

**“PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA NO DESTRUCTIVA PARA LA
INSPECCIÓN DE PUENTES DE CONCRETO REFORZADO EN SERVICIO”**

WILLIAM GONZALEZ PARRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA
2012**

**“PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA NO DESTRUCTIVA PARA LA
INSPECCIÓN DE PUENTES DE CONCRETO REFORZADO EN SERVICIO”**

WILLIAM GONZALEZ PARRA

**Trabajo de investigación, presentado como requisito de grado para optar al
título de Ingeniero Metalúrgico**

Director

Ph.D RICARDO ALFREDO CRUZ

Co-Directora

M.Sc LUZ AMPARO QUINTERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA**

2012

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por habernos permitido entrar en su comunidad universitaria.

A mi director Ph.D Ricardo Cruz por su apoyo incondicional, por su paciencia y por brindarme la confianza necesaria para el desarrollo de este proyecto.

A mi codirectora y profesora Ms.C Luz Amparo Quintero, por apoyarme y darme el conocimiento necesario para poder realizar este proyecto.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica a sus profesores y técnicos como Ambrosio, Mario, Javier y Domingo por brindarme los elementos necesarios para mi formación como profesional.

Por último a mi familia por creer en mi, por apoyarme y por su amor incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	17
1.1 ESTADO DEL ARTE	17
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. DEFECTOS Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN PUENTES DE CONCRETO	22
2.1 DEFECTOS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO.....	22
2.2 CAUSAS DE ALGUNOS DAÑOS FÍSICOS PRESENTES EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO.....	24
2.2.1 Efecto de los Ciclos de Hielo-Deshielo.....	24
2.2.2 Volcamiento.....	25
2.2.3 Fallas por Impacto.....	26
2.2.4 Vibración Excesiva	27
2.2.5 Daños Sísmicos	27
2.3 CAUSAS DE ALGUNOS DAÑOS QUÍMICOS PRESENTES EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO.....	28
2.3.1 Corrosión.....	29
2.3.2 Carbonatación	33
2.3.3 Sulfatos	34
2.3.4 Reacciones Alcalino-Sílicas	35
2.3.5 Lixiviación.....	36

2.4 CAUSAS DE ALGUNOS DAÑOS MECANICOS PRESENTES EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO.....	37
2.4.1 Tracción Axial.....	38
2.4.2 Compresión Axial	39
2.4.3 Tensión Pura	40
2.4.4 Flexión.....	41
2.4.5 Cortante.....	43
2.4.6 Flexión y Cortante	45
2.4.7 Torsión	46
2.5 METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS EN LA EVALUACION DE PUENTES.....	47
2.5.1 Clasificación de técnicas de Ensayos No Destructivos	48
3. METODOLOGÍA	52
3.1 Revisión Bibliográfica	53
3.2 Características físicas que debe tener un puente (normalización)	53
3.3 Caracterización de la defectología presente en puentes	53
3.4 Revisión de los métodos no destructivos empleados en puentes	54
3.5 Elaboración de una propuesta para la inspección no destructiva de puentes de concreto de viga y losa en servicio	54
3.6 Elaboración del informe final	54
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	55
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS PUENTES DE CONCRETO REFORZADO	55
4.2 NORMATIVA RELACIONADA CON DISEÑO, CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO DE PUENTES DE CONCRETO.	58
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA DEFECTOLOGÍA PRESENTE EN PUENTES DE CONCRETO	62

4.4 REVISIÓN DE LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS EN Puentes Y SU NORMALIZACIÓN.....	73
4.5 PROPUESTA PARA LA INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE Puentes DE CONCRETO DE VIGA Y LOSA EN SERVICIO.....	83
4.5.1 Procedimiento de Inspección	85
4.5.2 Acciones Previas.....	85
4.5.3 Acciones durante la Inspección.....	87
4.5.3.1 Pruebas No Destructivas a desarrollar después de la Inspección Visual	88
4.5.4 Acciones posteriores a la inspección.....	92
5. CONCLUSIONES	94
6. RECOMENDACIONES.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	97

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción general de los defectos volumétricos y planos.....	48
Tabla 2. Clasificación de las pruebas no destructivas de acuerdo con el tipo de defecto.....	49
Tabla 3. Pruebas no destructivas de acuerdo a la localización del defecto.....	50
Tabla 4. Documentos y normas técnicas empleadas en diseño, construcción y mantenimiento de puentes de concreto.....	58
Tabla 5. Fisuras en estructuras de concreto causas y efectos.....	64
Tabla 6. Grietas en estructuras de concreto causas y efectos.....	65
Tabla 7. Manchas y cambios de color en estructuras de concreto causas y efectos.....	66
Tabla 8a. Tipo de deformación: Deflexiones en estructuras de concreto causas y efectos.....	67
Tabla 8b. Tipo de deformación: Descascaramiento en estructuras de concreto causas y efectos.....	68
Tabla 8c. Tipo de deformación: Pandeo en estructuras de concreto causas y efectos.....	69
Tabla 9. Hormigueros y Segregaciones en estructuras de concreto causas y efectos.....	70
Tabla 10. Aplastamiento en estructuras de concreto causas y efectos.....	71
Tabla 11. Socavación en estructuras de concreto causas y efectos.....	72
Tabla 12. Características principales de algunas técnicas volumétricas para la inspección no destructiva.....	75
Tabla 13. Características principales de algunas técnicas superficiales que se utilizan en END.....	77
Tabla 14. Características principales de algunas técnicas no destructivas para estimar la resistencia del concreto y la corrosión.....	78

Tabla 15. Documentos y normas técnicas empleadas en ensayos no destructivos de puentes de concreto..... 81

Tabla 16. Equipos y herramientas que se deben utilizar para las inspecciones... 86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Daños típicos identificados en puentes de concreto reforzado.....	23
Figura 2. Esquema de Fisuras por ciclos de Hielo – Deshielo.....	25
Figura 3. Volcamiento de una aleta. (Puente Pacamí, Choco, 2006).....	25
Figura 4. Fracturamiento del concreto y pérdida de la sección por impacto de (a) un objeto, (b) una maquina retroexcavadora.....	26
Figura 5. Grietas de Flexión (a), (b) y corte (c).....	28
Figura 6. Problemas de corrosión y falla estructural. Puente el Limón (Meta).....	29
Figura 7. Esquema de las tres formas en las cuales se presenta el cloro en la estructura de concreto.....	32
Figura 8. Evidencia de manchas de óxido en la superficie del concreto. (Puente sobre el Río Quindío, 2005).....	33
Figura 9. Viga afectada por corrosión. (Puente sobre el Río Quindío, 2005).....	33
Figura 10. (a) Esquema Proceso de Carbonatación, (b) Probeta utilizada en Ensayo de Carbonatación.....	34
Figura 11. Acción de los sulfatos.....	35
Figura 12. Estructura del Puente Paulo Guerra afectada por reacción álcali-sílice	36
Figura 13. Aspecto de la superficie de un concreto lixiviado.....	37
Figura 14. Elemento de hormigón sometido a tracción axial.....	38
Figura 15. Elementos de hormigón sometido a compresión axial.....	39
Figura 16. Grieta de tensión / interrupción de adhesión.....	40
Figura 17. Grietas Longitudinales.....	41
Figura 18. Patrón de fisuramiento en vigas simplemente apoyadas.....	42
Figura 19. Ejemplos de Fisuras por flexión.....	42
Figura 20. Falla a flexión en viga transversal de puente de armadura. Puente Regional Risaralda.....	43

Figura 21. Fractura por cortante en la Pila (Puente U Shi. – Taiwan, 1999).....	44
Figura 22. Grietas de cortante.....	45
Figura 23. Cortante-Flexión.....	46
Figura 24. Patrón de Fisuración por Torsión de una viga.....	46
Figura 25. Fisuración por Torsión de una pila.....	46
Figura 26. Esquema de la Metodología para el desarrollo de la investigación.....	52
Figura 27. Componentes básicos de un puente.....	56
Figura 28. Componentes de la superestructura e infraestructura, en un puente de viga y losa.....	57
Figura 29. Tipología de la superestructura de los puentes.....	57
Figura 30. Acciones del procedimiento de inspección.....	85
Figura 31. Esquema de las acciones sugeridas durante la inspección del puente.....	87
Figura 32. Técnicas para evaluar la resistencia del concreto.....	89
Figura 33. Técnicas para evaluar presencia de corrosión y ubicación de las barras de refuerzo en el concreto.....	90
Figura 34. Técnicas para la evaluación de discontinuidades en puentes.....	91
Figura 35. Técnicas No Destructivas empleadas para evaluar elementos metálicos en puentes.....	91

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA NO DESTRUCTIVA PARA LA INSPECCIÓN DE PUENTES DE CONCRETO REFORZADO EN SERVICIO.*

AUTORES: GONZÁLEZ PARRA, William.**

PALABRAS CLAVES: puentes de concreto, defectología en puentes de concreto, ensayos no destructivos, normas astm.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta para llevar a cabo una metodología no destructiva para la inspección de puentes de concreto reforzado en servicio, para esto se hizo una descripción de los daños más comunes en dichas estructuras, así como las posibles causas de origen físico, químico y/o mecánicos. Se analizaron las técnicas no destructivas que se pueden aplicar para localizar y medir uno o varios defectos en un elemento estructural o mecánico, también se hace un análisis con el que se da una interpretación desde el punto de vista estructural o mecánico del comportamiento del material, considerando la localización y características del defecto identificado y las condiciones de carga a las que está sometido mediante los ensayos no destructivos, también se puede evaluar la resistencia del concreto y ubicar la presencia de corrosión en las barras de refuerzo, todas las técnicas pueden emplearse de modo seguro sin afectar las propiedades y características de las estructuras. Se presentan algunos de las principales documentos y normas técnicas utilizadas en el diseño, construcción, diagnostico, mantenimiento de las estructuras de concreto así como las normas estándares para aplicar las técnicas no destructivas en puentes de concreto reforzado.

* Proyecto De Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director Ms.C Ricardo Alfredo Cruz. Codirector Ms.C Luz Amparo Quintero.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT ON ULTRASONIC PULSE RATE IN THE PRESENCE OF CHLORIDE IN CONCRETE WITHOUT REINFORCEMENT.*

AUTHORS: GONZÁLEZ PARRA, William.**

KEYWORDS: concrete bridge, concrete bridge defectology, nondestructive testing, astm standards.

ABSTRACT

This work presents a proposal to carry out a nondestructive method for the inspection of reinforced concrete bridges in service; this was done for a description of the most common damages in these structures, and possible physical causes, chemical and / or mechanical. The non-destructive techniques were analyzed that can be applied to locate and measure one or more defects in the structural or mechanical, is also done an analysis which gives an interpretation from the standpoint of structural or mechanical material behavior, considering the location and characteristics of the defect identified and loading conditions to which it is submitted by non-destructive testing, also can evaluate the strength of concrete and locate the presence of corrosion in reinforcing bars, all techniques can be used safely without affecting the properties and characteristics of the structures. Are presented some of the main documents and technical standards used in the design, construction, diagnosis, maintenance of concrete structures and rules to implement the standard non-destructive techniques in reinforced concrete bridges.

*Research Work.

** Faculty of Physical Chemistry Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz. Co-director: M.Sc. Luz Amparo Quintero.

INTRODUCCIÓN

En el umbral de un nuevo siglo no se comprende cómo a pesar del desarrollo de las tecnologías constructivas y del conocimiento acerca del comportamiento de los materiales, aparezcan fallas y daños en los puentes de concreto así como en otras estructuras de este material, como si se desconociera la forma de construirlos adecuadamente. La aparición de errores en el proyecto, se pueden dar durante el diseño o en la construcción, lo cual obliga a emprender una gran cruzada de concientización, contando para ello con la colaboración de todos los profesionales vinculados al sector de la construcción.

Adicionalmente a lo anterior muchas de las estructuras de concreto existentes no llevan a cabo un mantenimiento preventivo ni de inspección de posibles daños, por lo tanto, es necesario llevar a cabo estudios que se materialicen en la inspección, actualización o rehabilitación de las estructuras existentes. Como se sabe, para llevar a cabo una rehabilitación, es indispensable realizar un estudio detallado de evaluación de daños, para proceder a plantear las opciones más convenientes.

Una alternativa preventiva que cada día toma más interés profesional es el uso de los ensayos no destructivos, debido a la necesidad de identificar y corregir oportunamente el creciente número de daños, mal funcionamiento, intervenciones normativas o deterioro por el simple paso del tiempo. Crece también el interés por conocer mayor número de métodos y técnicas que puedan emplearse de manera segura, en la inspección y detección de los daños sin afectar las propiedades y características de las estructuras.

Los métodos de inspección no destructiva en puentes de concreto reforzado en servicio tienen como principal objetivo detectar y evaluar los tipos de daños que posee, sin afectar la funcionalidad de estos y así garantizar condiciones

adecuadas de estabilidad y capacidad de comportamiento inelástico del sistema estructural.

Debido a esta problemática, se planteó la presente investigación, la cual busca revisar información sobre técnicas no destructivas que han sido desarrolladas con base en las necesidades descritas y que han dado resultados positivos en la evaluación no destructiva de los puentes o sus componentes estructurales y proporcionan una nueva opción para la inspección no destructiva.

La investigación parte de revisar el estado del arte de la evaluación de estructuras en concreto reforzado, se hace el reconocimiento de los daños presentes en estos, así como las posibles causas que lo provocan sean estos físicos, químicos o mecánicos. Finalmente se plantea una metodología no destructiva para detectar este tipo de daños, cumpliendo con las normativas nacionales e internacionales revisadas con lo cual se espera contribuir la evaluación y seguridad de los puentes de concreto.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 ESTADO DEL ARTE

Los puentes se construyen con el fin de permitir la circulación de personas, vehículos, trenes y en algunos casos atravesar causes de ríos. Se pueden clasificar de acuerdo al sistema estructural predominante en isostáticos o hiperestáticos. Entre las partes de un puente se pueden encontrar la subestructura que esta, conformada por la cimentación, estribos y las pilas, las cuales sirven de apoyo a la superestructura. La Superestructura es la parte del puente que recibe directamente la carga y su posición depende de la subestructura, pudiendo ser superior, inferior o de forma intermedia [1].

Sabiendo que los puentes hacen parte principal de las obras de infraestructura vial de un país y deben ser administrados asegurando su conservación y funcionamiento, lo cual se realiza a través de actividades de inventario, inspección (diagnóstico), capacidad de carga, mantenimiento y rehabilitación. En estas actividades se incluyen ensayos destructivos y no destructivos, sin embargo los ensayos destructivos pueden afectar de cierta forma la resistencia de los puentes, debilitando las estructuras, es por esto que se debe mejorar el uso de ensayos no destructivos para que puedan permitir la verificación de los daños presentes y sin causarle debilitamiento alguno a las estructuras.

El desarrollo de las técnicas de inspección no destructiva específicas comenzó de manera notable a partir de 1994, como consecuencia del final de la guerra fría y la liberación de la tecnología militar para aplicaciones civiles [2]. A partir de esta fecha también se inicia un diagnóstico de los principales problemas en los puentes, y de las alternativas tecnológicas que pueden desarrollarse para enfrentar estos problemas. En particular se dio prioridad a los problemas que no se resuelven con las técnicas tradicionales, o cuya ejecución se complica por la

interacción de materiales, instrumentación, acceso, tiempo de ejecución, o por el control de algunas variables durante la realización de las pruebas (tráfico, ruido ambiental).

Para el caso de los puentes, los problemas que resultan de mayor importancia son la detección y evaluación de grietas ocasionadas por fatiga en los elementos de acero, la evaluación rápida de la losa de concreto, la evaluación global de las estructuras, la evaluación del acero en el concreto pre-forzado y la incorporación del monitoreo estructural dentro de sistemas integrales de administración de puentes [2].

En Colombia el Estado ha venido trabajando desde 1983, cuando elaboró el primer proyecto relacionado con la gestión y administración de los puentes denominado "*Revisión periódica de puentes*". Posteriormente entre 1989 y 1991 el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) y la Universidad del Cauca mediante el Programa ICFES - BID realizaron a través de un convenio institucional un trabajo de "*Investigación Nacional de Puentes*", que consistió en el inventario e inspección de daños en los puentes ubicados en cada uno de los diferentes Distritos de Obras Públicas.

En 1996, mediante un convenio internacional de asistencia técnica entre el Instituto Nacional de Vías y la Dirección de Carreteras del Ministerio de Transportes de Dinamarca, se implementó el Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL). A través de este sistema el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) ha fortalecido la gestión en el tema de puentes el cual está conformado por diversos módulos como inventario, inspección principal, inspección especial, mantenimiento rutinario, capacidad de carga, etc. [3].

En Latinoamérica y en el Mundo cada país tiene su Ministerio el cual se encarga de mantener y analizar las estructuras existentes, por ejemplo en 1936 Venezuela

crea en el Ministerio de Obras Públicas, MOP, la División de Ensayos de Materiales, lo cual generó desde la década de los 50 un importante avance en dicha materia, hasta convertirse dicho País, hacia fines de la década de los 70 e inicio de los 80, en una importante referencia Latinoamericana en la ejecución de obras, por la tipología e importancia de las obras ejecutadas para entonces [4].

Por su parte el Instituto Nacional De Vías "INVIAS" en su manual para la inspección de puentes del año 2006 recopila ciertos defectos que se pueden encontrar en los puentes y dependiendo de estos se pueden definir las actividades de mantenimiento a realizar.

A partir de la información reportada, se concluye que la evaluación no destructiva proporciona el primer paso para asegurar la integridad estructural mediante la identificación de los componentes dañados que deben ser reparados o sustituidos. Como todas las técnicas de inspección tienen sus limitaciones y es posible que exista un número de grietas o defectos que no se hayan detectado; el diseño con tolerancia al daño se convierte en la segunda línea de defensa contra las fallas catastróficas incorporando configuraciones y materiales resistentes a esas grietas indetectables.

Es por esto que la tolerancia al daño se considera también como la medida o calificación del grado de protección de una estructura ante situaciones o condiciones de falla no anticipadas, que pudieran resultar catastróficas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La eficiente gestión de las actividades de mantenimiento de puentes requiere de herramientas que puedan evaluar la integridad o el estado de deterioro. Uno de los principales problemas de deterioro del concreto es que su gravedad y el alcance es difícil de evaluar. Los mecanismos de deterioro se producen por debajo de la superficie, y sus manifestaciones no son fácilmente detectables en las inspecciones visuales. En consecuencia, los organismos se ven obligados a programar, priorizar y establecer presupuestos para la reparación y el remplazo de muchas estructuras, cuyas condiciones son prácticamente desconocidas. Esto ha llevado a "sorpresas" en la estimación y ejecución de las reparaciones de estas estructuras.

Las técnicas actuales para la evaluación del estado son lentas, la mano de obra es intensiva, afectan el tráfico, y no se produce una estimación precisa de la cantidad de hormigón deteriorado. Por esto se ha venido trabajando por evaluación no destructiva (NDE), estas técnicas ofrecen la posibilidad de manera más eficiente y eficaz para evaluar el estado del puente.

Hasta la fecha, procedimientos de evaluación de medición no destructiva no han sido ampliamente adoptados principalmente por dos razones: la primera el estado de estudio del desarrollo y comprobación de las técnicas no es concluyente, y la segunda la falta de programas bien planeados y pensados para obtener el tipo de medidas básicas además de una base teórica esencial para la evaluación de propuestas técnicas no destructiva [2].

Los puentes como estructuras viales representan una gran inversión dado el alto costo que conlleva construir estas estructuras, la inspección visual es la actividad que ocupa más tiempo. Evaluar la estructura permite determinar las falencias o daños que esta pueda estar presentando así como sus posibles causas,

permitiendo al ingeniero proponer medidas de mantenimiento adecuadas y oportunas.

Por lo anterior, con el desarrollo de esta investigación se pretende continuar con el estudio de métodos no destructivos con el fin de preveer o evitar oportunamente los daños en la estructura lo cual sería de gran ayuda para no incrementar costos, ya sea en reparación o demolición de la misma y evitar daños catastróficos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Elaborar la propuesta de una metodología no destructiva para la inspección de puentes de concreto reforzado en servicio.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los daños físicos, químicos y mecánicos presentes en concreto reforzado de puentes de viga y losa bajo condiciones de servicio.
- Analizar los ensayos no destructivos y la respectiva normalización existente para la inspección de puentes de concreto en servicio.
- Hacer una propuesta de evaluación, basada en ensayos no destructivos teniendo en cuenta la defectología, del concreto reforzado de puentes bajo condiciones de servicio.

2. DEFECTOS Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN PUENTES DE CONCRETO

En este capítulo se presenta la patología más sobresaliente en los puentes de concreto y los ensayos no destructivos aplicables en su evaluación.

