiones el elemento en estudio; esas regiones deben dividirse en elementos más pequeños, lo cual requiere modelar: un área relativa de corrosión, agrietamiento y desprendimiento para lograr obtener el cálculo de la vida útil.

El método de mecanismos de degradación está basado en modelos de deterioros físicos producidos por condiciones ambientales locales y estados límites adoptados por el diseño, principalmente, desarrollados para la carbonatación y penetración de cloruros, donde se ataca la corrosión como causa primordial, valiéndose de los periodos de iniciación y

propagación para abordar el problema y así predecir la vida útil del elemento que se está analizando.

Los métodos investigados se exponen con el fin de ser implementados en las losas de los puentes en estudio. Sin embargo, dentro de los objetivos del trabajo no se contempló que las metodologías necesitarían datos relevantes como: detalles característicos del elemento (largo, ancho, espesor, grado de concreto, otros) y detalles estructurales de este (año de construcción, tipo de distribución), parámetros como el valor medio y la desviación estándar, un patrón de fluctuación en el tiempo y un patrón de fluctuación en el espacio, entre otros. Esta información no se posee, debido a la escasez de la base de datos de los puentes construidos en Costa Rica.

No obstante, se recomienda implementar estudios o pruebas de laboratorio destructivas o no destructivas, que localicen o brinden la información requerida para la determinación de la vida útil de las losas de concreto establecidas en las metodologías expuestas.

La gran mayoría de los daños exhibidos son producto de la falta de un programa de mantenimiento de puentes y errores constructivos tales como: insuficiente recubrimiento, problemas de consolidación del concreto, retiro prematuro de formaletas, entre otros. Por ello, se recomienda invertir en el cuidado de las estructuras existentes y una supervisión adecuada en el momento de la construcción, utilizando medidas de protección para evitar daños en las losas.

En cuanto a reparación o rehabilitación del elemento a causa de grietas, se sugiere seguir procedimientos para restablecer y aumentar la resistencia y rigidez, mejorar funcionalidad, lograr impermeabilidad, mejorar apariencia y durabilidad e impedir que se desarrolle un ambiente corrosivo; por ejemplo: la inyección de un agente adherente de alta resistencia, el uso de post tensado, algún recubrimiento o sello, entre otros.



# Apéndice

Se confeccionó un documento que resume la clasificación de los 29 puentes estudiados, donde se describe: la ruta, nombre del puente, características, evidencias de daño, posibles causas y longitud.

# Anexos

Se adjunta un documento que se considera importante para la mejor comprensión. El anexo es el siguiente:

- Datos sobre las fórmulas de la metodología de la vida útil basados en los mecanismos de degradación. (Cerna, 2010)

