



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

ESTADO DEL ARTE DE LOS ENSAYOS NO-DESTRUCTIVOS EN LA INGENIERÍA CIVIL Y DISEÑO DE UN PROGRAMA DE ENSAYOS PARA EL PUENTE CALLE-CALLE I, VALDIVIA

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante
Sr. Frank Schanack
Dr. Ingeniero

Profesor Co-Patrocinante
Sr. Juan Patricio Reyes
Ing. Civil en Obras Civiles

JESSICA MARÍA JOSÉ ANTIAO SANTIESTEBAN
VALDIVIA – CHILE
2017

Declaración del Estudiante

Soy el único autor de este Trabajo de Titulación y no he utilizado otras fuentes que las que están referenciadas.

Jessica María José Antiao Santiesteban

Declaración de la Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

Este Trabajo de Titulación forma parte del proceso de aprendizaje del estudiante y, por sí sólo, no constituye una investigación verificada ni un proyecto de ingeniería civil validado.

El trabajo fue calificado con la nota 6,83.

*Para mis padres Jessica y Claudio,
mis hermanas Paula y Claudia,
y mi sobrino Rubén.*

Agradecimientos

Estoy profundamente agradecida de todos quienes me apoyaron durante mi carrera, familiares, amigos, compañeros y profesores, en especial mi primo Marcos y a mis amigos Luis, Francisco, Jorge y Paula por su compañía y apoyo en todo ámbito durante el transcurso de este proceso; al Dr.Ing. Frank Schanack, profesor patrocinante de esta tesis, por entregarme su conocimiento, las herramientas necesarias y un espacio en el laboratorio de puentes para realizarla.

También quiero agradecer a mi familia, por ser un pilar fundamental en mi vida. A mis padres Claudio y Jessica, a mis hermanas Paula y Claudia, por su amor, esfuerzo, compañía y apoyo desde el primer momento. A mí sobrinito Rubén por siempre regalarme sus sonrisas y abrazos cada vez que viajo a casa. Espero retribuirles de alguna forma todo el amor que a diario me entregan.

Finalmente quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de estudiar y entregarme día a día la capacidad de aprender y crecer profesionalmente.

Muchas gracias a todos los que formaron parte de este proceso y siguen creyendo en mí.

Resumen

Las patologías de las estructuras es uno de los temas que más se ha estudiado durante los últimos años, las evaluaciones se presentan con mucha frecuencia como una herramienta para estudiar el estado de estas, siendo los Ensayos No-Destructivos una alternativa a considerar para establecer parámetros importantes de la seguridad estructural de las obras civiles en general.

Los Ensayos No-Destructivos son métodos físicos indirectos, que no dañan o alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material, parte o componente sujeto a inspección.

En este trabajo se presenta un estado del arte de los principales Ensayos No-Destructivos de la Ingeniería Civil, clasificando cincuenta tipos de ensayos según el material a ensayar y el principal método de acción, entregando un catálogo en donde cada ensayo posee una ficha indicando su descripción, metodología, características, aplicaciones y normativas.

Se utilizan dos criterios de clasificación, según el *método de aplicación* y según el *material de la estructura a ensayar*. El primero tiene los siguientes grupos de métodos: ópticos, acústicos, radiológicos, electromagnéticos, láser, termográfico, de carga, de dureza y químicos; el segundo tiene las categorías de: hormigón, acero, madera, albañilería y soldadura, también se consideran las inspecciones subacuáticas.

Como ejemplo de aplicación, esta información es usada en la creación de un programa de inspección para el Puente Calle-Calle I de Valdivia, con el fin de identificar sus parámetros desconocidos y estado de conservación. Previamente fueron descritos los pasos para realizar un correcto programa de inspección de obras civiles, enfocándose en detectar las fallas en el hormigón armado como es el caso del puente en estudio.

Summary

Structures pathologies are one of the most studied topics in recent years, evaluations are a lot often presented as a tool to study the state of these, with Non-Destructive Tests being an alternative consider to establish important parameters of structural safety of civil works in general.

Non-Destructive Tests are indirect physical methods, which do not permanently damage or alter the physical, chemical, mechanical or dimensional properties of the material, part or component subject to inspection.

This work presents a state of the art of the main Non-Destructive Tests of Civil Engineering, by classifying fifty types of tests in according to the material to be tested and the main method of action, providing a catalogue in which each test has a file indicating its description, methodology, characteristics, applications and standards.