2.1 DEFECTOS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO

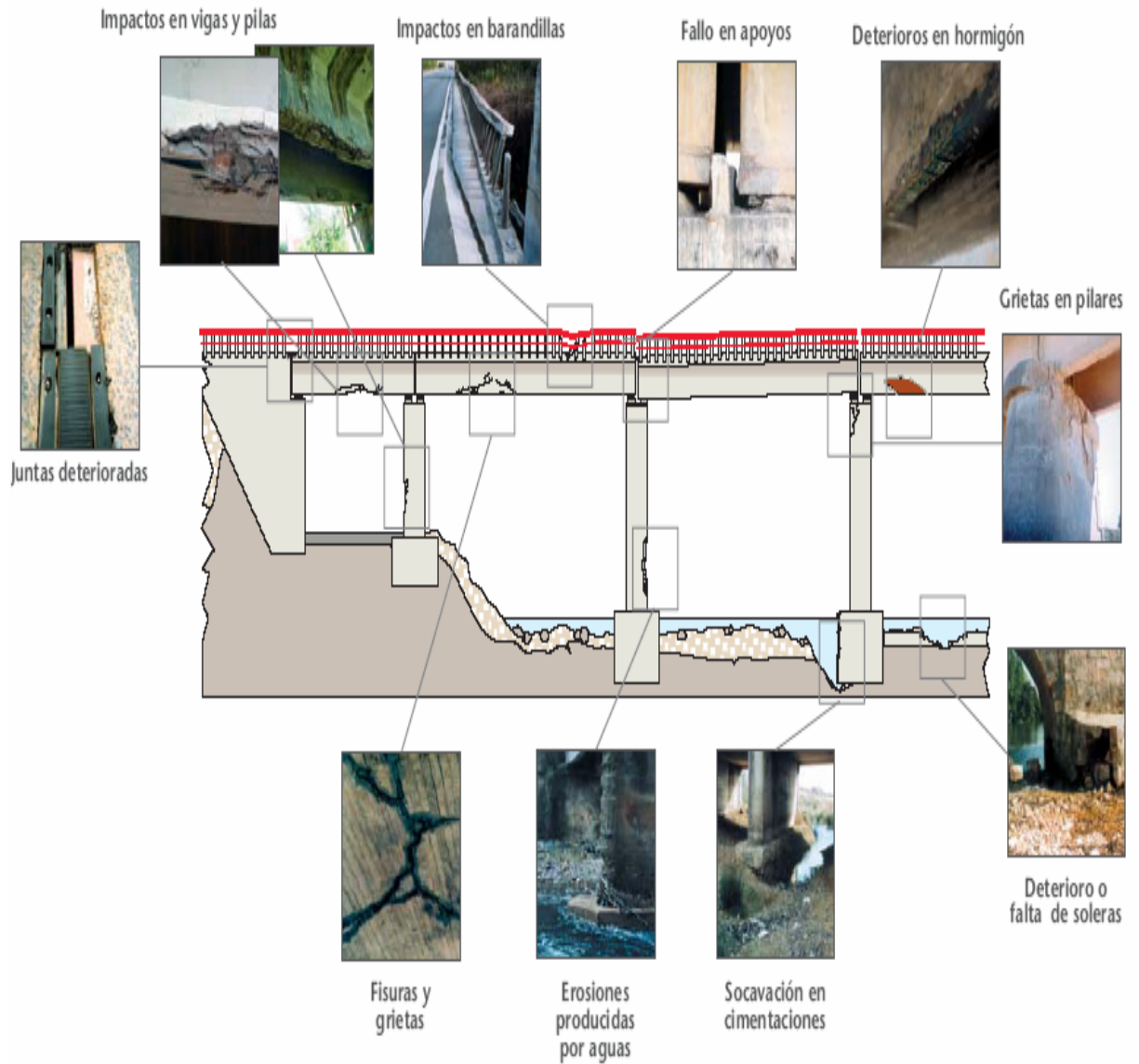
El comportamiento real de una estructura y su seguridad bajo las cargas y condiciones previstas de servicio, se fundamentan en un buen diseño, el uso de los materiales indicados y la calidad de la construcción. De acuerdo con el concepto de “Vida útil de servicio”, existe un período de tiempo para el cual la estructura se considera vigente hasta que se completa un cierto y determinado nivel aceptable de deterioro, bajo las condiciones de uso [5].

Sin embargo, en la práctica la vida útil de servicio, puede acabar antes del tiempo previsto por “abuso” de la estructura (por ejemplo, incremento de las cargas permitidas, o acción de fenómenos accidentales como impactos, explosiones, inundaciones, fuego, u otros); o por “Cambio de Uso” (por ejemplo, cambio de las cargas de servicio y/o cambio de las condiciones de exposición). Aunque hay que reconocer que las condiciones de servicio y el envejecimiento y deterioro de los materiales como el concreto, en la realidad, son impredecibles.

El concreto es un material que a pesar de tener propiedades que le dan gran resistencia y rigidez a la estructura, también con el uso continuo y la aplicación constante de cargas de toda índole y la exposición a condiciones ambientales variables involucrando cambios térmicos y de humedad, empieza a experimentar una serie de fallas ya sea por daños físicos, químicos y/o mecánicos en sus elementos estructurales más importantes. Adicionalmente el efecto de agentes biológicos y la incompatibilidad de materiales ocasionan mayores problemas

patológicos en la estructura. Algunos de estos daños típicos se pueden apreciar en la Figura 1.

Figura 1. Daños típicos identificados en puentes de concreto reforzado.



Fuente: Universidad Nacional De Colombia (UN) - Instituto Nacional De Vías (INVIAS) [6]. Pág. 28.

2.2 CAUSAS DE ALGUNOS DAÑOS FÍSICOS PRESENTES EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO

Las acciones ambientales sobre las estructuras de hormigón están relacionadas con el entorno donde se encuentra la construcción, sólido, líquido o gaseoso y de su interacción con el medio circundante. Las acciones ambientales tienen una importancia singular porque originan otros fenómenos que afectan el comportamiento, la apariencia, la durabilidad y muchas veces hasta la capacidad portante de las estructuras.

A continuación se presentan algunas causas típicas que generan daños físicos en los puentes de concreto reforzado de viga y losa, entre tales causas se encuentran las ambientales, el volcamiento, fallas por impacto, vibración excesiva, daños sísmicos.

2.2.1 Efecto de los Ciclos de Hielo-Deshielo

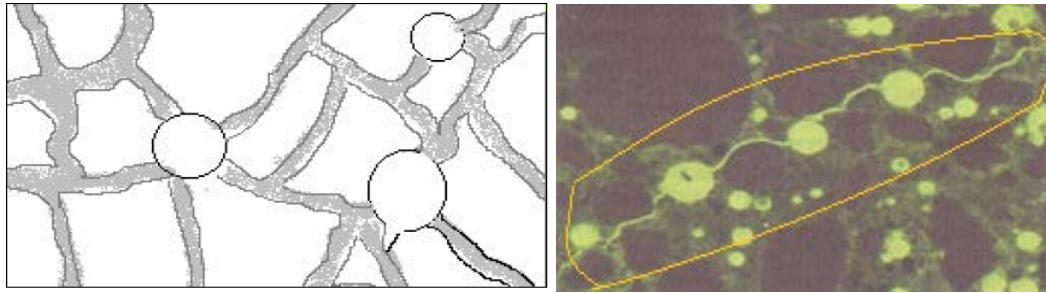
En cuanto a la acción de las bajas temperaturas sobre el concreto deben considerarse dos situaciones que pueden o no presentarse.

- Ocurren en el momento de la elaboración, colocación y compactación del hormigón y horas posteriores.
- Constituyen una condición de servicio durante la vida útil del hormigón por la repetición de ciclos de congelamiento y posterior deshielo, estando saturado el hormigón.

En ambos casos, la causa básica del deterioro puede asociarse con la expansión de volumen que sufre el agua al congelarse, pero los mecanismos de prevención del deterioro y las consecuencias del daño son diferentes.

Internamente las tensiones provocadas inducen fisuras que se propagan por la pasta (matriz), vinculando poros pero bordeando los agregados. En la Figura 2 se observa un esquema de las fisuras por ciclos de hielo-deshielo.

Figura 2. Esquema de Fisuras por ciclos de Hielo – Deshielo.



Fuente: Paulo Helene, Fernanda Pereira [7]. Pág. 57.

2.2.2 Volcamiento

Este proceso puede presentarse directamente en las estructuras por mal dimensionamiento de los elementos, por diseños inadecuados o insuficientes (cimentación – estructura), e indirectamente como consecuencia de la generalización de los daños presentes en la estructura (socavación, asentamientos diferenciales) y como resultado de eventos fortuitos no previstos tales como sismos, deslizamientos y explosiones, entre otros [6]. (Ver Figura 3).

Figura 3. Volcamiento de una aleta. (Puente Pacamí, Choco, 2006).



Fuente: Universidad Nacional De Colombia (UN) - INVIAS [6]. Pág. 33.

2.2.3 Fallas por Impacto

El impacto de un cuerpo en una estructura puede generar diversas consecuencias, dependiendo de factores tales como: la velocidad y tamaño del elemento que impacta, la resistencia y el estado del material que es impactado. Dependiendo de la magnitud del golpe se pueden provocar daños leves como fisuras y descascaramientos o fallas de consideración como propagación de grietas, pérdida de la rigidez y colapso de la estructura (Ver Figura 4 (a), (b)).

Normalmente este tipo de fallas son producidas por el impacto de vehículos en la superestructura del puente, por material que transporta el río a gran velocidad y que impacta los elementos de la subestructura del puente, o por la detonación de cargas explosivas [6].

Figura 4. Fracturamiento del concreto y pérdida de la sección por impacto de (a) un objeto, (b) una maquina retroexcavadora.



Fuente: Universidad Nacional De Colombia - INVIAS [6]. Pág. 40.



Fuente: Abdul Waheed, Ed Kowal [8]. Pág. 1.

2.2.4 Vibración Excesiva

Se refiere al movimiento que se percibe en la estructura debido a sobrecargas, fuerzas no consideradas en el diseño, falta de rigidez, y/o diseños deficientes. El efecto de la vibración excesiva en las estructuras es acumulativo, de ahí su importancia; si no se controla se produce fatiga en los diferentes elementos del puente, hasta ocasionar daños que puedan llevar al colapso. Normalmente en la práctica no es muy factible realizar estudios detallados para controlar el efecto de las vibraciones en las estructuras de concreto reforzado.

Las consecuencias de la vibración excesiva se manifiestan mediante deficiencias estructurales de acuerdo con la intensidad del mecanismo que la genera, desde microfisuras o fisuras hasta el colapso de la estructura [6].

2.2.5 Daños Sísmicos

Los sismos o terremotos son vibraciones de la corteza terrestre, generadas por fenómenos diversos, para la ingeniería estructural, los más importantes son los de origen tectónico, provocados por bruscos desplazamientos de las grandes placas de la corteza terrestre.

La energía liberada en un sismo se propaga, principalmente como ondas vibratorias, a través de la roca de la corteza y llega a la fundación de las construcciones luego de atravesar los estratos superficiales del suelo.

Estas ondas vibratorias constituyen la acción directa del sismo sobre las construcciones. Otro tipo de acciones denominadas indirectas, tienen su origen en el comportamiento del suelo y dependen del tipo y la geometría del depósito que lo conforma, estos son, los deslizamientos, los asentamientos, las avalanchas, la licuefacción del suelo [7].

En general los puentes con un adecuado diseño estructural y una ejecución cuidadosa, aún bajo sismos severos, sufren daños leves. Ellos se manifiestan como grietas verticales e inclinadas en las columnas y en las vigas, como se observa en la Figura 5.

Las grietas verticales en las vigas son causadas por el momento flexor y ocurren en la proximidad de los nudos, por ejemplo en la conexión de las columnas, y en los centros de tramo, Figura 5 (a), (b) conforme a la Figura. Las grietas inclinadas se producen por los esfuerzos de corte, Figura 5 (c).

Figura 5. Grietas de Flexión (a), (b) y corte (c).



Fuente: Paulo Helene y Fernanda Pereira [7].

2.3 CAUSAS DE ALGUNOS DAÑOS QUIMICOS PRESENTES EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO

Estos daños están relacionados generalmente con la corrosión de armaduras debido a que es un proceso electroquímico que provoca la degradación del acero en el hormigón. Los factores que afectan a este fenómeno están asociados fundamentalmente a las características del hormigón, el medio ambiente y a la disposición de las armaduras en los componentes estructurales afectados.

Entre las causas más comunes que pueden generar daños químicos están: corrosión, ataques químicos, por halógenos (cloruros), carbonatación, sulfatos, reacciones alcalino-sílicas, lixiviación.

A continuación se presentan una descripción acerca de las causas más comunes generadas por daños químicos.

2.3.1 Corrosión

La Corrosión ocurre cuando el cloruro o las sales atacan al concreto armado; como consecuencia se produce la oxidación del acero, el cual aumenta de 2-4 veces su volumen lo cual produce tensiones que se manifiestan en grietas en el concreto, y que son las que aceleran el ataque por agentes externos a la estructura.

En estructuras como los puentes, las zonas más propensas a sufrir de corrosión son aquellas que están expuestas a la acumulación de agua, vegetación y basuras, tales como: aletas inferiores de las vigas, platinas de apoyo, cordón inferior de armaduras, conexiones, etc. En la figura 6 se observa un problema de corrosión y la falla estructural que produjo en el puente el Limón en el Meta.

Figura 6. Problemas de corrosión y falla estructural. Puente el Limón (Meta).



Fuente: Edgar Muñoz y Edgar Valbuena [9]. Pág. 136.

Las posibles causas de la corrosión son: La falta de mantenimiento, los defectos de diseño o de construcción y también la atmósfera ácida de la ciudad, la presencia de aguas y compuestos orgánicos que suelen deteriorar los materiales [5].

A continuación se presentan algunas de las fuentes que causan daños de corrosión en las estructuras de los puentes de concreto de viga y losa.

2.3.1.1 Ataques químicos de diversos medios agresivos

Las fuentes de Corrosión más frecuente de diversos medios agresivos se encuentran: gases atmosféricos, aguas y componentes orgánicos [5].

- Corrosión por Gases Atmosféricos: Entre los que podemos encontrar como agentes de corrosión están:
 - Combustibles de carbón o petróleo, Gases industriales.
 - Cuando se trata CO_2 que con el agua produce CO_3H_2 o SO_2 que produce SO_4H_2 que atacan al concreto.

- Corrosión por Agua: tanto las aguas puras, acidas, selenitosas y de mar pueden producir corrosión. El proceso que provoca estas aguas se da primero por un cambio de color, seguido de fisuras entrecruzadas y un abombamiento de la superficie.
 - Aguas Puras: Atacan al concreto por disolución.
 - Aguas ácidas o salinas: Atacan al cemento convirtiéndolo en sales solubles, que se disuelven.
 - Aguas selenitosas: Producen un ataque especialmente grave, puesto que reaccionan con el aluminato tricálcico dando ettringita que es expansiva.

- Agua de Mar: Produce una desagregación muy grave por disolución del cemento.
- Corrosión por Componentes Orgánicos. Algunos componentes nocivos son:
 - Aceites y grasas
 - Leche y Mantequilla
 - Vino y derivados
 - Cerveza

Estos componentes nocivos provocan ácidos que atacan al concreto y a veces a la armadura.

2.3.1.2 Corrosión por el ingreso de Halógenos (Cloruros)

La presencia de cloruros en el concreto puede provenir de sus componentes: cemento, agregados, agua de mezcla y aditivos. Por otro lado, los iones de cloruro provenientes del entorno también pueden difundirse en el concreto a través de su estructura capilar, sus porosidades e incluso por medio de una atmosfera rica en iones cloruro como sucede con el agua de mar, la brisa marina y sustancias gaseosas de medios industriales [10].

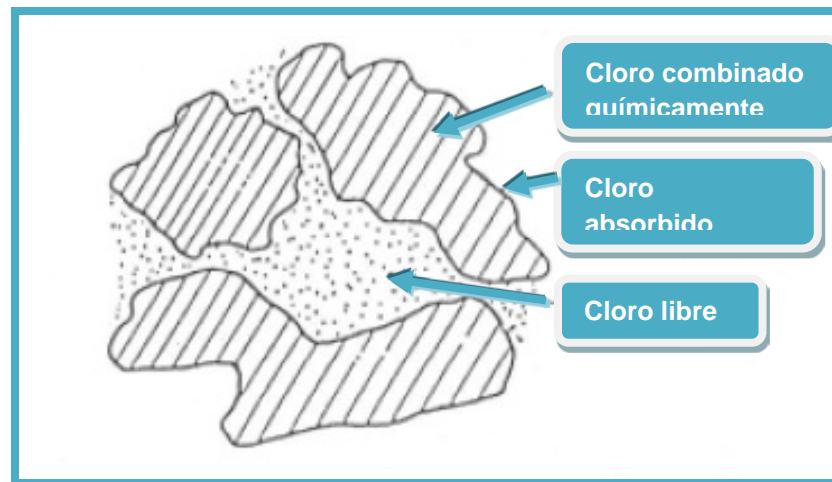
También se debe tener en cuenta el grado de inserción de los cloruros en la matriz de cemento y la forma como se aloja. A continuación se describe las tres formas que se pueden encontrar en la matriz del concreto (Figura 7):

- Combinado químicamente
- Absorbido físicamente
- Forma iónica (Cloro libre)

Únicamente la parte de cloruro no combinado es la responsable de la corrosión del refuerzo. Además, la experiencia afirma que aproximadamente el 0.4% del cloruro

con respecto al peso del cemento puede llegar a combinarse en la matriz de concreto [10].

Figura 7. Esquema de las tres formas en las cuales se presenta el cloro en la estructura de concreto.



Fuente: IV Coloquio de química del cemento [10].

2.3.1.3 Corrosión de la Armadura

La corrosión de las armaduras es un proceso electroquímico que causa la oxidación del acero de refuerzo en el concreto. Los factores que favorecen el proceso de corrosión se relacionan con las características del hormigón, el espesor del recubrimiento, la localización de la armadura y el medio ambiente al cual está expuesta la estructura.

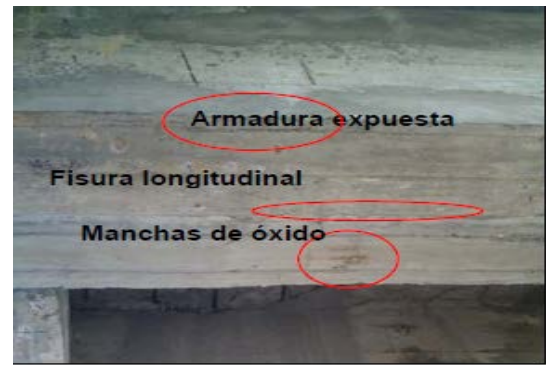
En elementos estructurales que tienen un contenido de humedad alto, las primeras evidencias de corrosión son manchas de óxido en la superficie del concreto, esto se puede observar en las Figuras 8 y 9.

Los daños causados por el proceso de corrosión en armaduras generalmente se manifiestan a través de: fisuras en el concreto paralelas a la dirección del refuerzo, descascaramiento y/o desprendimiento del recubrimiento [6].

Figura 8. Evidencia de manchas de óxido en la superficie del concreto. (Puente sobre el Río Quindío, 2005)



Figura 9. Viga afectada por corrosión. (Puente sobre el Río Quindío, 2005).



Fuente: Universidad Nacional De Colombia (UN) - Instituto Nacional De Vías (INVIAS) [6]. Pág. 39.

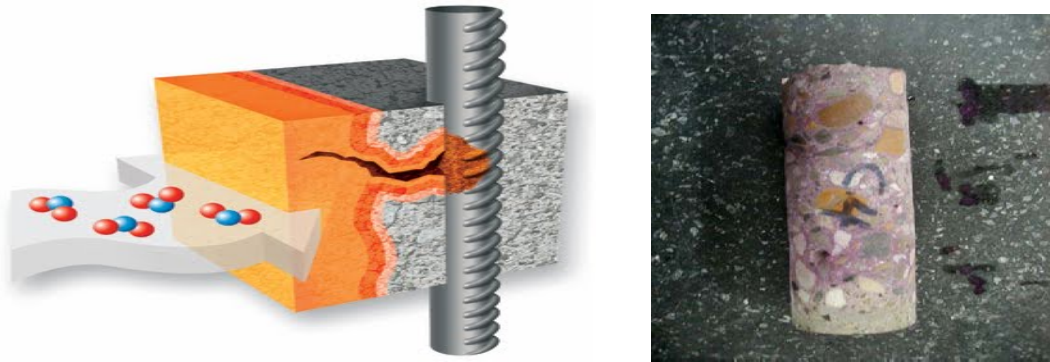
2.3.2 Carbonatación

La carbonatación es la reacción que se presenta entre el dióxido de carbono (CO_2) del aire atmosférico o del suelo con los componentes alcalinos del concreto $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Generando carbonato de calcio (CaCO_3) y la disminución de la reserva alcalina del concreto.