# Referencias

- ACI-201R-92 (1997). *American Concrete Institute*. Guide to durable concrete.
- ACI-224.1R-93 (1993). *American Concrete Institute*. Causas, evaluación y reparación de fisuras en estructuras de Hormigón
- Bazant, Z. 1979. **PHYSICAL MODEL OF STEEL CORROSION IN CONCRETE SEA STRUCTURES- THEORY**. American Society of civil Engineers.Vol.105.
- Beeby,A. 1983. **CRACKING, COVER, AND CORROSION OF REINFORCEMENT**. American Concrete Institute.
- Branco, F y de Brito, J. 2009. **CONCRETE BRIDGE MANAGEMENT: FROM DESIGN TO MAINTENANCE**. Practice periodical on structural design and construction. Mayo, 1998.ASCE.
- Browne, R. 1980. **MECHANISMS OF CORROSION OF STEEL IN CONCRETE IN RELATION TO DESIGN, INSPECTION, AND REPAIR OF OFFSHORE AND COASTAL STRUCTURES**. American Concrete Institute.
- Carbonatación del Hormigón. *Construpedia* (21219). Recuperado de: [http://www.construmatica.com/construpedia/Carbonataci%C3%B3n\\_del\\_Hormig%C3%B3n](http://www.construmatica.com/construpedia/Carbonataci%C3%B3n_del_Hormig%C3%B3n)
- Cerna, M; Galicia, W y Villareal, G. 2010. **VIDA ÚTIL EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL**. Investigación "prueba Antenor Orrego 2010". Escuela de ingeniería civil, Universidad privada Antenor Orrego. 86p.
- Daniotti, B. 2003. *Durability evaluation and control to prevent building pathologies*. **2º Simposio internacional sobre patología**. Lisboa: LNEC, 97-105.
- Del Valle, A; Torres, A; Terán, J; Pérez, J y Oidor, P. 2006. **PROTECCIÓN CATÓDICA DE CONCRETO REFORZADO USANDO ÁNODOS DE SACRIFICIO DISCRETOS**. Publicación técnica N.290
- Duracrete (1998), **Modelling of Degradation**, The European Union – Brite Euram
- Duracrete (1999b), **Statistical quantification of the variables in limit state functions**, Document BE95-1347/R9, CUR, Gouda.
- Helene, P. (1997). *Vida útil das estruturas de concreto*. **Anales IV CONPAT**. Porto Alegre. Pp. 1-30.
- Hernández, O y Mendoza, C. 2006. *Durabilidad e infraestructura: retos e impactos socioeconómicos*. **INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA**. VII. 57-70p.
- people traffic press.
- Jin, W., and Zhao, Y. (2002). **DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES**.
- Li Y; Bao W; Guo X y Xiang-Yun C. Highway. (1997). *Bridges structural reliability and the probability of limit state design*. **The people traffic Press**.
- Mangat. P. S y Elgard, M. S. (1991). **The effect of reinforcement corrosion on the performance of concrete structures**. BREU P3091 Rep. TI.4-03, 1991 Computational Safety and Reliability, Aalborg, Denmark.
- Martínez, R. 2010. *¿Por qué se deteriora una estructura de Hormigón?* **INTEREMPRESASNET**.
- MOPT. 2007. *Manual de inspección de puentes*. Dirección de puentes.
- Muñoz, F y Mendoza, C. 2012. *La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto*. **CONCRETO Y CEMENTO**,

- INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO.**  
Vol.4. De la pág. 63 a la pág, 86
- Ortega, L. 2012. **PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTIMAR LA VIDA ÚTIL DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE FACHADAS Y CUBIERTAS UTILIZADAS ACTUALMENTE EN LA EDIFICACIÓN ESPAÑOLA.** Tesis. Universidad Politécnica de Valencia. 265p.
- PEEP.2015. **Informe ejecutivo de trabajo 2015.** Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica.
- PEEP.2015. **Informe de inventario e inspección Visual de daños en Puentes de la ruta 1- 39.** Tecnológico de Costa Rica.
- Polder & Rooij (2005), *Durability of marine concrete structures – field investigations and modelling*, **HERON**, Vol. 50 (3), 133-143
- Rooij & Polder, (2002) , **Investigation of the concrete structure of the Eastern Scheldt Barrier after 20 years of exposure to marine environment**, TNO-Report 2002-CI-R2118-3 final version, Jan 2003; Appendices, Investigation of the influence of different exposure zones on concrete parts of the Eastern Scheldt Storm Surge Barrier, TNO report 2002-CIR2118-1A, July 2002
- Sarja, A y Vesikari, E. 1996. **DURABILITY DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES.** Finlandia: E & FN SPON.
- Taylor-Peter C. 2002. *Designing Concrete for Durability-A case Study.* **CONCRETE INTERNATIONAL**.pp.39-43.
- Torres, A y Martinez, M. 2001. **DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO CON CRITERIOS DE DURABILIDAD.** Publicación técnica N.181.
- Tuutti,K.1982. **CORROSION OF STEEL IN CONCRETE.** Tesis. Lund University. 473p.
- Vidaud, E. 2012. *La carbonatación en el concreto reforzado.* **CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO.** Pág 21 - 23.
- Wu,X; Lui,J y Li, Y. (2009). **AN ANALYTICAL METHOD FOR PREDICTING THE SERVICE LIFE OF BRIDGE STRUCTURES.** ASCE.
- Ying, L. 2007. *Service life prediction and repair of concrete structures with spatial variability.* **HERON**. Vol.54.
- Zou, T.1998. **STRUCTURAL REALIBILITY.** The Science Press.