La carbonatación es un proceso que avanza lentamente pero de forma continua hacia el interior de la superficie expuesta del concreto, facilitando el proceso de corrosión del acero de refuerzo de las estructuras de concreto y finalmente su mismo deterioro.

La carbonatación avanza rápidamente cuando se tiene un contenido de humedad intermedio (40 a 70% HR). Estéticamente se observan eflorescencias y depósitos por lixiviación del carbonato de calcio producido en la reacción química. Normalmente se presenta una retracción que puede ocasionar fisuramiento [6]. En la Figura 10 (a) se observa el proceso de carbonatación, (b) se ve una probeta que se utiliza para el ensayo de carbonatación.

Figura 10. (a) Esquema Proceso de Carbonatación, (b) Probeta utilizada en Ensayo de Carbonatación.



Fuente: Xavier Ycaza [11].

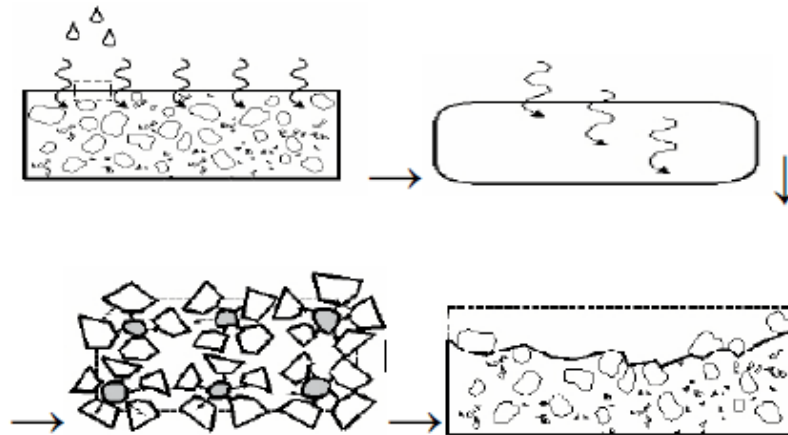
2.3.3 Sulfatos

Los sulfatos son las sales de anión sulfato SO_4 . Este puede estar presente en aguas negras industriales en forma de disolución diluida de ácido sulfúrico, en aguas del subsuelo, especialmente en los terrenos arcillosos y en el agua de mar.

En el ataque por sulfatos el agente agresivo empieza por atacar los granos de clinker hidratados. La acción de los sulfatos sobre el cemento pórtland puede dar lugar a tres tipos de compuestos: yeso, ettringita y taumasita.

La formación de ettringita se produce a partir de la reacción de los iones sulfato (Yeso) con los aluminatos del cemento, lo cual crea una expansión que produce la descomposición de la masa de concreto con pérdida importante de resistencias.

Figura 11. Acción de los sulfatos.



Fuente: Juan Carreño y Ricardo Serrano [5]. Pág. 138.

En la Figura 11 se muestra el proceso en el cual se lleva a cabo la formación de yeso a partir de la reacción de sulfatos no Calcicos (Sodico, Magnesico) con el hidróxido de calcio de la pasta de cemento produce hidrato sulfato de calcio (yeso secundario) y posible formación de ettringita.

Los síntomas básicos de la expansión por ataque de sulfatos, son microfisuras y fisuras aleatorias en la masa de concreto afectada, descascaramiento, ablandamiento de la masa, pérdida de resistencia y de rigidez en el concreto [5].

2.3.4 Reacciones Alcalino-Sílicas

En el concreto húmedo los álcalis del cemento o de los alrededores pueden reaccionar con agregados silíceos.

Los iones alcalinos (Na^+ y K^+) del cemento, el agua de mezcla o de los alrededores lleva a un aumento de la concentración de OH^- en el agua en los poros del concreto. El OH^- disuelve el silicón amorfo (SiO_2) el cual puede estar presente en el agregado, produciendo un gel [12].

Este gel absorbe el agua posible de los alrededores y se expande. Bajo ciertas circunstancias la presión de la expansión produce las grietas en el concreto, formando un patrón de grieta sobre la superficie de concreto. Si las reacciones tienen lugar en el agregado áspero cerca de la superficie de concreto, puede resultar un descascaramiento, como se puede observar en la Figura 12.

Figura 12. Estructura del Puesto Paulo Guerra afectada por reacción álcali-sílice.



Fuente: Paulo Helene y Fernanda Pereira [7]. Pág. 69.

2.3.5 Lixiviación

Se presenta por la descomposición y lavado de los compuestos de la pasta de cemento, como consecuencia de las reacciones químicas que experimenta el concreto por acción de ácidos, aguas blandas, ataque de sales o ataque de sulfatos, o reacciones álcali – agregado.

Usualmente la lixiviación por disolución y transporte de los compuestos hidratados de la pasta de cemento se percibe porque la superficie del concreto ha perdido la

pasta superficial y exhibe agregados expuestos; hay eflorescencias de carbonatación, retención de polvo y alto riesgo de favorecer la proliferación de colonias de hongos y bacterias [11]. Esto puede llevar a un incremento en la porosidad, disminuyendo la resistencia, aumentando la permeabilidad, haciendo al hormigón más vulnerable a otros ataques y consecuentemente afectar indirectamente la durabilidad [7]. En la Figura 13 se ve como es el aspecto de la superficie de un concreto lixiviado.

Figura 13. Aspecto de la superficie de un concreto lixiviado.



Fuente: Julio Montenegro Gambini [13].

2.4 CAUSAS DE ALGUNOS DAÑOS MECANICOS PRESENTES EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO

Los daños mecánicos que se producen en las estructuras de los puentes se deben a la acción de las cargas exteriores las cuales generan en el concreto un estado tensional complejo. Si se analiza un elemento cualquiera de una estructura de concreto reforzado, se comprueba que cada una de sus secciones está sometida a una carga simple o, a una compuesta por varios tipos de cargas simples. Las cargas simples son denominadas de tracción, de flexión, de corte y de torsión [14].

Entre las causas más comunes y en general asociadas a un mayor compromiso estructural, están aquellas ligadas a las cargas exteriores. La deficiencia puede tener origen en la etapa del proyecto, la construcción o la utilización, en los puntos siguientes se analizan algunos defectos que producen daños mecánicos en los puentes de concreto reforzado.

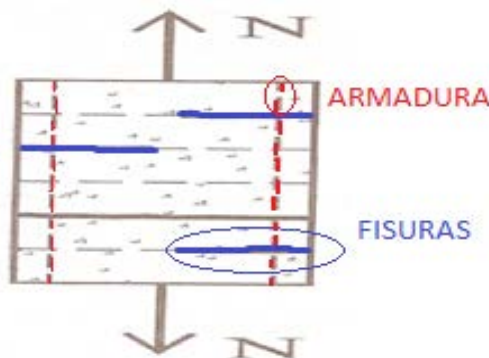
A continuación se dará una breve descripción de las posibles causas que generan daños mecánicos en los puentes de concreto reforzado.

2.4.1 Tracción Axial

Son esfuerzos no muy frecuentes en elementos de concreto, se presenta por una fuerza que actúa a lo largo del eje longitudinal de un miembro estructural aplicada al centroide de la sección transversal del mismo, produciendo un esfuerzo uniforme.

Pueden generar fisuras de configuración perpendicular a las armaduras principales, como se observa en la Figura 14. Estas fisuras se forman prácticamente en forma simultánea, generalmente atraviesan toda la sección y suele localizarse en coincidencia con la armadura transversal, como los estribos.

Figura 14. Elemento de hormigón sometido a tracción axial.



Fuente: Paulo Helene y Fernanda Pereira [7]. Pág. 44.

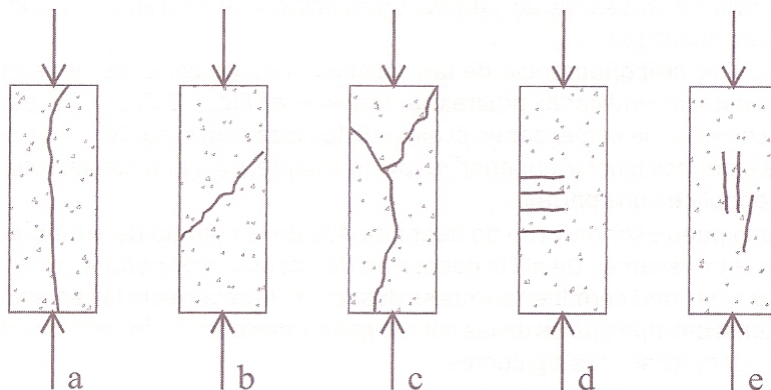
2.4.2 Compresión Axial

Una estructura de hormigón como lo son los puentes de concreto reforzado de viga y losa están sometidos a esfuerzos de compresión axial los cuales pueden manifestar distintas formas de fisuración que dependen de su esbeltez y del grado de coacción transversal existente en sus extremos.

La compresión axial genera otras formas de fisuras, como se observa en la Figura 15.a.b.c, debido a la heterogeneidad del hormigón a lo largo del elemento, distribución no uniforme de las tensiones de compresión debido a excentricidades de las cargas, etc. Una configuración como la que se observa en la Figura 15.d, formada por fisuras finas (anchos de aproximadamente 0.1 mm) se ubican juntas en una de las caras de la columna esbelta, esto estaría indicando una situación peligrosa debido al pandeo del elemento estructural.

La forma habitual de colapso de columnas de hormigón armado es la indicada en la Figura 15.e, consiste en una fisuración muy fina (fisuras del orden de 0.05 a 0.15 mm) paralela a la directriz del elemento y no coincidente.

Figura 15. Elementos de hormigón sometido a compresión axial.



Fuente: Paulo Helene y Fernanda Pereira [7]. Pág. 45.

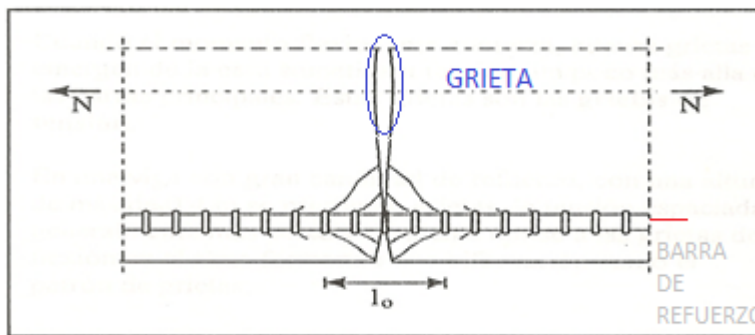
2.4.3 Tensión Pura

La principal causa de las grietas en la estructura es producida debido a que el concreto tiene una baja resistencia a la tensión.

Un aumento en la tensión del acero provoca grietas que afectan la unión entre el concreto y la barra en una cierta zona alrededor de la sección agrietada, de modo que no pueden ser transferidos los esfuerzos de tensión.

El ancho de la grieta es mínima en la barra de refuerzo y se incrementa a mayor distancia de la barra, esta variación es una de las razones por las que el espaciamiento de las grietas varía, por ejemplo es mayor para las losas con refuerzo largo y espaciado que para vigas con espaciamiento más cerrado, como se observa en la Figura 16.

Figura 16. Grieta de tensión / interrupción de adhesión.

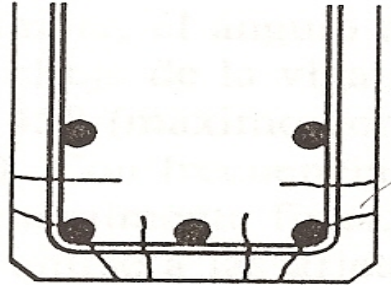


Fuente: Ministerio De Transporte De Colombia Y Ministerio De Transporte De Dinamarca [12]. Capitulo 4-6.

El esfuerzo de tensión produce grietas longitudinales, estas pueden ocurrir en los casos en que haya esfuerzos altos en las barras principales deformándolas o en los casos de fallas de anclaje en una barra de refuerzo, provocando el esfuerzo de

compresión entre el concreto y el corrugado de la barra. Estos esfuerzos tienden a dividir la sección transversalmente, como se observa en la Figura 17.

Figura 17. Grietas Longitudinales.



Fuente: Ministerio De Transporte De Colombia Y Ministerio De Transporte De Dinamarca [12]. Capitulo 4-8.

2.4.4 Flexión

La flexión genera diferentes tipos de daños, las más comunes son las grietas y fisuras.

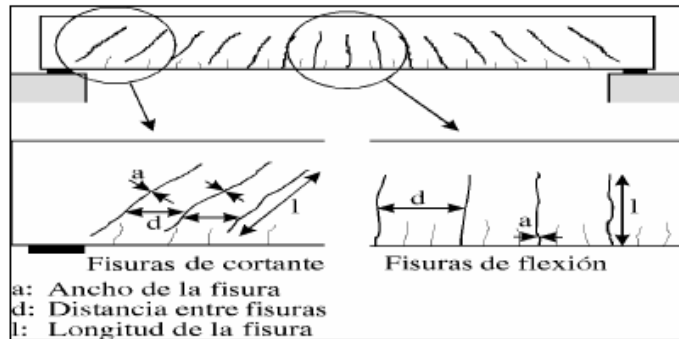
- **Fisuras por Flexión**

Las fisuras de flexión son las que se sitúan generalmente en la zona central del claro, incluyendo las zonas llamadas de "momentos nulos". Nacen en la fibra inferior, cortan el cordón inferior de la viga, suben por el alma al principio crecen verticalmente y luego se inclinan bajo la influencia del esfuerzo cortante cuando se aproximan a los apoyos.

Las fisuras por flexión en una viga o una losa generalmente se presentan en la cara interior de los elementos, se localizan en la zona central de la luz, nacen en la fibra y se extienden hasta llegar al eje neutro de la sección. (Ver Figura 18).

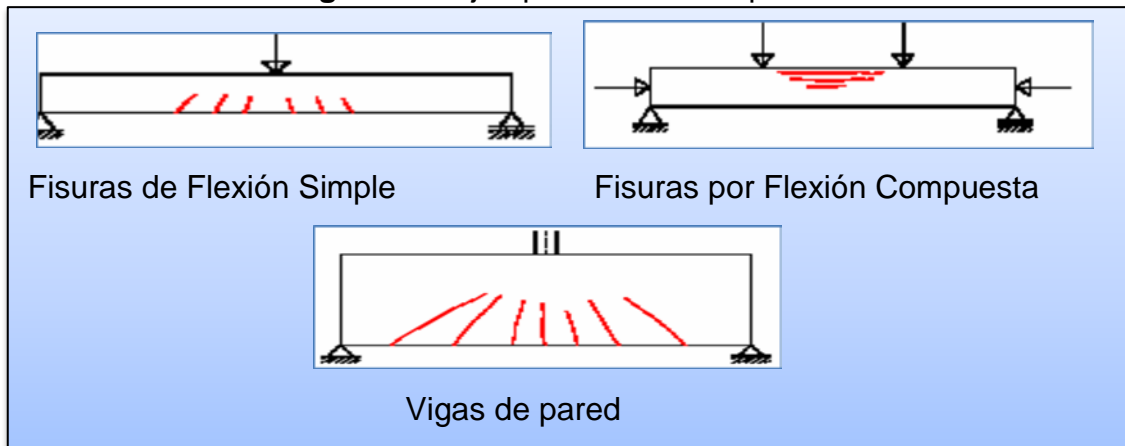
El ancho de las fisuras indica el nivel del esfuerzo de tracción al que han sido sometidas las barras de refuerzo; anchos profundos indican altos esfuerzos por exceso de carga y/o por insuficiencia de refuerzo longitudinal principal. En la Figura 19 se presentan algunos ejemplos de fisuras por flexión.

Figura 18. Patrón de fisuramiento en vigas simplemente apoyadas.



Fuente: UN – INVIAS [6]. Pág. 30.

Figura 19. Ejemplos de Fisuras por flexión.



Fuente: Juan Carreño y Ricardo Serrano [5]. Pág. 117.

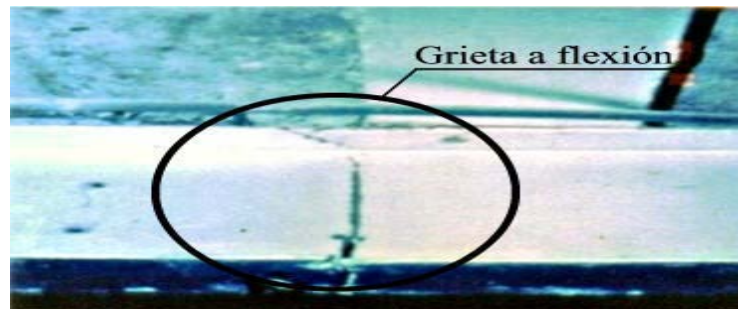
- **Grietas Por Flexión**

Cuando una viga está sometida a flexión, se presentan dos diferentes tipos de grietas, las primeras grietas que se forman emergen de la cara sometida a tensión

y se extienden hasta el eje neutro, se llaman grietas por flexión. Las segundas son las grietas de tensión, se generan cuando el momento flexionante aumenta, nuevas grietas emergen de la cara sometida a tensión, un poco más allá de las barras principales.

El ancho de las grietas por tensión en el alma sobre las barras principales puede ser muy grande, si no hay el refuerzo longitudinal suficiente en la sección entre las barras principales y el área de compresión. (Ver Figura 20).

Figura 20. Falla a flexión en viga transversal de puente de armadura. Puente Regional Risaralda.



Fuente: Edgar Muñoz y Edgar Valbuena [9]. Pág. 136.

2.4.5 Cortante

Se produce con dirección perpendicular al eje de la viga y su efecto es similar al generado a una fuerza cortante paralela a la cara de la sesión de la viga.

- **Fisuras por Cortante**

Los esfuerzos de corte en vigas y losas generan fisuras oblicuas generalmente formando un ángulo de 45° con la dirección del acero principal (longitudinal). Normalmente las fisuras por cortante se presentan en las zonas cercanas a los

apoyos, sin embargo también pueden presentarse en el centro de la luz del elemento si hay cargas puntuales o pocos estribos. Frecuentemente se presentan varias fisuras paralelas, con separación variable [6].

Las fisuras de cortante, siempre atraviesan todo el espesor de la viga y su ancho depende de la sección de la viga (ancho grande en secciones altas y esbeltas), la magnitud de los esfuerzos de cortante (más anchas si el esfuerzo es grande) y pueden generar un corte parcial o total en las vigas de concreto. (Ver Figura 21).

Figura 21. Fractura por cortante en la Pila (*Puente U Shi. – Taiwan, 1999*).



Fuente: UN – INVIAS [6]. Pág. 31.

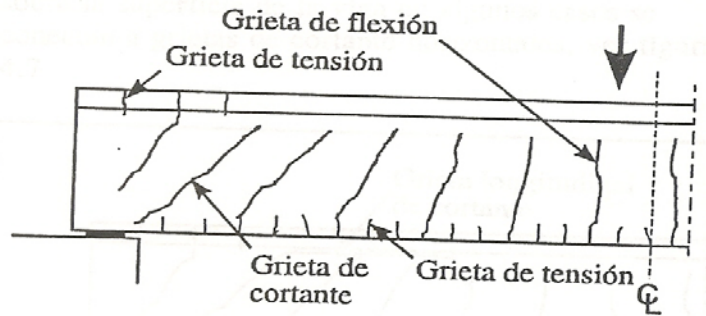
- **Grietas De Cortante**

Las grietas de cortante son inclinaciones ordinarias sobre la superficie de la viga en algunos casos se conectan a grietas de cortante horizontales, como se ve en la Figura 22.

En las vigas y losas sometidas a cortante, las grietas de cortante aparecen inclinadas en las áreas cercanas a los apoyos, cerca de un apoyo simple, el ángulo entre las grietas de cortante inclinadas y el eje de la viga es aproximadamente de 45 grados. Con frecuencia, parte de las grietas de tensión,

generalmente finas, por momento flexionante tienden a unirse a las grietas de cortante.

Figura 22. Grietas de cortante.



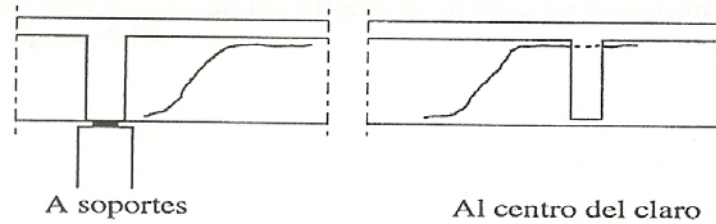
Fuente: Ministerio De Transporte De Colombia Y Ministerio De Transporte De Dinamarca [12]. Capitulo 4-10.

2.4.6 Flexión y Cortante

El inicio de una falla de cortante-flexión se caracteriza por una grieta de cortante conectada con una grieta horizontal a lo largo de la cubierta del puente y una grieta horizontal justamente sobre el refuerzo principal, formando una curva en forma de S como se ve en la Figura 23. Posteriormente puede ocurrir una falla por fatiga en un estribo o en una de las barras principales y al final ocurre una falla completa por “cortante-flexión”.

Son defectos que se combinan y no solo aparecen en el apoyo, muchos puentes antiguos (típicamente los puentes de losa plana con dos vigas) tienen problemas de cortante en el centro del claro, lo cual ligado estrechamente a la baja capacidad de flexión en esta área, combinado con una capacidad de cortante también baja en esta área.

Figura 23. Cortante-Flexión.



Fuente: Ministerio De Transporte De Colombia Y Ministerio De Transporte De Dinamarca [12]. Capitulo 4-11.

2.4.7 Torsión

La torsión se presenta casi siempre acompañada por solicitaciones de flexión y corte, generando tensiones tangenciales en la pieza, en forma similar a las orientadas por los esfuerzos de corte. Por este motivo las solicitaciones de torsión presentan mayores dificultades que las solicitaciones de corte.

La torsión genera en las piezas de hormigón armado fisuras transversales e inclinadas similares a las fisuras por cortante pero se diferencian en que las fisuras causadas por esfuerzos de torsión siguen un patrón de espiral o de tipo helicoidal que atraviesan toda la sección de los elementos. En las Figuras 24 y 25, se observa un patrón de fisuración por torsión y una fisuración por torsión de una pila.

Figura 24. Patrón de Fisuración por Torsión de una viga.

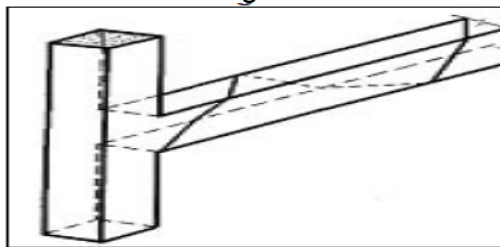


Figura 25. Fisuración por Torsión de una pila.



Fuente: UN - INVIAS [6]. Pág. 32.

2.5 METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS EN LA EVALUACION DE PUENTES.

La estimación de la calidad y la seguridad de la estructura no está necesariamente ligada, única y de manera exclusiva a la resistencia a compresión del concreto y por ello se requiere evaluar tanto el concreto como de los elementos estructurales a través de las pruebas no destructivas, las cuales hoy en día se han convertido en una alternativa importante para establecer los parámetros de la seguridad estructural de las obras civiles en general [15].

Los métodos no destructivos permiten determinar las propiedades de dureza y evaluar las condiciones y características del concreto en estructuras, puentes, edificios, túneles, pavimentos y otras construcciones donde este material se utilice sin producir daños en la estructura del mismo. La mayoría de los métodos no destructivos se basan en inferir el estado de la estructura a partir de la medición de la respuesta ante un estímulo, tal como un impacto o una radiación electromagnética.

La aplicación de métodos no destructivos es de gran importancia para analizar la integridad de puentes de concreto de viga y losa en servicio. Los estudios no destructivos del concreto son más complejos que el de los materiales metálicos (cuyo único problema es la identificación de rupturas o debilidades) porque el concreto es un material compuesto (agua, arena, cemento, agregados y agentes químicos). El concreto muestra una serie de defectos como la forma de pequeñas cavidades, poros, anisotropías cuyas propiedades mecánicas no son rigurosamente reproducibles [2].

2.5.1 Clasificación de técnicas de Ensayos No Destructivos

Las formas más usadas para clasificar las técnicas de Ensayos no destructivos (END), son de acuerdo con:

- a) Tipo o forma del defecto
- b) Ubicación del defecto

De acuerdo con el tipo o forma del defecto, las técnicas de inspección no destructiva se dividen en dos grupos:

- Técnicas de END para defectos volumétricos. Son las que se utilizan para detectar defectos con magnitudes significativas en sus tres dimensiones (largo, alto y ancho); es decir, tienen un volumen definido. (Ver Tabla 1).
- Técnicas de END para defectos planos. Corresponden a las que se aplican a defectos, cuya característica principal es que una de sus dimensiones es pequeña o poco significativa, en comparación con las otras dos [2]. (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Descripción general de los defectos volumétricos y planos.

DEFECTOS VOLUMÉTRICOS	DEFECTOS PLANOS
Porosidades Inclusiones Contracciones Agujeros, o vacíos	Discontinuidades Grietas Laminaciones Falta de adherencia superficial Discontinuidades por solidificación Grietas por trabajo mecánico Grietas por fatiga

Fuente: Secretaria De Comunicaciones Y Transportes - Instituto Mexicano Del Transporte [2]. Pág. 26.

En la Tabla 2 se presenta una clasificación de las técnicas de IND inspección no destructiva de acuerdo con el tipo o forma de defecto. En esta clasificación se puede encontrar la misma técnica que se emplea para ambos tipos de defectos.

Tabla 2. Clasificación de las pruebas no destructivas de acuerdo con el tipo de defecto.

MÉTODOS DE IND PARA DEFECTOS VOLUMÉTRICOS	MÉTODOS DE IND PARA EN DEFECTOS PLANOS
Visual Por réplica de superficies Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Campo magnético Corrientes de Eddy Microondas Ultrasonido Radiografía Tomografía computarizada por rayos X Radiografía por neutrones Termografía Holografía óptica Procesamiento digital de imagen	Visual Microscopia por réplica Partículas magnéticas Campo magnético Corrientes de Eddy Microondas Perturbación de corriente eléctrica Ultrasonido Absorción magnética Ultrasonido Emisión acústica Termografía

Fuente: Secretaria De Comunicaciones Y Transportes - Instituto Mexicano Del Transporte [2]. Pág. 27.

Dependiendo de la ubicación física del defecto, las técnicas de ensayos no destructivos se dividen en tres grupos:

- a) Para defectos superficiales
- b) Para defectos interiores
- c) De integridad, o globales

- **Técnicas para la inspección superficial**

Se emplean para inspeccionar la sanidad en la superficie del material de la pieza o componente. Por lo general detectan discontinuidades en la superficie, o a profundidades no mayores a 6 mm. Las técnicas de este tipo más conocidas y empleadas son la inspección visual (VT); los líquidos penetrantes (PT); las partículas magnéticas (MT); y las corrientes parásitas, o corrientes Eddy (ET).

- **Técnicas de inspección volumétrica**

Se utilizan para conocer la sanidad de un material y detectar discontinuidades generalmente ocultas en su estructura interna. En este caso, las técnicas más comunes son el ultrasonido industrial (UT), la radiografía industrial (RT), y las emisiones acústicas (AET).

- **Técnicas de integridad o globales**

Estas técnicas se aplican para inspeccionar la condición de todo un sistema sin que necesariamente se evalúe de manera individual cada componente. La forma inicial para estas técnicas fue con recipientes a presión y tuberías, mediante lo que se denominaba “detección de fugas” o de hermeticidad. Sin embargo, el concepto se extendió o se utiliza con otro tipo de sistemas, como puede ser una estructura, o un puente carretero [2]. En la Tabla 3 se observa una pequeña clasificación de las Pruebas No Destructivas de acuerdo con la localización del defecto.

Tabla 3. Pruebas no destructivas de acuerdo a la localización del defecto

SUPERFICIALES	INTERIORES	GLOBALES
Visual	Partículas magnéticas	Emisiones acústicas
Líquidos penetrantes	Campo magnético	Vibraciones
Réplica	Perturbación de corriente eléctrica	Detección de fugas
Partículas magnéticas	Absorción magnética	
Corriente eléctrica	Corrientes de Eddy	
Absorción magnética	Microondas	
Ultrasonido	Ultrasonido	
Emisión acústica	Radiografía	
Termografía	Rayos X	
Holografía óptica	Tomografía computarizada	
Holografía acústica	Radiografía por neutrones	
Procesamiento digital de imagen	Termografía	
Microscopía acústica	Holografía óptica	
Emisión acústica	Holografía acústica	

Fuente: Secretaria De Comunicaciones Y Transportes - Instituto Mexicano Del Transporte [2]. Pág. 27.

Cuando es necesaria una inspección no destructiva de un elemento estructural o componente mecánico, el principal problema es seleccionar la técnica más apropiada y económica. Para ello se aconseja conocer lo siguiente:

- Tipos de defectos potenciales y su localización
- Tamaño y orientación del defecto
- Tamaño y forma del objeto a inspeccionar
- Material constitutivo del material a inspeccionar

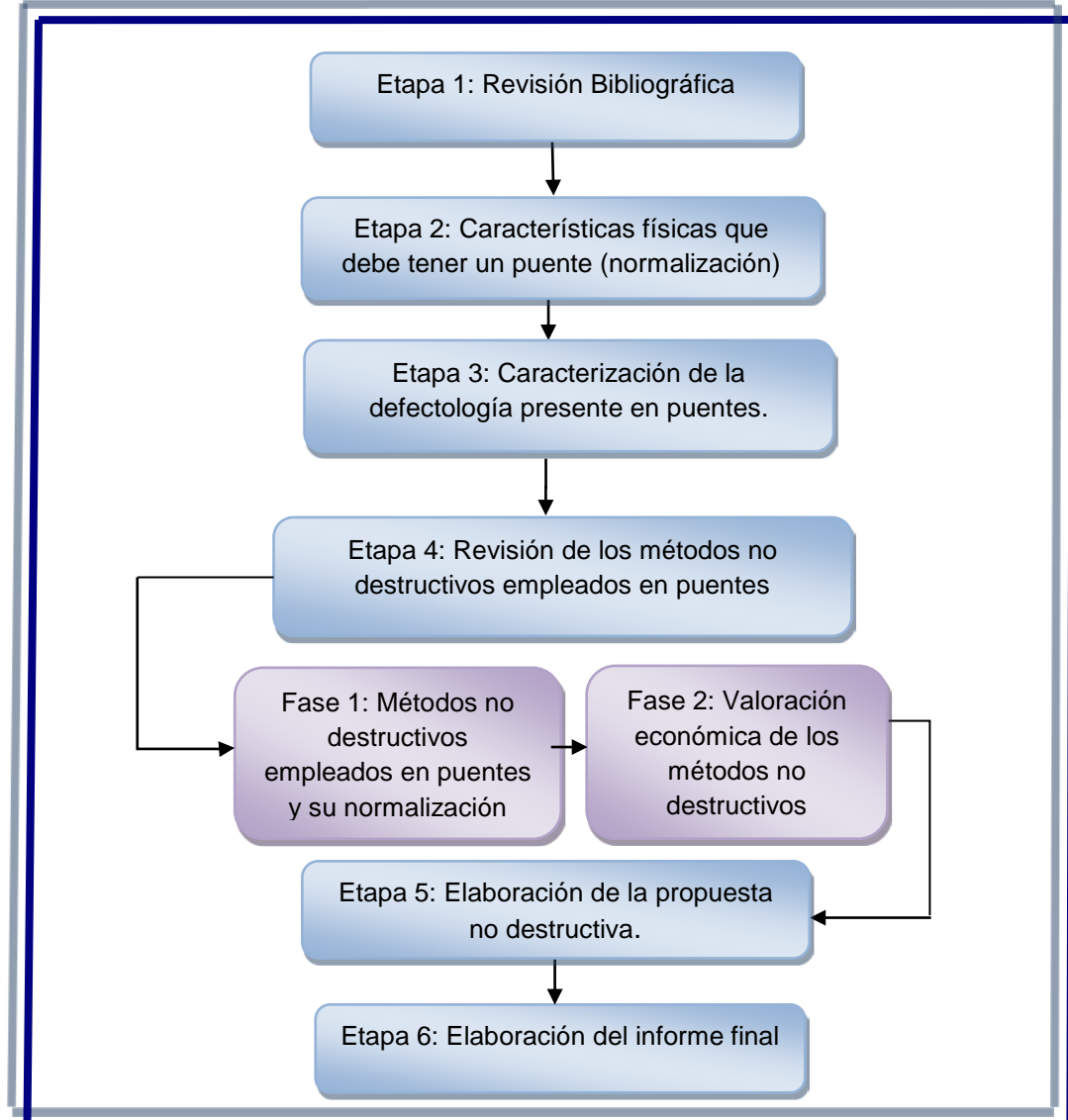
Se deben utilizar dos o más técnicas de inspección en un solo elemento para aumentar la velocidad de ejecución o la sensibilidad en la detección de discontinuidades o defectos esto también para compensar las debilidades de algunas técnicas con las fortalezas de otras. Sin embargo, en estos casos no es recomendable considerar una técnica como sustituto de la otra, ya que el resultado final es generalmente, desfavorable. Un ejemplo de lo anterior es cuando en un sistema o estructura compleja se utiliza una técnica de inspección global, mediante la cual se evalúa el comportamiento total del sistema, a partir de la cual se puede llegar al resultado de que existe algún tipo de problema, y posteriormente aplicar alguna otra técnica de inspección (por ejemplo, ultrasonido) para localizar y cuantificar el problema detectado.

Existen muchas técnicas para la Inspección no destructiva, y se clasifican conforme a criterios como el tipo de defecto que se puede identificar; la localización de éste; o el tipo de energía empleada.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 26 se muestran las fases y etapas que se llevaron a cabo para la realización de la presente investigación. A continuación se presentan detalles de cada una de ellas.

Figura 26. Esquema de la Metodología para el desarrollo de la investigación.



Fuente: Autor.

3.1 Revisión Bibliográfica

Durante el desarrollo de esta investigación se realizó una recopilación de artículos, libros, tesis, trabajos de grado, trabajos de grupos de investigación y normas técnicas nacionales e internacionales. Se revisó todo el material bibliográfico referente a la defectología presente y las técnicas no destructivas que se pueden emplear en los puentes de concreto reforzado de viga y losa, al igual que la normalización de éstas. Esta información permitió conocer las características básicas de los puentes y las diversas formas de evaluación no destructiva aplicada a éstos, con lo cual se pudo llevar a cabo el presente trabajo.

3.2 Características físicas que debe tener un puente (normalización)

Para el desarrollo de esta etapa se revisaron y analizaron las características físicas que debe tener un puente de concreto reforzado de viga y losa, así como las normas nacionales e internacionales relacionadas para el diseño, construcción y mantenimiento de estos mismo. En el siguiente capítulo se presenta un resumen de lo revisado.

3.3 Caracterización de la defectología presente en puentes

En esta etapa y con base en la bibliografía existente, se determinó y caracterizó la defectología más típica que se genera por daños físicos, químicos y mecánicos en puentes de concreto. Se establecieron las posibles causas de estas discontinuidades y los daños que se podrían generar en las estructuras.

3.4 Revisión de los métodos no destructivos empleados en puentes

Para la realización de esta fase se llevaron a cabo dos etapas: la revisión de métodos no destructivos, su normalización y la estimación económica de los mismos. A continuación se presentan detalles de estas actividades.

Etapa 1: Métodos no destructivos empleados en puentes y su normalización

Para la revisión y análisis de los diferentes métodos no destructivos se llevó a cabo la evaluación y análisis de manuales de inspección y mantenimiento sobre estructuras de concreto reportados por entidades nacionales e internacionales, así como las normas técnicas Nacionales e Internacionales existentes en este campo. Lo anterior permitió evaluar los alcances y limitaciones de estos métodos, aspecto importante para la selección apropiada de los ensayos no destructivos que se deben involucrar en una evaluación de puentes de viga y losa.

Etapa 2: Valoración económica de los métodos no destructivos

Con base en información sobre técnicas no destructivas indicadas anteriormente y la revisión sobre los costos de aplicación de las mismas se llevó a cabo esta etapa.

3.5 Elaboración de una propuesta para la inspección no destructiva de puentes de concreto de viga y losa en servicio

A partir de la información revisada en todas las fases y actividades anteriores se llevó a cabo la elaboración de una propuesta de inspección no destructiva para la evaluación de puentes de concreto reforzado de viga y losa.

3.6 Elaboración del informe final

Finalmente se llevó a cabo la redacción y revisión del informe final y posterior sustentación del trabajo.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas llevadas a cabo durante el desarrollo de la presente investigación y su respectivo análisis.

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS PUENTES DE CONCRETO REFORZADO

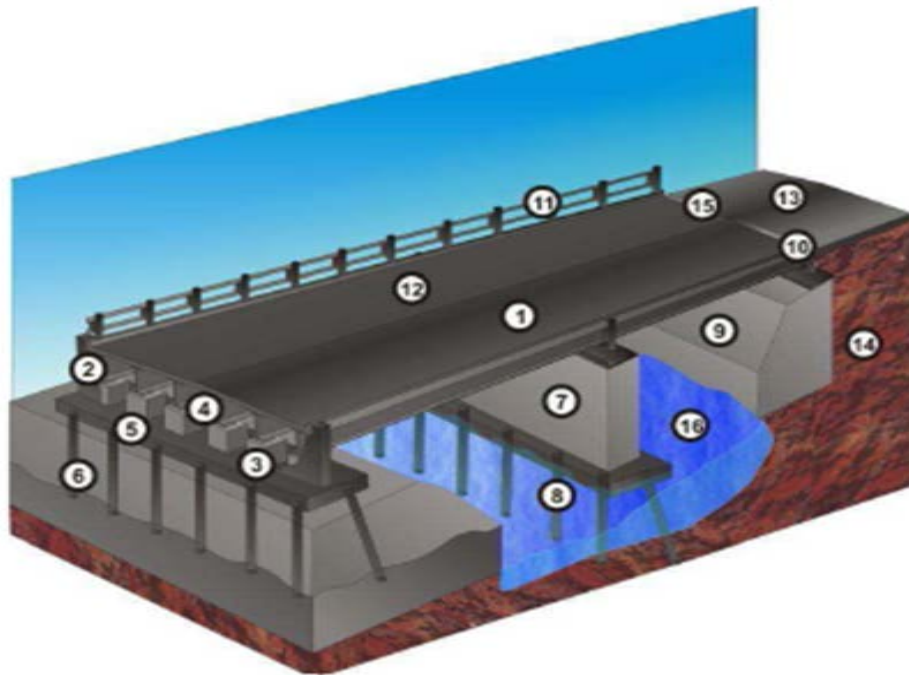
Un puente se define como una estructura destinada a salvar obstáculos naturales, como ríos, valles, lagos o brazos de mar; y obstáculos artificiales, como vías férreas o carreteras, con el fin de unir caminos de viajeros, animales y mercancías [3]. Para sus labores de mantenimiento es importante conocer las partes que lo componen y su función, así como los diferentes materiales y tipologías de este tipo de estructuras.

Los puentes están conformados por dos partes principales: superestructura e infraestructura. La superestructura corresponde a todos los componentes que hacen parte de su tablero, tales como: losas, vigas, riostras, armadura, arco, cables, tirantes, pendolones, bordillos, andenes, barandas, juntas de dilatación, apoyos, pavimento, drenes, separadores, etc. La infraestructura incluye estribos, torres y las aletas con su correspondiente cimentación. También las losas de aproximación o de acceso, el terraplén de acceso, los conos y taludes. En las Figuras 27 y 28 se muestran de manera esquemática algunas de las partes básicas de los puentes y una fotografía con los componentes de un puente de viga y losa, indicando su superestructura e infraestructura.

De acuerdo con la Red Vial Nacional y el módulo de inventario de SIPUCOL [3], se pueden clasificar los componentes de la superestructura de estos puentes como

se observa en la Figura 29, en esta se aprecian los materiales utilizados en su construcción, así como los tipos de secciones tanto transversales como longitudinales que la constituyen.

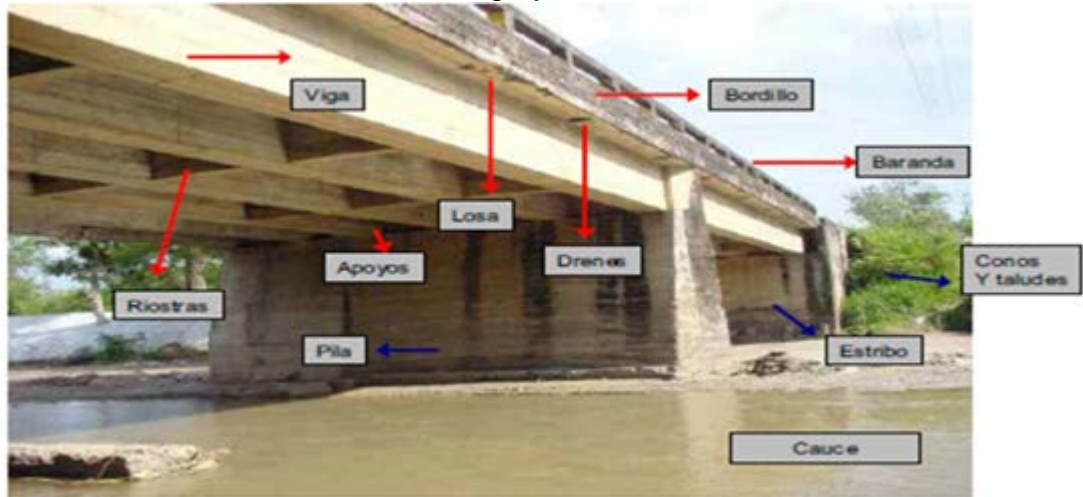
Figura 27. Componentes básicos de un puente.