# Apéndice

## Apéndice 1: Hoja de información de puentes

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2	Ruta	Nombre del Puente	Características	Evidencias de daños	Posibles causas	Longitud						
3	1	Río grande de Tárcoles	Provincia: Alajuela Longitud total: 43.76 m Ancho: 10.32 m Ruta: Primario TPD : 18785 % VP: 24.96 Fecha de diseño: 1966 Fecha de construcción: 1966 (planos) Espesor de losa : 0.17m	1. Grietas en una dirección (gr.5: parte superior y parte inferior) 2.Grietas en dos direcciones (gr.4: parte superior) 3.Descascaramiento (gr.2: parte superior e inferior) 4.Eflorescencia (gr.3: parte inferior)	Fatiga, esfuerzos carga viva. Temperatura. Humedad.	Mediano						
4	2	Quebrada el Ceibo	Provincia: Puntarenas Longitud total: 15 m Ancho: 9 m Ruta: Primario TPD : --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción:--- Espesor de losa : 0.20 m	1.Grietas en una dirección(gr.3: parte superior) 2.Descascaramiento (gr.2:parte inferior) 3. Acero de refuerzo (gr.3: parte inferior) 4.Eflorescencia (gr.2: parte inferior)	Esfuerzos. Daños en el acero refuerzo. Procesos constructivos. Humedad.	Corto						
5	2	Río Tiribí B	Provincia: Cartago Longitud total: 35 m Ancho: 10.32 m Ruta: Primario TPD : 42815 % VP: 18.37 Fecha de diseño: 1972 Fecha de construcción:--- (planos) Espesor de losa : 0.17 m	1.Grietas en una dirección (gr.4: parte superior y al borde) 2.Grietas en dos direcciones (gr.4: parte superior) 3.Eflorescencia (gr.2: parte inferior)	Fatiga. Sobresfuerzos. Humedad.	Mediano						
6	2	Río Convento	Provincia: Puntarenas Longitud total: 84 m Ancho: 8.8 m Ruta: Primario TPD : --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: 1959 Espesor de losa : 0.20 m	1. Eflorescencia (gr.2: parte inferior)	Humedad.	Largo						
7	3	Río Cuajiniquil	Provincia: Alajuela Longitud total: 12.8 m Ancho: 8.05m Ruta: Primario TPD : 1101 % VP: 20.39 Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: 1970 Espesor de losa: 0.17m	1. Grietas en una dirección (gr.3: parte inferior) 2.Acero de refuerzo (gr.3:parte inferior) 3.Nidos de piedra (gr.2:parte inferior) 4.Eflorescencia (gr.2:parte inferior)	Procesos constructivos. Humedad. Esfuerzos	Corto						
8	3	Quebrada Seca	Provincia: Heredia Longitud total: 22.1 m Ancho: 18.1m Ruta: Primario TPD : --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción:--- espesor de losa: 0.17m	1. Grietas en una dirección (gr. 3: parte superior)	Sobreesfuerzos.	Mediano						

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
9	4	Quebrada Plata		Provincia: Alajuela Longitud total: 10.45 m Ancho: 6.25 m Ruta: Primario TPD : 2582 % VP: 20.26 Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.07m		1. Grietas en una dirección (gr. 5: parte superior) 2. Grietas en dos direcciones (gr. 5: parte superior) 3. Descascaramiento (gr. 4: parte superior) 4. Eflorescencia (gr. 3: parte inferior) 5. Acero de refuerzo (gr. 3: parte superior e inferior)		Sobreesfuerzos. Fatiga. Condiciones ambientales. Temperatura. Humedad.		corto	
10	4	Río Aguazarcas		Provincia: Alajuela Longitud total: 22.5 m Ancho: 10.30 m Ruta: Primario TPD : 3323 % VP: 31.81 Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: 1978 Espesor de losa: 0.15m		1. Grietas en una dirección (gr. 5: parte superior) 2. Eflorescencia (gr. 2: parte inferior)		Desgaste, fatiga. Humedad.		Mediano	
11	4	Río San Carlos		Provincia: Alajuela Longitud total: 81.5 m Ancho: 10.30 m Ruta: Primario TPD : 2076 % VP: 25.83 Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa (3): 0.20m		1. Eflorescencia (gr. 2: parte inferior) 2. Grietas en una dirección (gr. 3: parte inferior)		Sobreesfuerzo y filtración de agua; Humedad.		Largo	
12	6	Canal de Riego		Provincia: Guanacaste Longitud total: 25.5 m Ancho: 9.10 m Ruta: Primario TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Espesor de losa: 0.20m		1. Eflorescencia (gr. 2: pocos lugares, pequeñas manchas en la superficie de la losa)		Humedad		Mediano	
13	6	Río Zapote		Provincia: Alajuela Longitud total: 74.73 m Ancho: 4.3 m Ruta: Primario TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: 1972 (planos) Espesor de losa: 0.18m		1. Eflorescencia (gr. 3: parte inferior) 2. Grietas en una dirección (gr. 3: parte superior)		Esfuerzos. Humedad.		Largo	
14	10	Río Chiz		Provincia: Cartago Longitud total: 8.4 m Ancho: 6.41 m Ruta: Primario TPD: 3862 % VP: 19.06 Fecha de diseño: --- Espesor de losa: 0.4		1. Grietas en una dirección (gr. 3: parte superior) 2. Descascaramiento (gr. 3: parte inferior) 3. Eflorescencia (gr. 2: parte inferior)		Esfuerzos. Humedad.		Corto	
15	10	Paso Superior Acceso Mall Paseo Metrópoli		Provincia: Cartago Longitud total: 19.5 m Ancho: 27.55 m Ruta: Primario TPD: 32126 % VP: 21.44 Fecha de diseño: --- Espesor de losa: ---		1. Grietas en una dirección (gr. 5: parte superior)		Esfuerzos debido a carga viva y muerta.		Mediano	

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
16	18	Quebrada Piñuela	Provincia: Guanacaste. Longitud total: 35.5 m Ancho: 10.25 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.20 m	Provincia: Guanacaste. Longitud total: 35.5 m Ancho: 10.25 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.20 m	1. Grietas en una dirección (gr.5: parte superior) 2. Grietas en dos direcciones (gr. 4: parte superior) 3. Acero de refuerzo (gr.3: parte inferior) 4. Eflorescencia (gr.2: parte superior)	Procesos constructivos. Humedad. Fatiga. Sobreesfuerzos.	mediano				
17	21	Río San Pedro	Provincia: Puntarenas Longitud total: 15.45 m Ancho: 4.25 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.20 m	Provincia: Puntarenas Longitud total: 15.45 m Ancho: 4.25 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.20 m	1. Eflorescencia (gr.2: parte inferior)	Desgaste, Humedad.	Corto				
18	21	Quebrada San Pedro	Provincia: Guanacaste Longitud total: 72 m Ancho: 4.3 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa (3): 0.15 m	Provincia: Guanacaste Longitud total: 72 m Ancho: 4.3 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa (3): 0.15 m	1. Grietas en una dirección (gr.3: parte superior) 2. Grietas en dos direcciones (gr.4: parte superior) 3. Descascamiento (gr.3: parte superior) 4. Eflorescencia (gr.2: parte inferior)	Desgaste por fricción, fatiga. Sobreesfuerzos. Temperatura. Humedad.	Largo				
19	22	Río Pacacua	Provincia: San José Longitud total: 23 m Ancho: 11.20 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: 2002 Espesor de losa: 0.15m	Provincia: San José Longitud total: 23 m Ancho: 11.20 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: 2002 Espesor de losa: 0.15m	1. Grietas en una dirección (gr.3: parte superior e inferior)	Alto tránsito vehicular, desgaste debido a la fricción entre las llantas de los carros y el concreto.	Mediano				
20	23	Estero Mata Limón	Provincia: Puntarenas Longitud total: 73.5 m Ancho: 11.4 m Ruta: Primaria TPD: 12284 % VP: 20.76 Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.25m	Provincia: Puntarenas Longitud total: 73.5 m Ancho: 11.4 m Ruta: Primaria TPD: 12284 % VP: 20.76 Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.25m	1. Grietas en una dirección (gr.3: parte superior e inferior) 2. Grietas en dos direcciones (gr.4: parte superior) 3. Descascamiento (gr.4: parte superior e inferior) 4. Acero de refuerzo (gr.4: parte superior e inferior) 5. Eflorescencia (gr.3: parte inferior) 6. Nidos de piedra (gr.2: parte superior)	Sobreesfuerzos. Fatiga. Condiciones ambientales. Cambios de temperatura. Procesos constructivos. Humedad.	Largo				
21	32	Río Hondo	Provincia: Limón Longitud total: 45.5 m Ancho: 10.3 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: 1974 Espesor de losa: 0.16m	Provincia: Limón Longitud total: 45.5 m Ancho: 10.3 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: 1974 Espesor de losa: 0.16m	1. Grietas en una dirección (gr.2: parte superior) 2. Grietas en dos direcciones (gr.3: parte superior) 3. Descascamiento (gr.2: parte superior) 4. Eflorescencia (gr.2: parte inferior)	Fatiga. Sobreesfuerzos. Humedad.	Mediano				