Fuente: Universidad pontificia javeriana, Ministerio de Transporte [3]. Pág. 14.

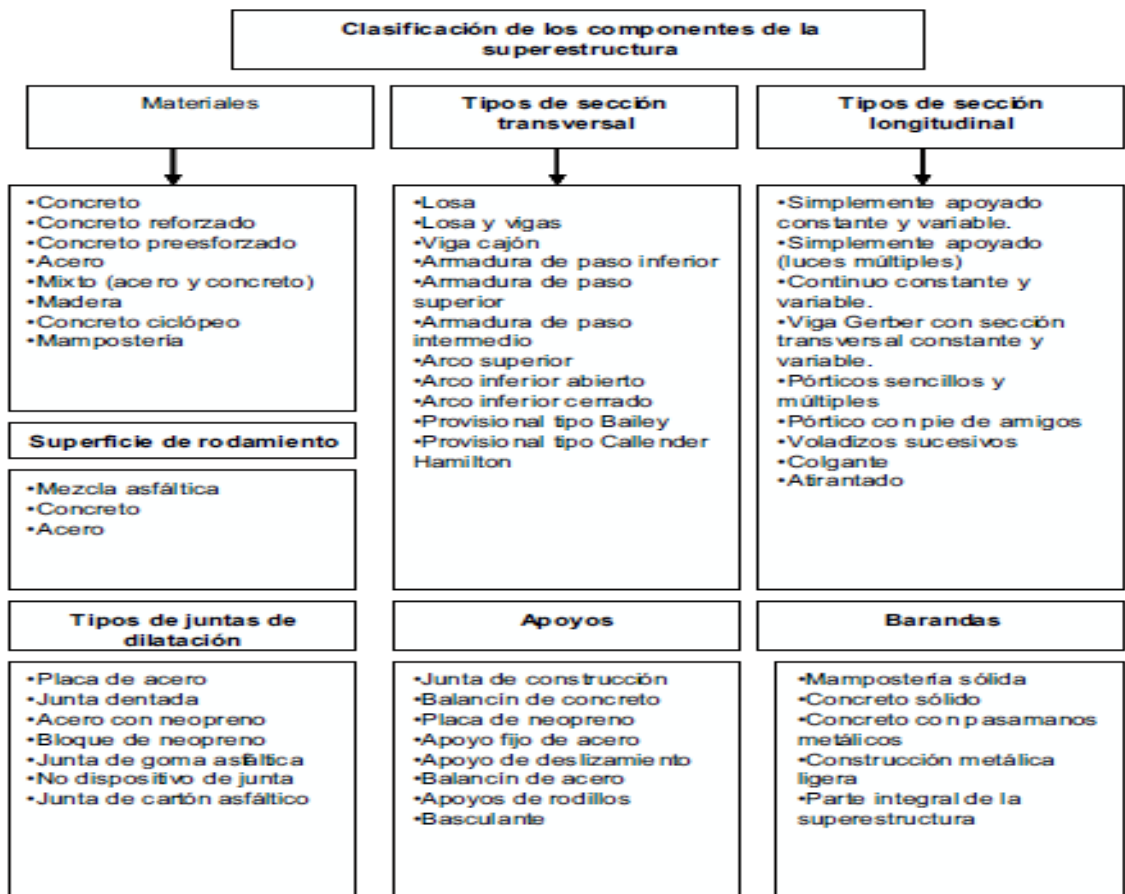
- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| (1) Losa de concreto | (9) Cono sobre estribo |
| (2) Vigas de acero | (10) Bordillo |
| (3) Apoyos | (11) baranda |
| (4) Pedestal | (12) Superficie de rodadura |
| (5) Estribo | (13) Losa de acceso |
| (6) Pilotes del estribo | (14) Terraplén de acceso |
| (7) Pila | (15) Juntas de dilatación |
| (8) Pilotes en pilas | (16) Cauce |

Figura 28. Componentes de la superestructura e infraestructura, en un puente de viga y losa.



Fuente: Universidad Pontificia Javeriana, Ministerio de Transporte [3]. Pág. 15.

Figura 29. Tipología de la superestructura de los puentes.



Fuente: Universidad Pontificia Javeriana, Ministerio de Transporte [3]. Pág. 16.

4.2 NORMATIVA RELACIONADA CON DISEÑO, CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO DE PUENTES DE CONCRETO.

En la Tabla 4 se presentan algunos de las principales documentos y normas técnicas utilizadas en el diseño, construcción, diagnóstico y mantenimiento de las estructuras de concreto. En esta tabla se indica la asociación técnica que expide el documento o norma, designación y nombre de la norma, así como un breve resumen de su contenido.

Tabla 4. Documentos y normas técnicas empleadas en diseño, construcción y mantenimiento de puentes de concreto.

ASOCIACIÓN TÉCNICA	DESIGNACIÓN Y NOMBRE DEL DOCUMENTO Ó NORMA	RESUMEN
<p style="text-align: center;">American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)</p>	<p>AASHTO LRFD 2005 Bridge Design Specifications.</p>	<p>Este documento surge como una recomendación de la evaluación hecha en 1987 sobre la evaluación de las especificaciones para el diseño de puentes en estados Unidos por la AASHTO, lo cual represento un avance hacia un diseño mejorado y métodos de análisis más precisos, esto permitió construir puentes con mayor capacidad de servicio, mantenimiento más sencillo y niveles de seguridad uniformes.</p> <p>El documento hace referencia de las especificaciones AASHTO para el Diseño de Puentes por el Método LRFD (Load and Resistance factor Design). El documento contiene características generales y de ubicación del puente, cargas y factores de carga, análisis y evaluación estructural. Requisitos en los diseños de elementos de puentes elaborados en hormigón, acero, aluminio y madera. Especificaciones de diseño para tableros y sistemas de tablero, fundaciones, estribos, pilas y muros, estructuras enterradas y revestimientos para túneles, barandas, juntas y apoyos [19].</p>
<p style="text-align: center;">AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (A.C.I)</p>	<p>ACI 318-08: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary</p>	<p>El código contiene sugerencias sobre materiales, diseño y construcciones de concreto estructural en edificaciones y en estructuras de concreto no correspondientes a edificaciones. También cubre la evaluación de resistencias de estructuras de concreto en</p>

		<p>servicio.</p> <p>Entre los temas que se encuentran están: características de los planos y especificaciones, inspección, materiales, requisitos de durabilidad; la calidad del concreto, mezclado y colocación. Las juntas de construcción, detalles de refuerzo, análisis y diseño, resistencia y capacidad de servicio. Las cargas de flexión, axial, cortante y torsión, sistemas de losa, zapatas, muros, concreto prefabricado, compuesto de elementos sometidos a flexión, de hormigón pretensado. Evaluación de la resistencia en estructuras existentes y las disposiciones de diseño sísmico [20].</p>
<p>AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (A.C.I)</p>	<p>ACI 341.2R-97: Seismic Analysis and Design of Concrete Bridge Systems</p>	<p>Este documento, está dirigido a ingenieros, y suministra una guía sobre modelado y diseño de puentes de concreto sometidos a movimientos sísmicos.</p> <p>El material contenido en este informe está destinado a completar y complementar los documentos existentes de la (AASHTO), departamento de transporte de california (Caltrans) y el código uniforme de construcción (UBC). El informe también incluye un resumen del análisis y el diseño para puentes considerados con aislamiento sísmico, así como en general con consideraciones sísmicas de diseño en puentes de concreto.</p> <p>Aunque el documento está basado en normas técnicas, lo expresado allí no se constituye en reglas absolutas que limiten la responsabilidad y la creatividad del ingeniero encargado del análisis estructural. Sin embargo si se sigue este código se podría tener una buena indicación del comportamiento sísmico para una amplia gama de puentes encontrados normalmente en la práctica [21].</p>
	<p>ACI 343R.95: Analysis and Design of Reinforced Concrete Bridge Structures</p>	<p>El código provee unos lineamientos para el análisis y diseño de puentes de concreto reforzados, pretensados, y parcialmente pretensados. Las recomendaciones se aplican en puentes peatonales, puentes de carretera, puentes ferroviarios, puentes aeroportuarios, y otras estructuras de puentes especiales.</p> <p>Los temas que se tratan son: requerimientos para puentes, materiales, construcción, cargas y combinaciones de cargas. Diseños preliminares, análisis y diseño de resistencia a carga última, diseño y análisis de carga en</p>

		servicio. Concreto pretensado. Sistemas y elementos de la superestructura, sistemas y elementos de la infraestructura. Concreto prefabricado. Detalles del refuerzo para diseño y construcción [22].
AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (A.C.I)	ACI 345R-91 : Guide For Concrete Highway Bridge Deck Construction	<p>Este documento hace referencia a los cuidados que son necesarios durante las fases de construcción de los puentes de concreto, incluyendo actividades de pre-construcción y post-construcción, las cuales son determinantes en la durabilidad y costos de mantenimiento de las cubiertas de concreto en puentes de carretera.</p> <p>Esta guía contiene: consideraciones de diseño, inspección, planeamiento de pre construcción, reforzamiento, materiales de concreto y propiedades, medición y mezclado, colocación y consolidación, acabado, curado, cuidados de post-construcción, y superposiciones [23].</p>
	ACI 345.1R-92 : Routine Maintenance of Concrete Bridges	<p>Este documento presenta y discute varios problemas potenciales y las áreas que se podrían afectar en un puente. Da guías para evitar y corregir tales problemas.</p> <p>Estas guías se podrían utilizar para el mantenimiento día a día por el supervisor que este a cargo de la rutina de mantenimiento del puente.</p> <p>El documento presenta aspectos relacionados con las carreteras, la superestructura, subestructura, los caminos de acceso, las pendientes, y los canales de un puente [24].</p>
MINISTERIO DE TRANSPORTE, INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS)	Manual Para El Mantenimiento De La Red Vial Secundaria (Pavimentada Y En Afirmado)	<p>Mediante un convenio internacional de asistencia técnica entre el Instituto Nacional de Vías y la Dirección de Carreteras del Ministerio de Transportes de Dinamarca, se implementó el Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL), que consta de diferentes módulos de gestión de los puentes y una base de datos especializada. A través de este sistema el (INVIAS) ha fortalecido la gestión en el tema de puentes el cual está conformado por diversos módulos como inventario, inspección principal, inspección especial, mantenimiento rutinario, capacidad de carga, etc.</p> <p>Este Sistema de Gestión se define como una aproximación racional y sistemática, para organizar y llevar a cabo todas las actividades relacionadas con el manejo y la administración de los puentes [3].</p>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (A.C.I)	ACI 201.1 R-92: Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service	<p>Esta guía presenta un sistema para dar informes sobre un estudio de la condición del concreto en servicio, con el fin de identificar y definir las áreas de daño.</p> <p>La guía está diseñada para ser utilizada en un proyecto desde su construcción, durante su construcción y la vida posterior de la estructura.</p> <p>Incluye una lista de chequeo de los detalles que deben ser considerados en el informe de un puente, definiciones estándar de asociaciones técnicas asociadas con la durabilidad del concreto y fotografías de referencia de los posibles daños encontrados.</p> <p>Su propósito es establecer un sistema uniforme para la evaluación de la condición del concreto [25].</p>
	ACI 201.2R-01: Guide to Durable Concrete	<p>Esta guía describe los tipos de deterioro del concreto. Cada capítulo contiene un análisis de los mecanismos involucrados y la recomendación requerida para los componentes individuales del concreto, la calidad de mezclas de hormigón, los procedimientos de construcción, y las influencias de la exposición al medio ambiente, debidos a que todos estos aspectos son muy importantes para evaluar la durabilidad de este material.</p> <p>Adicionalmente presenta una guía sobre algunas técnicas de reparación. El documento contiene información acerca de la condición hielo deshielo, exposición química agresiva, abrasión corrosión de metales y otros materiales embebidos en el concreto, reacciones químicas de los agregados, reparación de concreto y uso de sistemas de barrera protectora para mejorar la durabilidad del concreto [26].</p>
	ACI 224.1R-93 Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón	<p>En este documento se resumen las causas de fisuración de las estructuras de hormigón.</p> <p>Se Presentan los procedimientos usados para evaluar la fisuración del hormigón y las principales técnicas para reparar fisuras. Se discuten los principales métodos de reparación de fisuras y se brinda una guía para su correcta aplicación [27].</p>

<p style="text-align: center;">AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (A.C.I)</p>	<p>ACI 224.3R-95 : Joints in Concrete Construction</p>	<p>Este documento revisa el diseño y construcción de las uniones en estructuras de concreto, sujeto a un amplio uso y condiciones ambientales. Adicionalmente se discute aspectos de materiales sellantes y técnicas de unión empleadas.</p> <p>Los capítulos de este documento se focalizan sobre varios tipos de estructuras y elementos estructurales con características únicas, tales como edificaciones puentes, canales tubos de concreto prefabricado, paredes y masas de concreto.</p> <p>En el capítulo 4 la norma trata la construcción de todos los tipos de juntas en puentes y provee una guía del uso que tienen. [28].</p>
---	--	--

A partir de la revisión de los documentos indicados anteriormente, es importante destacar aquellos que tratan las etapas de diagnóstico y mantenimiento ya que constituyen una herramienta valiosa para mantener y preservar estas estructuras.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA DEFECTOLOGÍA PRESENTE EN PUENTES DE CONCRETO

Es importante destacar, con base la bibliografía consultada, que existen tipos de clasificaciones de los defectos en el concreto, atendiendo a diversos parámetros, sin embargo para efectos de la presente investigación se hizo énfasis sobre las características de los mismos, con el fin identificar de mejor manera las técnicas no destructivas a utilizar.

En cuanto a los puentes de concreto estos pueden sufrir algunos daños, los cuales tienen origen en causas físicas, químicas y mecánicas. Como un resultado de este trabajo se presentan las tablas 5-11 en las cuales se resumen algunos daños típicos que se encuentran en los puentes de concreto tales como: Fisuras,

Grietas, Manchas y Cambios de Color, Deflexiones, Descascaramiento, pandeo, Hormigueros y Segregaciones, Aplastamiento y Socavación. También se indican sus posibles causas (físicos químicos y mecánicos) y las consecuencias que generarían en las estructuras dichas discontinuidades. El objetivo de esta tabla es servir como guía para el diagnóstico del estado de puentes de concreto reforzado de viga y losa.

Las fisuras y grietas son defectos que aparecen con mucha frecuencia en las estructuras de concreto, deben ser identificadas, caracterizadas en sus dimensiones (largo y ancho), y en su orientación con el fin de identificar la causa posible de su presencia. (Ver Tablas 5-6).

En cuanto a las manchas y los cambios de color generados en el concreto, dependiendo de la coloración adoptada es posible identificar su origen. (Ver Tabla 7).

El siguiente daño es aquel denominado deformación ó deformaciones, las cuales se presentan por un cambio en la forma del concreto, identificándose tres tipos: deflexiones, descascaramiento y pandeo (ver Tablas 8 a, b y c respectivamente).

Las características básicas de los defectos de hormigueros, segregaciones, los aplastamientos y la socavación se presentan en las tablas 9, 10 y 11 respectivamente.

Tabla 5. Fisuras en estructuras de concreto causas y efectos

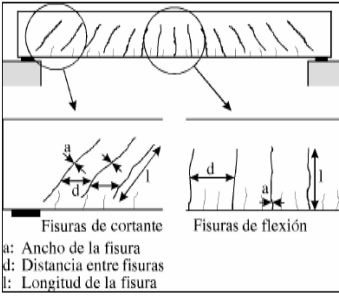


DAÑO	DESCRIPCION	TIPOS DE FISURAS	CAUSAS	EFECTOS
<p style="text-align: center;">FISURAS</p>  <p style="text-align: center;">Patron de Fisuramiento</p>  <p style="text-align: center;">Fisuración por Torsión</p>  <p style="text-align: center;">Fisura por Cortante</p>	<p>Son defectos alargados, ubicados en la superficie, subsuperficialmente y/o en el interior del material. Se produce en diagonal y en forma de aspa (ver Figura superior).</p> <p>Las fisuras algunas veces afectan sólo la apariencia de la estructura, su importancia depende del tipo de estructura y de la naturaleza de las fisuras.</p> <p>Según el tamaño las fisuras se clasifican en:</p> <p>Microfisuras: $e < 0.05$ mm. Fisuras: $0,1 < e < 0.2$ mm. Macrofisuras: $e > 0.2$ mm [8]. e= es el ancho de la fisura.</p> <p>Ejemplos de este defecto se observan en la figura intermedia e inferior.</p>	<p>Generados por origen FÍSICO:</p> <p><i>Fisuras en estado plástico:</i> De Asentamiento plástico De Afogarado. De Retracción hidráulica De Entumecimiento. Por contracción plástica Por juntas frías.</p> <p><i>Fisuración del concreto endurecido:</i> De Contracción por secado. De origen térmico. Por solicitaciones excesivas. Por ciclo de congelamiento y deshielo.</p> <p>De Origen QUÍMICO: Fisuras por temperaturas extremas (incendios). Fisuras por corrosión. Fisuras por reacción álcali agregado.</p> <p>De Origen MECÁNICO: <i>Debidas a cargas:</i> De por flexión. De por cortante. Por punzonamiento. Por torsión.</p> <p>Las fisuras de Origen mecánico se pueden presentar siguiendo una orientación paralela u oblicua con respecto a la carga (Ver Capítulo 2.4).</p>	<p>Las fisuras son generadas teniendo en cuenta las acciones físicas, químicas y mecánicas.</p> <p>FÍSICAS: Relación agua cemento. Malas prácticas constructivas. Bajo recubrimiento. Curado deficiente. Socavaduras. Daño sísmico. Daños por impacto. Vibración excesiva. Variaciones térmicas.</p> <p>QUÍMICAS: Ambientes agresivos. Ataques químicos. Daño por fuego. Corrosión. (Cloruros, sulfatos, carbonatación) Reacciones alcalino-sílicas. Infiltración y Eflorescencias.</p> <p>MECÁNICAS: Concretos de bajas resistencias. Retracciones Hidráulicas. Cargas aplicadas.</p>	<p>Pueden dar lugar a desprendimiento de secciones o partes completas de estructura y colapso de la misma.</p> <p>Disminución de la resistencia y durabilidad de la estructura.</p> <p>Deficiencia estructural.</p> <p>Falta de capacidad de carga.</p>

Tabla 6. Grietas en estructuras de concreto causas y efectos


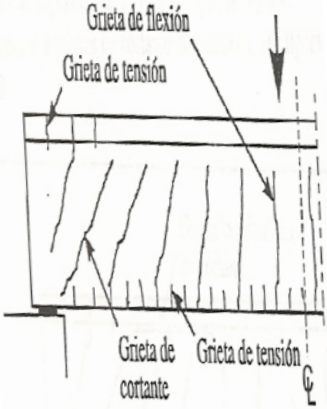
DAÑO	DESCRIPCIÓN	TIPOS DE GRIETAS	CAUSAS	EFECTOS
<p style="text-align: center;">GRIETAS</p>  <p style="text-align: center;">Grietas de Flexión y Corte</p>  <p style="text-align: center;">Tipos de Grietas: De tensión, Flexión y Cortante.</p>	<p>Es una abertura larga y estrecha producto de la separación del material.</p> <p>Son defectos superficiales, subsuperficiales e internos.</p> <p>Existe una diferencia entre las grietas y fisuras, la cual se presenta en que la primera atraviesa toda la estructura y la segunda no.</p> <p>Las grietas generadas por daños mecánicos se pueden presentar siguiendo diversos patrones (paralelos u oblicuos) inclinado con respecto a la carga (Ver Capitulo 2.4 para mayor información de las grietas)</p>	<p>De Origen FÍSICO:</p> <p>Grietas térmicas.</p> <p>Grietas de contracción de secado.</p> <p>Grietas debidas a la contracción plástica.</p> <p>Grietas debidas al asentamiento plástico.</p> <p>De Origen QUÍMICO:</p> <p>Grietas por corrosión.</p> <p>De Origen MECÁNICO:</p> <p>De tensión.</p> <p>Por flexión.</p> <p>Grietas longitudinales.</p> <p>Grietas por cortante.</p> <p>Grietas por flexión y cortante.</p> <p>Grietas por torsión.</p> <p>Grietas por apoyo.</p> <p>Grietas por aplastamiento.</p>	<p>Las grietas son generadas teniendo en cuenta las acciones físicas, químicas y mecánicas.</p> <p>FISICAS:</p> <p>Malas prácticas constructivas.</p> <p>Bajo recubrimiento.</p> <p>Curado deficiente.</p> <p>Socavaduras.</p> <p>Daño sísmico.</p> <p>Daños por impacto.</p> <p>Vibración excesiva.</p> <p>QUIMICAS:</p> <p>Ambientes agresivos.</p> <p>Variaciones térmicas.</p> <p>Ataques químicos.</p> <p>Daño por fuego.</p> <p>Corrosión (Cloruros, sulfatos, carbonatación).</p> <p>Reacciones alcalino-silicas.</p> <p>Infiltración y Eflorescencias.</p> <p>MECANICAS:</p> <p>Concretos de bajas resistencias.</p> <p>Retracciones Hidráulicas.</p> <p>Cargas aplicadas.</p>	<p>Existe reducción en la capacidad sismo resistente.</p> <p>Pueden dar lugar a desprendimiento de secciones o partes completas de estructura y colapso de la misma.</p> <p>Disminución de la resistencia y durabilidad de la estructura.</p> <p>Deficiencia estructural.</p> <p>Falta de capacidad de carga.</p>

Tabla 7. Manchas y cambios de color en estructuras de concreto causas y efectos




DAÑO	DESCRIPCIÓN	TIPOS DE MANCHAS	CAUSAS	EFECTOS
<p>MANCHAS Y CAMBIOS DE COLOR</p>  <p>Manchas de Oxido</p>  <p>Eflorescencia</p>  <p>Lixiviación en el Concreto</p>	<p>Se caracterizan por un cambio de color en una zona determinada.</p> <p>Pueden ser superficiales y subsuperficiales.</p>	<p>Se presentan en forma de manchas, humedad, ensuciamiento, oxidación, eflorescencias y/o contaminación [29].</p> <p><i>Manchas generadas por corrosión[30]:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Verde: se presentan por la formación de hidróxido ferroso (etapa inicial de la corrosión). $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^{-} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ Negro: se presenta por la formación de hidróxido férrico (hay mayor grado de oxidación). $\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ Rojo: se presenta por la formación de óxido de hierro hidratado. $2\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}_2\text{O}$ <p><i>Manchas generadas por la carbonatación:</i> Blanco: El hidróxido de calcio del concreto se combina con el dióxido de carbono del aire formando carbonato de calcio [27].</p>	<p>Las manchas y cambios de color son generadas teniendo en cuenta las acciones físicas, químicas y mecánicas.</p> <p>Socavaduras.</p> <p>Daños por fuego.</p> <p>Ambientes agresivos.</p> <p>Concretos de bajas resistencias.</p> <p>Variaciones térmicas.</p> <p>Ataques químicos.</p> <p>Corrosión (Cloruros, sulfatos, carbonatación).</p> <p>Lixiviación.</p> <p>Infiltración y Eflorescencias.</p> <p>Despasivación del acero de refuerzo.</p>	<p>La sección de armadura disminuye. Los productos de corrosión ocupan un volumen mayor que el del acero del que se han formado. Esto conduce a tensiones expansivas que pueden provocar la rotura del recubrimiento y se ve afectada la adherencia entre la armadura y el hormigón, aumentan las deformaciones y se ve afectada la resistencia.</p> <p>Lixiviación, incrementando la porosidad, disminuyendo la resistencia, aumentando la permeabilidad, haciendo al hormigón más vulnerable a otros ataques, y afecta indirectamente su durabilidad [7].</p> <p>Deficiencias estructurales y deterioro de los arcos de concreto, mampostería o acero en los puentes.</p>

Tabla 8 a. Tipo de deformación: Deflexiones en estructuras de concreto causas y efectos


DAÑO	DESCRIPCIÓN	TIPOS DE DEFORMACIÓN	CAUSAS	EFECTOS
<p style="text-align: center;">DEFLEXIONES</p>  <p style="text-align: center;">Deflexión en Viga [32].</p>	<p>Es la respuesta estructural a una acción de cargas aplicadas.</p> <p>Son defectos superficiales, subsuperficiales e internos.</p>	<p>Deflexión elástica [31].</p> <p>Deflexión a largo plazo o inelástica.</p>	<p>Las deflexiones son generadas teniendo en cuenta las acciones físicas, químicas y mecánicas.</p> <p>Relación agua cemento baja.</p> <p>Malas prácticas constructivas.</p> <p>Bajo recubrimiento.</p> <p>Concretos de bajas resistencias.</p> <p>Curado deficiente.</p> <p>Variaciones térmicas.</p> <p>Cargas aplicadas</p> <p>Fallas de diseño</p> <p>Sobrecargas</p> <p>Debilidad del suelo</p> <p>Flujo plástico</p>	<p>Perdida de la capacidad de carga de las vigas.</p> <p>Grietas y fisuras.</p>

Tabla 8b. Tipo de deformación: Descascaramiento en estructuras de concreto causas y efectos




DAÑO	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	EFECTOS
<p style="text-align: center;">DESCASCARAMIENTO</p>  <p>Despasivación del acero de refuerzo.</p>  <p>Recubrimiento inadecuado en losas.</p>  <p>Descascaramiento por Infiltración.</p>	<p>Eliminación y desprendimiento de la superficie del concreto.</p> <p>(Ver Figuras Ilustrativas)</p>	<p>El descascaramiento es generado teniendo en cuenta las acciones físicas, químicas y mecánicas.</p> <p>Relación agua cemento baja.</p> <p>Malas prácticas constructivas.</p> <p>Ambientes agresivos.</p> <p>Bajo recubrimiento.</p> <p>Concretos de bajas resistencias.</p> <p>Curado deficiente.</p> <p>Variaciones térmicas</p> <p>Ataques químicos.</p> <p>Daño por fuego.</p> <p>Sulfatos.</p> <p>Reacciones alcalino-sílicas.</p> <p>Infiltración y Eflorescencias.</p> <p>Despasivación del acero de refuerzo.</p> <p>Socavaduras.</p> <p>Daño sísmico.</p> <p>Daños por impacto.</p> <p>Vibración excesiva.</p> <p>Carga aplicada.</p>	<p>Fallas y detrimento estructural, por tanto no cumplen con su función principal en los puentes.</p> <p>Disminución de la capacidad de carga por la pérdida de sección.</p> <p>Deficiencias estructurales.</p> <p>Deterioro de los apoyos.</p>

Tabla 8c. Tipo de deformación: Pandeo en estructuras de concreto causas y efectos


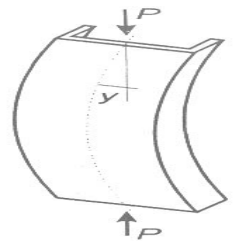

DAÑO	DESCRIPCIÓN	Tipos de pandeo	CAUSAS	EFECTOS
<p style="text-align: center;">PANDEO</p>  <p>Pandeo de estructura afectado por cargas[33]</p>  <p>Pandeo general [7].</p>  <p>Pandeo Lateral torsional [7].</p>	<p>Daño estructural debido a una sobrecarga, subdiseño, pobre ejecución de obra y/o impacto vehicular.</p> <p>Se produce al aplicar una carga axial de compresión, marca la frontera entre el equilibrio estable e inestable en la estructura [34].</p>	<p>Pandeo Torsional (Ver Figura inferior).</p> <p><i>Pandeo por Flexión:</i></p> <p>Pandeo Local</p> <p>Pandeo General Lateral (Ver Figura intermedia)</p>	<p>El pandeo es generado teniendo en cuenta las acciones físicas, químicas y mecánicas.</p> <p>Relación agua cemento baja.</p> <p>Malas prácticas constructivas.</p> <p>Bajo recubrimiento.</p> <p>Concretos de bajas resistencias.</p> <p>Curado deficiente.</p> <p>Variaciones térmicas.</p> <p>Cargas aplicadas.</p> <p>Impacto vehicular.</p>	<p>Disminución de la resistencia del material.</p> <p>Deformación del material Colapso de la estructura.</p>

Tabla 9. Hormigueros y Segregaciones en estructuras de concreto causas y efectos


DAÑO	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	EFECTOS
<p data-bbox="415 472 648 529">HORMIGUEROS Y SEGREGACIONES</p>  <p data-bbox="310 899 751 927">Hormigueos en la viga de cabezal [7].</p> <p data-bbox="380 1328 682 1356">Segregación en Muro [7].</p>	<p data-bbox="783 500 1094 683">Es la separación del agregado fino de las partículas de mayor tamaño, lo que da lugar a una apariencia de capa erosionada y rugosa [35].</p>	<p data-bbox="1123 500 1451 651">Los hormigueros y segregaciones son generadas teniendo en cuenta las acciones físicas, químicas y mecánicas.</p> <p data-bbox="1123 683 1451 743">Falta de Vibrado en el proceso de fabricación.</p> <p data-bbox="1123 776 1451 862">Distribución inadecuada de los componentes de la mezcla.</p> <p data-bbox="1123 894 1339 922">Cargas aplicadas.</p> <p data-bbox="1123 954 1381 982">Ambientes agresivos.</p>	<p data-bbox="1480 500 1787 560">Disminución en la resistencia de materia.</p> <p data-bbox="1480 592 1787 652">Concentradores de esfuerzos.</p> <p data-bbox="1480 685 1787 745">Propiedades mecánicas no homogéneas.</p>

Tabla 10. Aplastamiento en estructuras de concreto causas y efectos



DAÑO	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	EFECTOS
<p style="text-align: center;">APLASTAMIENTO</p>  <p style="text-align: center;">Fractura por aplastamiento en el pedestal.</p>  <p style="text-align: center;">Fractura por aplastamiento en la viga de cimentación.</p>	<p>Las fracturas y grietas por aplastamiento tienen su origen en la alta concentración de cargas que se presentan en las zonas de apoyo de los elementos simplemente apoyados, o en las zonas de anclaje para el preesfuerzo de torones y cables [7].</p> <p>Los daños por aplastamiento tienden a fracturar la sección de concreto localizada directamente bajo la carga concentrada.</p> <p>Es común la presencia de fracturas por aplastamiento cuando en los elementos de apoyo no existe una transición adecuada mediante mecanismos de amortiguamiento [36].</p>	<p>El aplastamiento es generado debido a orígenes físicos, químicos y mecánicos.</p> <p>Malas prácticas constructivas.</p> <p>Bajo recubrimiento.</p> <p>Concretos de bajas resistencias.</p> <p>Cargas excesivas.</p>	<p>Disminución de la resistencia.</p> <p>Desprendimiento de material.</p> <p>Colapso de la estructura.</p>

Tabla 11. Socavación en estructuras de concreto causas y efectos

DAÑO	DESCRIPCIÓN	TIPOS DE SOCAVACIÓN	CAUSAS	EFECTOS
<p style="text-align: center;">SOCAVACIÓN</p>  <p style="text-align: center;">Puente Banadia (Casanare) [37].</p>  <p style="text-align: center;">Socavación en un estribo, puente meldar (Tolima) [7].</p>  <p style="text-align: center;">Falla de estribo del Puente Unete (Casanare) [37].</p>	<p>Se caracteriza por la remoción (erosión) del material. Normalmente es provocado por el agua o materiales abrasivos transportados por una corriente la cual genera desgaste del concreto y fallas de estabilidad.</p> <p>Son defectos superficiales y subsuperficiales en las vigas de los puentes.</p>	<p>Socavación general: se tiene en cuenta la profundidad total de la socavación en la elaboración de un puente.</p> <p>Socavación local: ocurre sin importar la existencia del puente</p> <p>Socavación por contracción: ocurre debido al estrechamiento del flujo por la fundación del puente.</p>	<p>Las socavaciones son generadas teniendo en cuenta su origen físico, químico y mecánico.</p> <p>FISICOS:</p> <p>Malas prácticas constructivas.</p> <p>Daño sísmico.</p> <p>Daños por impacto.</p> <p>Vibración excesiva.</p> <p>QUIMICOS:</p> <p>Ambientes agresivos.</p> <p>Variaciones térmicas.</p> <p>MECANICOS:</p> <p>Concretos de bajas resistencias.</p> <p>Retracciones Hidráulicas.</p> <p>Cargas aplicadas.</p>	<p>Desprendimiento de material.</p> <p>Volcamiento o colapso de la estructura.</p>

4.4 REVISIÓN DE LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS EN PUENTES Y SU NORMALIZACIÓN.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las etapas correspondientes a los métodos no destructivos empleados en puentes y su normalización, así como la estimación económica de los métodos no destructivos.

En las Tabla 12 y 13 se presentan las características principales de algunas técnicas volumétricas y superficiales empleadas en la evaluación no destructiva de puentes de concreto, en estas se indican las aplicaciones más comunes de cada técnica, los materiales en los que se utilizan y se mencionan algunas limitaciones y ventajas de cada una.

Es importante destacar que en los puentes de concreto se encuentran no solo materiales cerámicos (concreto) si no también metálicos (en los refuerzos, barandas, juntas de dilatación y elementos de acceso), por lo anterior en las técnicas y normas indicadas se hace referencia a técnicas no destructivas que se aplican a este tipo de materiales.

En cuanto a las técnicas no destructivas volumétricas, se debe tener en cuenta que si bien tienen costos mayores, permiten identificar discontinuidades a mayores profundidades. (Ver Tabla 12).

Las técnicas no destructivas superficiales, son mas económicas, fáciles de aplicar, pero algunas solo pueden utilizarse en la inspección de partes metálicas (no porosas ó ferromagnéticas) constituidas de los puentes. (Ver Tabla 13).

En la Tabla 14 igualmente se presentan las características principales de algunas técnicas no destructivas que sirven para estimar la resistencia del concreto y la corrosión que presenta este en sus barras de refuerzo.

Cabe aclarar, los métodos que dan directamente una medida de la resistencia a compresión del hormigón en la estructura en su estado actual, como los ensayos pull out test, break off test, pull off test y el método de resistencia a la penetración (Pistola Windsor) son ensayos llamados semi-destructivos [38].

Tabla 12. Características principales de algunas técnicas volumétricas para la inspección no destructiva

TECNICA	TIPO DE DEFECTO	APLICACIÓN DE LA TECNICA:	NORMA TECNICA	VENTAJAS	LIMITACIONES	COSTOS
Radar de penetración	Grietas, vacíos, localización de objetos en la parte interna (barras de refuerzo), perfiles transversales del material, laminaciones, medición de espesores.	Concretos, pavimentos, materiales compuestos y materiales estructurales.	ASTM: D 6087-08 D5714, D 6432-99.	Cubre una gran área de inspección de manera muy rápida; opera a la velocidad del tráfico cuando inspecciona pavimentos y puentes; genera imágenes en 2D y 3D.	El procesamiento de la información es complejo; no detecta defectos o grietas muy pequeñas.	Muy alto costo de operación del equipo y de operación.
Termometría del infrarrojo de banda dual	Localización de objetos en la parte interna (barras de refuerzo), defectos estructurales, grietas, laminaciones, vacíos.	Concretos, pavimentos, estructuras de concreto reforzado.	ASTM: D4788-03 D4580	Cubre una gran área de inspección de manera muy rápida. Permite mediciones de los elementos internos de una estructura.	Baja sensibilidad para detectar grietas; variaciones en las propiedades del material afectan los resultados.	Alto costo, genera imágenes en 2D y 3D.
Emisiones acústicas	Grietas, velocidad de crecimiento de grietas, fatiga y corrosión.	Metales, aceros estructurales, estructuras de concreto.	ASTM: E 569 E 650 E 749 E 750 E 751 E 1932-07	Localiza puntos de falla con alta precisión; determina parámetros para estimar vida útil de los elementos.	Análisis e interpretación de datos son complejos.	Costo relativamente Elevado.
Tomografía computarizada	Grietas, vacío, inclusiones, porosidad, uniformidad del material, integridad de ensambles.	Fundición, forja, partes maquinadas, soldadura, componentes electrónicos, materiales compuestos.	ASTM: E 1441-11 E 1570-11	Detecta fallas internas; usado en un amplio rango de geometrías y tipos de material, se obtiene información cualitativa y cuantitativa.	No puede detectar defectos muy pequeños ni grietas muy pequeñas; largo tiempo de inspección, riesgo para la salud.	Alto costo de Operación.

Radiografía X Y GAMA	Grietas, inclusiones, Porosidad, Uniformidad del material.	Fundición, forja, partes maquinadas, soldadura, Componentes electrónicos, materiales compuesto.	ASTM: E 94 E 142 E 431 E 592 E 746 E 747 E 801 E 1030 E 1032 E 1316 E 1742	Detecta fallas internas, usado en un amplio rango de geometrías y tipos de material, se obtiene una impresión permanente; se obtiene información cualitativa y cuantitativa.	No puede detectar defectos muy pequeños ni grietas muy pequeñas tales como grietas por fatiga o laminaciones las cuales son perpendiculares al haz de radicación, riesgo para la salud.	Alto costo de operación, genera impresiones en 2D de estructuras en 3D
Ultrasonido	Grietas, adherencia, porosidad, inclusiones, defectos de laminación, corrosión, medición de espesores.	Soldadura, aleaciones, adherencia entre materiales, difusión en el pegado, materiales compuestos, tuberías y tanques a presión	ASTM: E 273 E 587 E 114 E 317 E 664 E 127 E 428 E 797 E 164 E 494 E 213 E 214 E 1316 E 1001	Detecta defectos internos y los muestra en 3D; utilizado en diferentes tipos de geometría y materiales, se obtiene información cualitativa y cuantitativa.	Difícil de aplicar en geometrías complejas; generalmente requiere de agua u otro tipo de acoplante; algunas veces se dificulta la interpretación, relativa insensibilidad para fallas laminares las cuales son paralelas al haz de sonido.	Alto costo debido a la alta dependencia de la habilidad del operador,

Tabla 13. Características principales de algunas técnicas superficiales que se utilizan en END

PRUEBA	TIPO DE DEFECTO	SE PRESENTA EN:	NORMA TECNICA	VENTAJAS	LIMITACIONES	COSTOS
Líquidos Penetrantes	Grietas, vacíos, porosidades y uniones entre piezas laminadas, picaduras superficiales.	Soldadura, forja, maquinados superficiales, fundición, grietas en componentes sujetos a fatiga o esfuerzos debido a la corrosión.	ASTM: E 165 E 433 E 1316 E 1417	Bajo costo de aplicación, fácil de implementar, equipo portátil, fácil de interpretar; tiene alta sensibilidad para discontinuidades abiertas y de poca profundidad.	La falla debe estar abierta en la superficie; requiere inmersión del líquido penetrante. No aplicable a materiales porosos.	El costo difiere de la magnitud del puente que se va evaluar. Si son pocas elementos su valor es bajo.
Corrientes de Eddy	Grietas, vacíos, variación en la composición de las aleaciones o del tratamiento térmico, Medición de espesores.	Barras, varillas, alambre, tuberías, variación en las aleaciones, para medir espesores en recubrimientos.	ASTM: E 215 E 243 E 376 E 428 E 566 E 571 E 690 E 703 E 1004 E 1316	Equipo portátil, sus lecturas y resultados son inmediatos.	Sensible a la geometría; baja penetración, superficial, difícil de interpretar; cambios de conductividad afectan las condiciones de lectura.	Costo moderado.
Partículas Magnéticas	Grietas, vacío, defectos de laminación y unión entre piezas laminadas.	Fundición ferromagnética, Soldaduras ferromagnética, forja, extrusión, laminación.	ASTM: E 125 E 709 E 1316 E 1444	Requiere poca preparación, limpieza; revela discontinuidades que no afloran a la superficie; cuenta con amplio espectro de alternativas de aplicación.	Se aplica sólo a materiales ferromagnéticos; detecta fallas próximas a la superficie; sólo detecta discontinuidades perpendiculares al campo magnético	Es un método rápido y económico.
Imagen Infrarroja	Detección de pequeñas diferencias en temperatura que correlacionen con defectos del material o desempeño de los materiales.	Estructuras laminadas, paneles, circuitos eléctricos y electrónicos, estructuras recubiertas de refractario y maquinaria.	ASTM: E 1311 E 1213 E 1543	No requiere contacto superficial; detecta condiciones que afectan la transferencia o generación de calor en el material; capacidad para realizar inspecciones en tiempo real.	Los resultados son afectados por las condiciones ambientales y de la emisividad superficial.	Su equipamiento es costoso.

Tabla 14. Características principales de algunas técnicas no destructivas para estimar la resistencia del concreto y la corrosión.