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
22	34	Quebrada Seca		Provincia: Puntarenas Longitud total: 12 m Ancho: 10.3 m Ruta: Primaria TPD:---- % VP:---- Fecha de diseño: ---- Fecha de construcción:--- Espesor de losa: 0.19m		1. Grietas en una dirección (gr.3: parte inferior) 2.Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Humedad. Esfuerzos.		corto	
23	34	Quebrada sin nombre		Provincia: Puntarenas Longitud total: 43 m Ancho: 10.3 m Ruta: Primaria TPD:---- % VP:---- Fecha de diseño: ---- Fecha de construcción:--- Espesor de losa: 0.20m		1.Grietas en una dirección (gr.3: parte inferior) 2.Nidos de piedra (gr.2: parte inferior) 3.Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Sobreesfuerzos. Procesos constructivos. Humedad.		Mediano	
24	34	Quebrada Poza Azul		Provincia: Puntarenas Longitud total: 59.5 m Ancho: 10.3 m Ruta: Primaria TPD:3918 % VP: 16.44 Fecha de diseño: ---- Fecha de construcción: 1982 Espesor de losa: 0.18m		1.Grietas en una dirección (gr.3: parte inferior) 2.Grietas en dos direcciones (gr.3: parte inferior) 3.Descascamiento (gr.2: parte inferior) 4.Nidos de piedras (gr.2: parte inferior) 5.Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Fatiga.Esfuerzos. Procesos constructivos. Temperatura.Humedad.		Largo	
25	35	Río San Rafael		Provincia: Alajuela Longitud total: 47.6 m Ancho: 4.9 m Ruta: Primaria TPD:5245 % VP: 19.15 Fecha de diseño: ---- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.16 m		1.Grietas en una dirección (gr.2: parte inferior) 2.Grietas en dos direcciones (gr.4: parte superior) 3.Descascamiento (gr.2: parte superior) 4.Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Fatiga. Humedad.		mediano	
26	36	Río Cocles		Provincia: Limón Longitud total: 9.4 m Ancho: 10.3 m Ruta: Primaria TPD: 1395 % VP: 29.89 Fecha de diseño: ---- Fecha de construcción: --- Espesor de losa: 0.18 m		1. Grietas en un dirección (gr.2: parte inferior) 2.Grietas en dos direcciones (gr.3: parte inferior) 3.Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Sobreesfuerzos. Fatiga.Humedad.		Corto	
27	36	Quebrada dos aguas		Provincia: Limón Longitud total: 26 m Ancho: 7.98 m Ruta: Primaria TPD: 2683 % VP: 20.27 Fecha de diseño: ---- Fecha de construcción: 1982 Espesor de losa: 0.19 m		1. Grietas en una dirección (gr.2: parte inferior) 2.Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Humedad. Sobreesfuerzo.		Mediano	

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
28	36	Río Hone		Provincia: Limón Longitud total: 76.5 m Ancho: 8.15 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Fecha de construcción: 1982 Espesor de losa (3): 0.18 m		1. Grietas en una dirección (gr.3: parte superior) 2. Descascaramiento (gr.2: parte superior) 3. Nidos de piedra (gr.2: parte superior) 4. Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Temperatura. Procesos constructivos. Humedad.		Largo	
29	39	P.S.S.R.N. 177 A		Provincia: San José Longitud total: 10.5 m Ancho: 14.09 m Ruta: Primaria TPD: 60591 % VP: 11.31 Fecha de diseño: --- Espesor de losa: 0.30 m		1. Grietas en una dirección (gr.2: parte inferior) 2. Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Humedad. Sobreesfuerzos		Corto	
30	39	P.S.S.R.N. 1		Provincia: San José Longitud total: 30.6 m Ancho: 19.16 m Ruta: Primaria TPD: --- % VP: --- Fecha de diseño: --- Espesor de losa: 0.20 m		1. Grietas en una dirección parte superior (gr.5: espesores mayores de 5mm) 2. Grietas en dos direcciones parte superior (gr.5: espesores mayores a 3mm) 3. Descascaramiento (gr.2: inicio de descascaramiento) 4. Eflorescencia (gr.2: parte inferior de la losa) 5. Agujeros (gr.3: agujeros pequeños a lo largo del refuerzo de la losa)		Alto tránsito vehicular, desgaste debido a la fricción entre las llantas de los carros y el concreto. Humedad.		Mediano	
31	39	Río María Aguilar A		Provincia: San José Longitud total: 76.3 m Ancho: 14.9 m Ruta: Primaria TPD: 84241 % VP: 10.93 Fecha de diseño: --- Espesor de losa: 0.18 m		1. Grietas en una dirección (gr.2: parte inferior) 2. Descascaramiento (gr.2: parte inferior) 3. Eflorescencia (gr.2: parte inferior)		Esfuerzos. Humedad.		Largo	