TECNICA	SE UTILIZA PARA	NORMA TECNICA	VENTAJAS	LIMITACIONES	COSTO
Martillo De Rebote o Esclerómetro	Identificación rápida de la resistencia a la compresión, uniformidad y calidad del concreto. Se puede hacer una comparación entre partes de una misma estructura y diferentes estructuras de concreto. se puede estimar errores alrededor de un 25%.	ASTM C 805. Indian Standard - IS 13311 (Pt.2). UNE 83-307-86.	Las pruebas se pueden desarrollar a partir de núcleos extraídos del concreto, probetas de referencia con las mismas condiciones del concreto en estudio.	La evaluación es superficial, dependiente de las características del hormigón, tales como tipo de cemento agregado, condiciones de curado edad y tipo de afectación.	Muy bajo costo.
Pruebas de velocidad de pulso ultrasónico	Evaluar propiedades elásticas (modulo elástico dinámico del concreto), calidad del concreto homogeneidad del concreto, presencia de grietas y vacíos y otras imperfecciones en el concreto, cambio en la estructura del concreto con la edad.	ASTM C 597-09 Norma española UNE 83-308-86.	Calidad del concreto respecto a los resultados esperados. La velocidad de pulso ultrasónica es independiente de la geometría del material. La velocidad de pulso puede ser moderado por transmisión directa, transmisión semidirecta y superficie de transmisión indirecta.	Se necesita un medio acoplante adecuado que permita una entrada efectiva del haz sonoro. Los resultados son altamente dependiente de un gran número de variables asociadas con el concreto en estudio tales como la temperatura del concreto, la longitud del trayecto, forma y tamaño del puente, efecto de las barras reforzadas.	Bajo costo.
Pull Off Test	Establecer la resistencia a compresión del hormigón. La resistencia a la tracción del hormigón en obra. La resistencia de la unión de las reparaciones y obras de renovación en superficies de concreto.	British Standard BS-1881	Equipo simple se puede usar manualmente y sus pruebas son rápidas.	Tiempo de curado adecuado necesario para el adhesivo, este adhesivo puede fallar por condiciones ambientales no favorables, por esto es necesario utilizar varios discos para estimar la resistencia a la compresión.	Costo moderado.

<p>Pull Out Test</p>	<p>Resistencia a la compresión del concreto.</p> <p>Determinar si la resistencia en el lugar es suficiente como para la aplicación temprana de cargas.</p> <p>Evaluar la calidad de la cubierta que protege el refuerzo en la estructura terminada.</p>	<p>ASTM C 900-01.</p> <p>British Standard BS-1881 pt. 207.</p>	<p>Control de calidad de la estructura finalizada.</p> <p>Verificación de la resistencia en el lugar cuando las probetas de curado estándar no pasan los criterios de aceptación.</p> <p>Estimado de esfuerzos residuales del concreto en estructuras existentes.</p> <p>Evaluación de estructuras dañadas por fuego.</p>	<p>El número de pruebas de la retirada debe ser decidido en una ubicación determinada con mucho cuidado.</p> <p>Los insertos deben estar ubicados en las partes más críticas de la estructura y suficiente número de pruebas deben llevarse a cabo para proporcionar estadísticamente los resultados.</p>	<p>Costo moderado.</p>
<p>Break Off Test</p>	<p>Este método permite determinar la resistencia a flexión en un plano paralelo y a una cierta distancia de la superficie del hormigón. Presenta algunas similitudes con el ensayo Pull Out.</p>	<p>ASTM C 1150.</p> <p>British Standard BS-1881 207.</p>	<p>Se puede usar para el control de la calidad del concreto.</p> <p>Equipo simple y fácil de usar, rápida.</p>	<p>Tamaño máximo del agregado, espesor mínimo de la probeta de concreto a analizar debe ser de 19 mm.</p>	<p>Costo Moderado.</p>
<p>Método resistencia a la penetración (Pistola Windsor)</p>	<p>Estimar la dureza del material, la cual se puede relacionar con la resistencia.</p> <p>Resistencia a la compresión del hormigón en obra.</p> <p>Para determinar el tiempo de eliminación de forma segura.</p>	<p>ASTM C803 / 803-03.</p> <p>British Standard BS 1881 PART 207</p>	<p>Velocidad y simplicidad.</p> <p>Sirve para medir la dureza del concreto en situ, identifica la no uniformidad del concreto y zonas de bajas.</p>	<p>Causa daños menores a las superficies los cuales se deben reparar.</p> <p>Existe un tamaño mínimo para el miembro de concreto que se va a probar igual que una mínima distancia desde los bordes al miembro del concreto.</p>	<p>Costo Moderado.</p>
<p>Medición de potencial de corrosión - Media Celda</p>	<p>Se utiliza para evaluar las condiciones de corrosión en una estructura de hormigón.</p>	<p>ASTM 876-91.</p>	<p>Detecta la probabilidad de corrosión del acero.</p>	<p>No indica el rango de corrosión del concreto ni la velocidad de corrosión, es necesario tener acceso al reforzamiento, no puede ser utilizado a refuerzos con superficie recubierta, el concreto debe estar húmedo.</p>	<p>Bajo costo.</p>

Medida De Resistividad Eléctrica	<p>Sirve para caracterización de daños especialmente grietas y para verificar la probabilidad de la corrosión en las barras de refuerzo.</p> <p>Una alta resistividad indica la buena calidad del concreto.</p>	No existe.	Equipo portátil, El dispositivo de la sonda puede llegar a medir hasta cuatro resistividades en el concreto.	<p>Método muy lento, cubre pequeñas áreas en el tiempo.</p> <p>La exactitud de la medición del recubrimiento se ve fuertemente influenciada por el tamaño de la barra y por la separación.</p>	Costo Moderado.
Prueba de Carbonatación del concreto	<p>Prueba desarrollada aplicando un indicador a la superficie del concreto recién fracturado.</p> <p>Sirve para detectar carbonatación y corrosión en el concreto mediante la fenolftaleína.</p>	UNE 83993-1:2009.	Se detecta rápidamente la existencia de carbonatación mediante la fenolftaleína y su profundidad se mide con regla.	<p>Se necesitan cámaras de carbonatación in situ en algunos casos.</p> <p>Distorsionan o cambian completamente el mecanismo de corrosión.</p> <p>Son imposibles las estimaciones de durabilidad, salvo que se tengan establecidos coeficientes de correlación previamente.</p>	Bajo costo o Alto costo si se usan cámaras de carbonatación.
Prueba del contenido de Cloro en el Concreto	<p>Detectar la presencia de cloruro en el concreto la cual es la causante de la corrosión en las armaduras.</p> <p>El contenido de cloruros del hormigón también se puede determinar mediante un análisis químico de hormigón en el laboratorio.</p>	ASTM: C 1202 D 512 C 1218M.	<p>Prueba rápida de cloruro (PRC) / electrodo selectivo-cloruro.</p> <p>Equipos portátiles puede ser utilizado para una rápida medición en la obra del contenido de cloruro de hormigón.</p>	<p>La recolección de muestras requiere la extracción de una parte del elemento del hormigón.</p> <p>Requiere tener acceso a los miembros de la estructura y requiere mucho tiempo.</p>	Bajo Costo.

En la Tabla 15 se presentan algunas de las principales normas técnicas utilizadas en el diagnóstico de las estructuras de concreto. En esta tabla se indica la asociación técnica que expide el documento o norma, designación y nombre de la norma, así como un breve resumen de su contenido.

Tabla 15. Documentos y normas técnicas empleadas en ensayos no destructivos de puentes de concreto.

ASOCIACIÓN TÉCNICA	DESIGNACIÓN Y NOMBRE DEL DOCUMENTO Ó NORMA	RESUMEN
<p>NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS ICONTEC</p>	<p>NTC 2034 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. CALIFICACION Y CERTIFICACION DE PERSONAL.</p>	<p>Esta norma especifica la calificación y certificación del personal involucrado en ensayos no destructivos (END) que debe tener un inspector en el país. Es aplicable a la competencia en uno o más de los siguientes métodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ensayos de emisiones acústicas. Ensayos de corrientes de Eddy o Foucault. Ensayos termográficos infrarrojos. Ensayos de fugas (se excluyen los ensayos de presión hidráulica). Ensayos de partículas magnéticas. Ensayos de líquidos penetrantes. Ensayos radiográficos. Ensayos de deformación. Ensayos de ultrasonido. Ensayos visuales (se excluyen los ensayos visuales directos sin ayudas y los ensayos visuales realizados durante la aplicación de otro método de END) [39].
<p>AMERICAN STANDARD TEST METHODS</p>	<p>ASTM D6087-08: Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating</p>	<p>El método de ensayo radar de penetración de tierra (GPR) es actualmente el único método no destructivo que puede evaluar la condición de tableros de los puentes que contengan un revestimiento de asfalto. Estos procedimientos también se puede utilizar en tableros de puente cubierto de hormigón de cemento portland y para tableros de puentes, sin superposición.</p> <p>Este método predice la presencia o ausencia de concreto o barras de refuerzo deterioradas por encima del nivel de la capa superior de refuerzo [40].</p>

AMERICAN STANDARD TEST METHODS	<p>ASTM D4580: Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding.</p>	<p>Esta práctica cubre los procedimientos para la topografía de tableros de hormigón en puentes por sonido para determinar delaminaciones en el hormigón.</p> <p>Los procedimientos que se utilizan en esta práctica son con un dispositivo electro mecánico de sonido, cadena de arrastre y percusión giratoria [41].</p>
	<p>ASTM D4788-03: Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography.</p>	<p>Este método de prueba cubre la determinación de delaminaciones en concreto de cemento portland en tableros de puentes a través de termografía infrarroja.</p> <p>Este método de termografía infrarroja utiliza un escáner de imágenes infrarrojas y grabadora de vídeo el cual esta montado en un vehículo, sirve para detectar defectos estructurales, grietas, vacíos, delaminaciones en áreas de las cubiertas del puente y para registrar la de la información [42].</p>
	<p>ASTM C597-09: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.</p>	<p>Este método de prueba cubre la propagación de la velocidad de los pulsos de ondas longitudinal a través del hormigón.</p> <p>Sirve para evaluar las propiedades elásticas del concreto, calidad del concreto, homogeneidad del concreto, presencia de grietas y vacíos y otras imperfecciones en el concreto.</p> <p>Este método de prueba no se aplica a la propagación de otros tipos de ondas de tensión a través del hormigón [43].</p>
	<p>ASTM C876 - 09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete</p>	<p>Este método de ensayo cubre la estimación del potencial eléctrico de corrosión del acero de refuerzo sin recubrimiento en el campo y de laboratorio, con el propósito de determinar la actividad de corrosión del acero de refuerzo.</p> <p>Este método de prueba está limitado por el circuito eléctrico que se utilice en la Media celda [44].</p>

4.5 PROPUESTA PARA LA INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE PUENTES DE CONCRETO DE VIGA Y LOSA EN SERVICIO.

Para el planteamiento de esta metodología se realizó una investigación de las normas, códigos, libros, publicaciones y metodologías propuestas, tanto nacionales como internacionales, haciendo énfasis en las más recientes y las aplicadas en el país, con el fin de establecer una metodología adecuada a este medio.

A partir de la investigación realizada se establecen los siguientes aspectos:

- Se debe tener en cuenta que una inspección es un conjunto de acciones que van desde una oficina al campo, en el cual se hace una recopilación de información existente (historia del puente, expedientes técnicos del proyecto, planos de diseño y post construcción, inspecciones previas realizadas, etc.), hasta la toma de datos en campo, a fin de conocer el estado del puente en un instante dado.
- Para la inspección de un puente se debe asegurar el tráfico sin riesgo sobre la estructura, y detectar las deficiencias existentes, recomendando las acciones para corregirlas.
- Es importante destacar en este proceso el papel del ingeniero inspector, quien debe proveer información amplia y detallada sobre el estado del puente, como resultado de la inspección, documentando sus condiciones y deficiencias, alertando sobre los riesgos que sus hallazgos tengan en la seguridad del usuario y la integridad de las estructuras, debiendo estar constantemente alerta para que los pequeños problemas no se conviertan en costosas reparaciones.

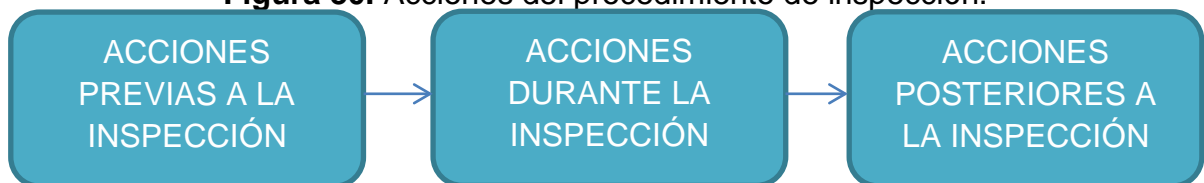
- Para conocer la condición real existente y evaluar cada uno de los elementos del puente, es necesario un programa de inspecciones, el cual debe realizarse en forma organizada.
- El manejo ambiental de los residuos, protección de la flora y la fauna, uso de los cursos de agua, entre otros, deben regirse por el artículo 106 “aspectos ambientales” de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (2007) [3].
- Los puentes en servicio deben ser evaluados, por lo menos, una vez al año, por parte de personal entrenado, específicamente para la identificación y evaluación de daños.
- Los componentes sumergidos del puente deben ser inspeccionados cada tres (3) años con personal especializado. La época más recomendable para realizar esta inspección es al término de la temporada de lluvias, cuando la disminución de los niveles de agua facilite el acceso bajo las obras y se observa los indicios de socavación, que es causa principal del colapso de los puentes [18].
- En casos extraordinarios se deberá disponer de inspecciones especiales. La inspección será visual y física, existiendo otras técnicas avanzadas (destructivas y no destructivas), para inspección específicas de concreto, acero y madera.

4.5.1 Procedimiento de Inspección

El siguiente procedimiento se basa en la realización de una inspección visual adecuada de la estructura, la cual se debe llevar a cabo teniendo en cuenta aspectos técnicos, ambientales y de seguridad industrial acordes al trabajo a realizar.

El procedimiento tiene en cuenta acciones a realizar previas, durante y posterior a la inspección. A continuación se presentan mas detalles de cada una de estas acciones. (Ver Figura 30).

Figura 30. Acciones del procedimiento de inspección.



4.5.2 Acciones Previas



Antes de realizar la inspección. Se debe revisar el inventario y los informes de inspección anteriores, a fin de tener conocimiento de las características del puente, si existen zonas criticas que necesitan de una inspección más detallada o zonas de especial interés. También es necesario tener en cuenta el equipo de seguridad y las herramientas necesarias para la toma de datos durante la inspección visual.

- **Seguridad del Personal Durante la Inspección:** Generalmente las estructuras de los puentes están a la vista, pero en muchos casos será imposible la observación detallada sin los medios auxiliares de acceso a los distintos puntos de la misma. Dentro de los medios auxiliares que facilitan la aproximación y seguridad del personal de la inspección a las distintas

partes de la estructura se incluyen desde los medios básicos (casco, cinturones de seguridad, escaleras, etc, ver Tabla 16) hasta los sistemas muy complejos como las pasarelas y canastillas desarrolladas para la inspección de puentes, pasando por sistemas integrados en la propia estructura (agujeros de acceso a pilares huecas, escaleras de acceso y las vigas en los puentes).

Tabla 16. Equipos y herramientas que se deben utilizar para las inspecciones.

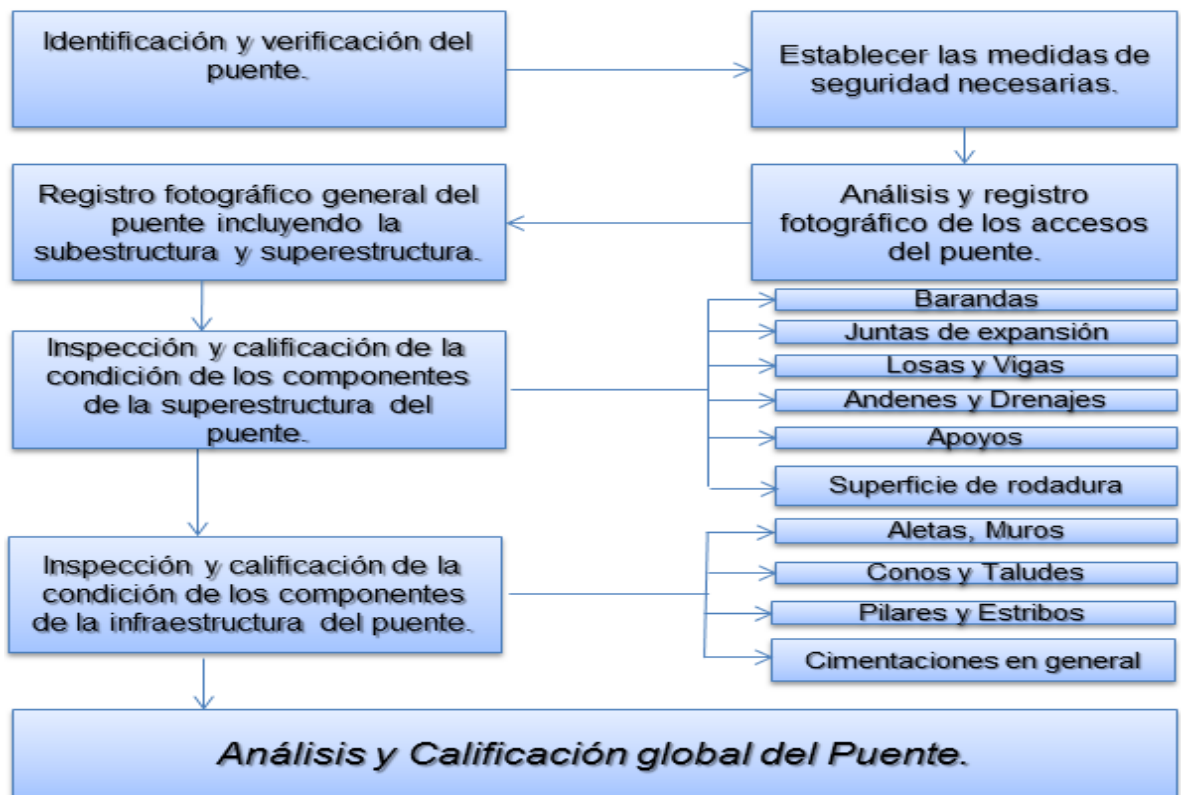
<p>Herramientas para limpieza</p>	<p>Cepillo de alambre. Cinturón de herramientas. Pala plana. Chalecos reflectantes. Casco. Botas. Gafas.</p>	
<p>Herramientas para acceso</p>	<p>Escaleras. Pasarelas. Canastillas. Arneses. Poleas. Chalecos salvavidas. Correa de seguridad.</p>	
<p>Herramientas para ayuda visual</p>	<p>Binoculares. Flexómetro de 5 m. Cinta métrica de 30 m. Plomadas. Nivel de carpintero de 1 m. Lupas micrométricas. Calibrador Vernier. Medidor de grietas óptico. Medidor de espesor de pintura. Termómetro. Crayola o tiza. Espejos de inspección. Tinte penetrante. Endoscopios.</p>	
<p>Herramientas para documentación</p>	<p>Cámaras fotográficas. Libreta de campo. Video cámara.</p>	

Equipo de señalamiento para inspección de calzadas	Conos de plástico. Triángulos. Señales de seguridad	
Otras Herramientas	Caja de herramientas (llaves). Botiquín de primeros auxilios. Radios (walkie-talkies). Linterna. Martillo. Destornillador. Navaja.	

4.5.3 Acciones durante la Inspección

A continuación se señalan algunas acciones básicas que se deberían llevar a cabo durante la inspección. (Ver Figura 31).

Figura 31. Esquema de las acciones sugeridas durante la inspección del puente.



Finalmente debe asegurarse que todas las partes visibles del puente fueron inspeccionadas y que la documentación del levantamiento de información se encuentra completa y correctamente formulada.

Se debe recordar que mediante la inspección visual se pueden encontrar los daños más comunes en las estructuras de concreto, las cuales ya han sido citadas en el presente trabajo ver capítulos 2.2, 2.3, 2.4 y 4.3.