# Anexos

$$C_s \text{ (\% peso de cemento)} = C_c \text{ (\% peso del concreto)} * (2300/\text{contenido de cemento}).$$

El valor de  $C_s$  depende de las condiciones externas, especialmente de la orografía del terreno y del régimen de vientos predominantes en la zona, en el caso de ambientes próximos a la costa. Además,  $C_s$  varía con la edad del concreto, alcanzando su valor máximo a los 10 años. A falta de valores obtenidos a partir de ensayos en estructuras de concreto situadas en las proximidades, el Responsable del proyecto valorará la posibilidad de adoptar un valor de  $C_s$  de acuerdo con la tabla siguiente, en función de la clase general de exposición.

<b>Tabla 15. Concentración de cloruros en la superficie del concreto.</b>					
<b>Clase general de exposición.</b>	<b>IIIa</b>		<b>IIIb</b>	<b>IIIc</b>	<b>IV</b>
<b>Distancia respecto a la costa.</b>	Hasta 500 m	500 m – 5000 m	Cualquiera		-
<b><math>C_s</math> (% peso de concreto).</b>	0.14	0.07	0.72	0.50	0.50

El coeficiente de difusión de cloruros varía con la edad del concreto de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D(t) = D(t_0) \left( \frac{t_0}{t} \right)^n$$

Donde:

$D(t_0)$  es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad  $t_0$ ,

$D(t)$  el coeficiente a la edad  $t$ , y  $n$  es el factor de edad, que puede tomarse, a falta de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el concreto de que se trate, igual a 0,5.

Para la utilización del modelo de penetración de cloruros puede emplearse el valor de  $D(t_0)$  obtenido mediante ensayos específicos de difusión (en cuyo caso  $t_0$  sería la edad del concreto a la que se ha realizado el ensayo), o bien emplear los valores de la siguiente tabla (obtenidos para  $t_0 = 0,0767$ )

<b>Tabla 14. Coeficientes <math>D(t_0)(\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})</math>.</b>					
<b>Tipo de cemento</b>	<b>a/c=0,40</b>	<b>a/c=0,45</b>	<b>a/c=0,50</b>	<b>a/c=0,55</b>	<b>a/c=0,60</b>
<b>CEM I</b>	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
<b>CEM II/A-V</b>	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
<b>CEM III</b>	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

A falta de datos experimentales específicos para el concreto y las condiciones ambientales concretas de la obra, la velocidad de corrosión podrá obtenerse de la siguiente tabla.

**Tabla 16. Velocidad de corrosión  $V_{corr}$  según la clase general de exposición.**

Clase general de exposición			$V_{corr}$ ( $\mu\text{m/año}$ )
Normal	Humedad alta.	Ila	3
	Humedad media.	IIb	2
Marina	Aérea	IIIa	20
	Sumergida	IIIb	4
	En zona de mareas.	IIIc	50
Con cloruros de origen diferente del medio marino.		IV	20

**Tabla 13. Parámetros para el cálculo del coeficiente de carbonatación.**

Coeficiente $C_{env}$		Coeficiente $C_{air}$	
Ambiente	$C_{env}$	Aire incluido (%)	$C_{air}$
Protegido de la lluvia	1	< 4.5%	1
Expuesto a la lluvia	0,5	$\geq 4.5\%$	0,7

**Coefficientes a y b**

Conglomerante	Cementos de la Instrucción RC 03	a	b
Cemento Portland	CEM I CEM II-A CEM II-B-S CEM II-B-L CEM II-B-LL CEM II-B-M CEM/V	1800	-1,7
Cemento Portland+28% cenizas volantes.	CEM II-B-P CEM II-B-V CEM IV/A CEM IV/B	360	-1,2
Cemento Portland+9% microsílíce.	CEM II-A-O	400	-1,2
Cemento Portland+65% escorias.	CEM II/A CEM II/B	360	-1,2