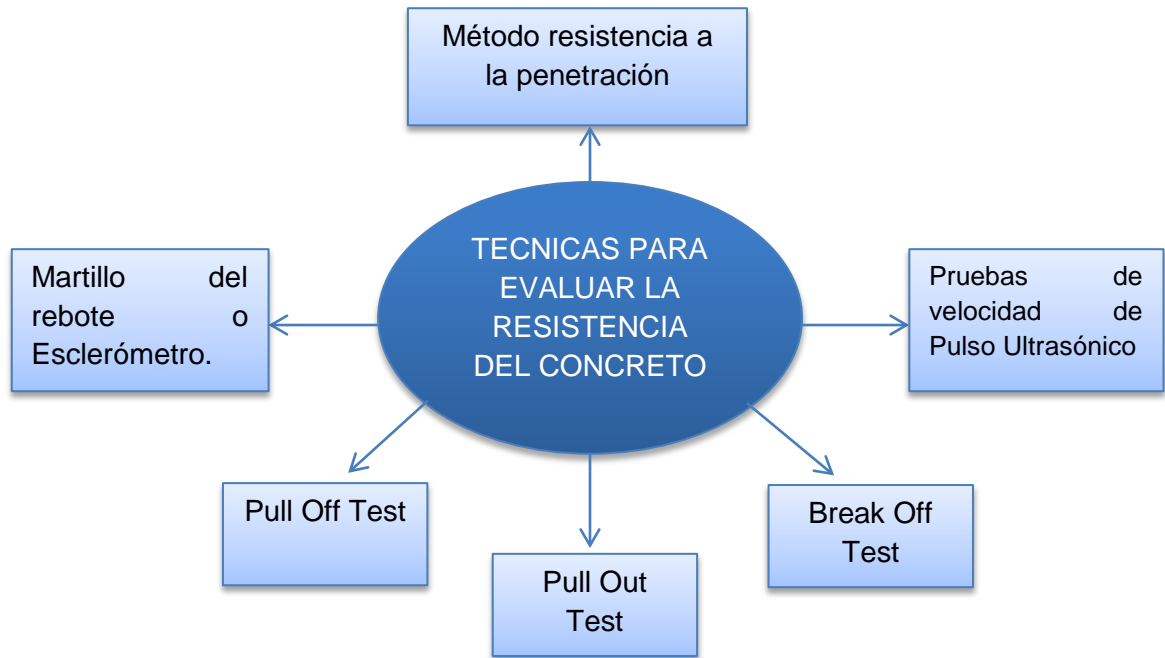
Es importante tener en cuenta que la inspección visual debe complementarse con una auscultación mediante métodos topográficos, magnéticos, eléctricos y químicos para determinar corrimientos, posiciones de armadura y acercarse a la determinación del grado de corrosión de las armaduras, estos métodos pueden ser no destructivos para no debilitar ni dañar la resistencia de los puentes.

4.5.3.1 Pruebas No Destructivas a desarrollar después de la Inspección Visual

Entre los ensayos no destructivos complementarios a la inspección visual, los cuales el ingeniero inspector podrá emplear en la inspección del puente, dependiendo de la disponibilidad de equipos como los costos de estos se encuentran:

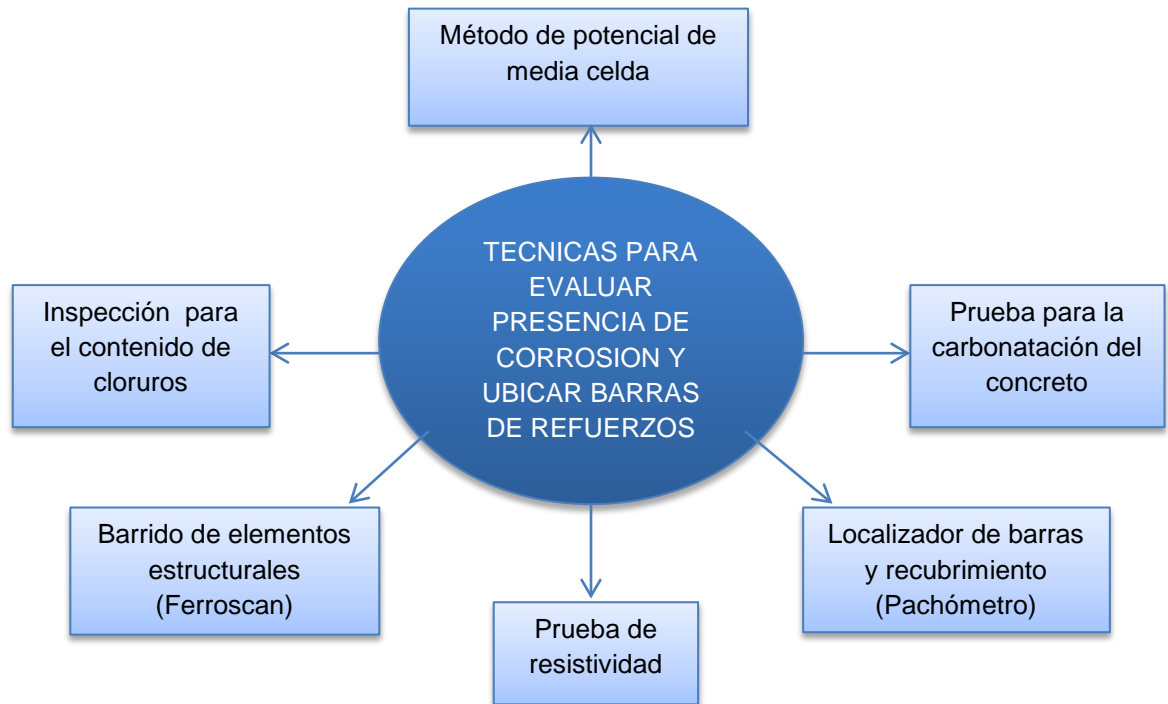
- **Pruebas no destructivas para evaluar la resistencia del concreto.** A continuación en la Figura 32. se presenta las técnicas recomendadas para la evaluación de la resistencia del concreto (Para mayores detalles de las técnicas, características y normalización se encuentran en la Tabla 14).

Figura 32. Técnicas para evaluar la resistencia del concreto.



- **Pruebas no destructivas para evaluar la presencia de corrosión y ubicación de barras de refuerzos:** A continuación en la Figura 33 se presentan las técnicas no destructivas que se pueden emplear para evaluar la presencia de corrosión, ubicación de las barras, diámetro de refuerzo y el espesor de concreto sobre la barra de refuerzo en los puentes de concreto (Para mayor información de las técnicas, características y normalización se encuentran en la Tabla 14).

Figura 33. Técnicas para evaluar presencia de corrosión y ubicación de las barras de refuerzo en el concreto.



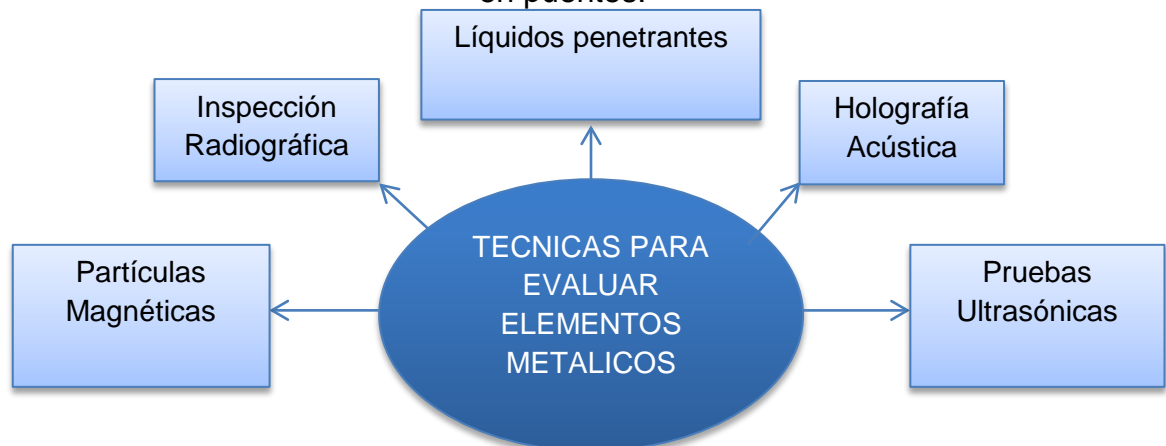
- **Pruebas no destructivas para la evaluación de discontinuidades en puentes:** A continuación se presentan las técnicas empleadas para determinar la presencia de defectos tales como grietas, huecos o vacíos, delaminaciones etc. Ver Figura 34 (Para mayor información de las técnicas, características y normalización se encuentran en las Tabla 12 y 13).

Figura 34. Técnicas para la evaluación de discontinuidades en puentes.



- **Pruebas no destructivas para evaluación de elementos metálicos constituidos del puente:** En la Figura 35 se observan las técnicas no destructivas empleadas para evaluar los elementos metálicos constituidos en los puentes. (Para mayor información de las técnicas, características y normalización se encuentran en las Tablas 12 y 13).

Figura 35. Técnicas No Destructivas empleadas para evaluar elementos metálicos en puentes.



La selección de la técnica o técnicas no destructivas a utilizar dependerá de los aspectos técnicos, disponibilidad de equipos y costos.

4.5.4 Acciones posteriores a la inspección

Después de realizada la inspección al puente, el inspector a cargo deberá redactar un informe final que incluya los datos fundamentales tales como:

- Identificación.
- Características geométricas.
- Características estructurales.
- Calzada y elementos auxiliares.
- Estado de conservación.
- Observaciones y recomendaciones.

También debe indicar la estimación de recursos empleados y la identificación de sitios en estado crítico. Se deben mostrar los detalles de los daños encontrados durante la inspección; incluyendo descripciones, diagramas y fotografías que detallen los defectos hallados, así mismo la ubicación del problema y su extensión.

El inspector debe hacer una comparación de la condición o grado de deterioro. Los diagramas bien elaborados son muy útiles para determinar, en investigaciones futuras, el desarrollo de las fallas y para ayudar a determinar los cambios y su magnitud. De igual manera el inspector podría incluir todas las recomendaciones e instrucciones para la reparación o el mantenimiento correspondiente.

La correcta y oportuna evaluación de cada puente, permitirá a la entidad encargada, en nuestro país el Ministerio de Transporte por medio del Instituto

Nacional de Vías (INVIAS) tendrá que definir las acciones que deben tomarse, ya sea mediante acciones normativas, preventivas y ejecutivas.

- Acciones normativas: Colocación de señales. Limitación de uso (imposición de peso máximo, reducción de velocidad, restricción de un solo carril, etc.)
- Acciones preventivas: Monitoreo de grietas, deformaciones y asentamientos, colocación de apuntalamientos, así como también la realización de inspecciones más frecuentes.
- Acciones ejecutivas: Se refiere a la realización de obras en el puente, considerándose los siguientes niveles de atención: mantenimiento, rehabilitación y mejoramiento.

Cuando el ingeniero inspector identifique que un puente se encuentra en Situación crítica deberá solicitar una inspección especial. Esta será efectuada por un conjunto de especialistas, de los cuales por lo menos uno de ellos será ingeniero civil especialista en estructuras.

Al elaborar el informe hay que tener presente que en base a esta información, podrán proyectarse acciones de mantenimiento y posibles asignaciones de recursos económicos. Además es un registro técnico que puede constituir un elemento importante en algún litigio futuro.

5. CONCLUSIONES

A partir de la investigación realizada sobre la defectología presente y métodos no destructivos utilizados en la evaluación de puentes de concreto reforzado de viga y losa, se puede concluir que:

Para realizar una inspección efectiva de un puente de concreto de viga y losa es importante evaluar la defectología presente en el concreto reforzado, establecer los criterios generales sobre el buen estado de los puentes en servicio, analizar luego los ensayos no destructivos disponibles, sus alcances y costos, para realizar la preparación adecuada de la inspección.

Los defectos en los puentes de concreto pueden tener origen en numerosos factores, desde su diseño, construcción o calidad de los materiales, en el presente trabajo se estudiaron las causas físicas, químicas o mecánicas que producen los daños, así como sus características básicas que permiten su apropiada identificación.

La inspección visual es una técnica fundamental en la evaluación no destructiva de estructuras de concreto. Para su correcta aplicación y aprovechamiento es necesario realizarla de manera programada y documentada con registros. El éxito de la misma dependerá del cuidadoso diseño de las acciones a realizar antes, durante y posteriores a la inspección.

Como cada técnica no destructiva presenta ventajas y limitaciones, es necesario involucrar en la inspección de estructuras de concreto, técnicas no destructivas complementarias, lo cual mejoraría la velocidad de ejecución, la sensibilidad de la detección y cuantificación del daño y compensaría debilidades de algunas técnicas con las fortalezas de las otras.

Los ensayos no destructivos in situ son muy importantes por la rapidez en sus resultados pero sería bueno complementarlos con ensayos de laboratorio.

En la presente investigación se planteó una propuesta de metodología no destructiva, basada en la inspección visual y complementada con otras técnicas no destructivas para la evaluación de resistencia a la compresión in situ, corrosión y otras discontinuidades en estructuras de concreto.

Para las condiciones estudiadas, la propuesta de una evaluación no destructiva que se aplique a los puentes de concreto reforzado en servicio no comprenderá solamente el proceso de inspección utilizando varias técnicas no destructivas para localizar y medir uno o varios defectos en un elemento estructural o mecánico, también todo un análisis con el que se da una interpretación desde el punto de vista estructural o mecánico del comportamiento del material, considerando la localización y características del defecto identificado y las condiciones de carga a las que está sometido. Todo esto se debe hacer con el objeto de calcular la vida útil, o remanente en las condiciones presentes y futuras de operación y establecer un criterio cuantitativo y global de la sanidad del puente.

6. RECOMENDACIONES

Continuar con el estudio de la evaluación no destructiva en los puentes de concreto, haciendo énfasis en las técnicas no destructivas que no se tuvieron en cuenta en el presente trabajo, complementando a la inspección visual.

Aplicar la metodología en la inspección de un puente de concreto reforzado de viga y losa con el fin de valorar la propuesta planteada, verificar su efectividad y de ser necesario agregar, modificar y corregir pautas, procedimientos y/o factores que no fueron tenidos en cuenta en los alcances de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) FAJARDO NIÑO, Javier Alejandro y VIASÚS PÉREZ, Wilson Ernesto. Diseño Simplificado de Puentes. Investigación Científica y Tecnológica. Bogotá: Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia. Programa de Ingeniería de Transporte y Vías, 2007.
- (2) SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES - INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes. Publicación Técnica No. 231 Sanfandila, Qro, 2003. 183 p.
- (3) UNIVERSIDAD PONTIFICIA JAVERIANA – MINISTERIO DE TRANSPORTE - INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS). Manual Para El Mantenimiento De La Red Vial Secundaria (Pavimentada Y En Afirmando), Bogotá, 2007. 179 p.
- (4) SOCIEDAD VENEZOLANA DE INGENIEROS CIVILES (SOVINCIV). Manual de Inspección y Residencia de Obras. 1ra Edición (versión para revisión) Caracas, 2003. 117p.
- (5) CARREÑO, Juan Leonardo y SERRANO, Ricardo Andres. Metodología De Evaluación En Patología Estructural. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela De Ingeniería Civil, 2005. 339p.
- (6) UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS). Estudio e Investigación del Estado Actual de las Obras de la Red Nacional de Carreteras. Manual para la Inspección Visual de Puentes y Pontones. Bogotá, 2006. 53 p.

- (7) HELENE, Paulo y PEREIRA Fernanda. Rehabilitación y Mantenimiento de Estructuras de Concreto. Sao Paulo, 2007. 598 p. ISBN 85-60457-00-3
- (8) WAHEED, Abdul; KOWAL, Ed y LOO, Tom. Manual de Reparación de elementos de puentes de concreto. Alberta, 2005. 19 p.
- (9) MUÑOZ, Edgar y VALBUENA, Edgar. Evaluación Del Estado De Los Puentes De Acero De La Red Vial De Colombia. En: Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 4(2) 125-140
- (10) GONZALEZ DE LA COTERA, Manuel; “IV Coloquio de química del cemento: comportamiento del cemento en la corrosión del acero por cloruros en el concreto armado”; ASOCEM, Perú; 1994.
- (11) YCAZA, Xavier. La Carbonatación el primer cáncer del hormigón (I). [online], 2 octubre 2011 [citado 15 de Diciembre 2011] disponible en internet: < URL: <http://civilgeeks.com/2011/10/02/la-carbonatacion-el-primer-cancer-del-hormigon-i/> //>
- (12) MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA Y MINISTERIO DE TRANSPORTE DE DINAMARCA. Inspección Especial de Puentes. Bogotá, Colombia. 1996.
- (13) MONTENEGRO, Julio. Evaluación de la corrosión en las estructuras de concreto armado. [online], 2 noviembre 2011 [citado 15 de Diciembre 2011] disponible en internet: < URL: <http://civilgeeks.com/2011/11/02/evaluacion-de-la-corrosion-en-las-estructuras-de-concreto-armado-i/> // >
- (14) GOMEZ, Juliana y PALACIOS, Eloy Eduardo. Principales Causas y Posibles Soluciones de las Reclamaciones a nivel patológico en Sistemas de

Edificaciones aporticadas. Trabajo de Grado Especialistas en gerencia de Construcciones. Medellin : Universidad de Medellin. Facultad de Ciencias Economicas y administrativas, 2011. 56 p.

- (15) DAMAZO, José. Las Estructuras no son Eternas. [online], Mayo 2006 [citado 10 de Octubre 2011] disponible en internet: < URL: <http://www.imcyc.com/ct2006/mayo06/TECNOLOGIA.pdf> // >
- (16) D6087 – 08 Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar¹
- (17) HUGENSCHMIDT, Johannes y MASTRANGELO, Roman. GPR inspection of concrete bridges; Elsevier Scientifics Publications, 2006 2006. Pág. 384-392.
- (18) MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES REPÚBLICA DEL PERÚ. Dirección General De Caminos Y Ferrocarriles. Guía Para Inspección De Puentes. Lima, 2006. 80p.
- (19) AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Washington; 2005.
- (20) ACI 318-08, American Concrete Institute. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary; 2008.
- (21) ACI 341.2R-97, American Concrete Institute. Seismic Analysis and Design of Concrete Bridge Systems; 2003.
- (22) ACI 343R.95, American Concrete Institute. Analysis and Design of Reinforced Concrete Bridge Structures; 1995.

- (23) ACI 345R-91, American Concrete Institute. Guide For Concrete Highway Bridge Deck Construction; 1997.
- (24) ACI 345.1R-92, American Concrete Institute. Routine Maintenance of Concrete Bridges; 1997.
- (25) ACI 201.1 R-92, American Concrete Institute. Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service; 1997.
- (26) ACI 201.2R-01, American Concrete Institute. Guide to Durable Concrete; 2001.
- (27) ACI 224.1R-93, American Concrete Institute. Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón; 1993.
- (28) ACI 224.3R-95, American Concrete Institute. Joints in Concrete Construction; 2000.
- (29) FIGUEROA, Tatiana y PALACIO, Ricardo. Patologías, Causas y Soluciones del Concreto Arquitectónico en Medellín. En: Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 10. 2008. 121-130 p.
- (30) BERMUDEZ, Miguel. Corrosión de las armaduras del Hormigón Armado en Ambiente Marino: Zona de carrera de Mareas y Zona Sumergida. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 2007. 421 p.

- (31) Revisión De Deflexiones. Visitado en Diciembre de 2011. [Disponible en internet]. URL: < <http://www.construaprende.com/tesis01/capitulo-3-diseno-puentes-trabe-cajon/33g-revision-por-deflexiones.html>>.
- (32) Deflexiones admisibles en vigas. [online]. Visitado en Agosto de 2011. [Disponible en internet]. URL: < <http://civilgeeks.com/deflexiones-admisibles-en-vigas/>>.
- (33) Diario Noticias. Visitado en enero de 2012. [Disponible en internet]. URL < <http://www.diariodenoticias.com/index.php/opinion/foros/viewtopic.php?f=2&t=51973&start=30>>.
- (34) Análisis de Pandeo por Flexión en Elementos de Inercia Variable con Diversas Condiciones de Sustentación. Visitado en enero de 2012. [Disponible en internet]. URL < <http://www.soloingenieria.net/dmdocuments/estpand.pdf>>.
- (35) Mezclas Asfálticas. Visitado en Noviembre de 2011. [Disponible en internet]. URL < <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/14/34065-14.pdf>>.
- (36) Comportamiento De Vigas De Concreto Armado Reforzadas Con Fibras De Carbono (CFRP). Visitado en Enero de 2012. [Disponible en internet]. URL < <http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/proy16.pdf>>.
- (37) MUÑOZ, Edgar y VALBUENA, Edgar. Socavación de Puentes. En: Infraestructura Vial, Vol 8 (#15), 25-39. 2006.
- (38) HOSTALET, Francisco. Situación Actual De Las Técnicas De Ensayo Nodestructivo Del Hormigón. En: Informes de la Construcción, Vol. 46, n.º 433, septiembre/octubre. 1994.

- (39) NTC 2034. Norma Técnica Colombiana Icontec. Ensayos No Destructivos. Calificación Y Certificación De Personal.
- (40) ASTM D6087-08: Standard Test method for Evaluating Asphalt- Covered Concrete Bridge decks Using Ground Penetrating Radar.
- (41) ASTM D4580-03: Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding.
- (42) ASTM D4788-03: Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography.
- (43) ASTM C597-09: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- (44) ASTM C876 - 09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.