Two classification criteria are used, according to the *method of application* and according to the *material of the structure to be tested*. The first has the following method groups: optical, acoustic, radiological, electromagnetic, laser, thermographic, loading, hardness and chemical; the second has the categories of: concrete, steel, timber, masonry and welding, underwater inspections are also considered.

As an example of application, this information is used in the creation of an inspection program for the Calle - Calle I Bridge in Valdivia, in order to identify its unknown parameters and conservation status. Previously, the steps to carry out a correct inspection program of civil works were described, focusing on detecting failures in the reinforced concrete as is the case of the bridge under study.

Contenido

Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Summary	v
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	2
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Objetivos	4
1.4 Metodología	5
1.5 Estructura de la Tesis	6
CAPÍTULO II ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE DE CLASIFICACIÓN DE END	7
2.1 Antecedentes	8
2.2 Mecanismos de degradación de los materiales	10
2.3 Integridad estructural	11
2.4 Clasificaciones propuestas	12
CAPÍTULO III CLASIFICACIÓN ENSAYOS NO-DESTRUCTIVOS	22
3.1 Criterios de clasificación	23
3.1.1 Según el método de aplicación:	23
3.1.2 Según el material de la estructura:	23
3.2 CLASIFICACIÓN	24
CAPÍTULO IV CATÁLOGO ENSAYOS NO-DESTRUCTIVOS	26
4.1 IDENTIFICACIÓN	27
4.2 FICHAS	28
1. Inspección Visual	29
2. Endoscopía	30
3. Levantamiento Geométrico	31
4. Escáner Laser 3D.....	32
5. Fotogrametría	33

6.	Microfotografía.....	34
7.	Fisurómetro	35
8.	Tintas Penetrantes	36
9.	Ultrasonido	37
10.	Eco-impacto	39
11.	Emisiones Acústicas	40
12.	Sistema SASW (Análisis espectral de ondas superficiales)	41
13.	Tomografía Ultrasónica.....	42
14.	Cross-Hole	43
15.	Sísmico Paralelo	44
16.	Impedancia Mecánica	45
17.	Sonar 3D	46
18.	Ecosonda.....	47
19.	Georradar.....	48
20.	Radiografía	49
21.	Tomografía Computacional	50
22.	Pacómetro	51
23.	Medidor de Resistencia (Sonda Wenner)	52
24.	Corrosión.....	53
25.	Xilohigrómetro	54
26.	Partículas Magnéticas	55
27.	Corriente de Foucault.....	56
28.	ACFM (Alternative Current Field Measurement)	57
29.	Baticorrómetro	58
30.	Termografía Pasiva	59
31.	Termografía Activa	60

32.	Higrómetro	61
33.	Método de Madurez.....	62
34.	Pull-Out.....	63
35.	Pull-Off.....	64
36.	Break-off.....	65
37.	Método Torrent	66
38.	Prueba de Carga.....	67
39.	Deflectómetro de Impacto.....	68
40.	Dynatim (Ensayo de carga dinámica)	69
41.	Extracción de tornillos.....	70
42.	Resistógrafo.....	71
43.	Gato Plano	72
44.	Hole Drilling	73
45.	Esclerómetro de rebote	74
46.	Resistencia a la Penetración.....	75
47.	Penetrómetro.....	76
48.	Durómetros.....	77
49.	Carbonatación.....	78
50.	Clorímetro	79
CAPÍTULO V PROGRAMA DE END PARA EL PUENTE CALLE-CALLE I.....		80
5.1	Introducción	81
5.1.1	Conceptos básicos	81
5.1.2	Clasificación.....	81
5.1.3	Nomenclatura	82
5.1.4	Definiciones	84
5.1.5	Deterioros y Daños	87

5.2	Procesos de creación de programa de inspección de puentes	90
5.3	Puente Calle-Calle I.....	95
5.3.1	Antecedentes del Puente Calle-Calle I.....	95
5.3.2	Parámetros desconocidos del Puente Calle-Calle I.....	96
5.4	Programa de END Puente Calle-Calle I.....	97
5.4.1	Introducción	97
5.4.2	Conocer la calidad del hormigón endurecido.....	97
5.4.3	Determinar agentes agresivos para la armadura.....	99
5.4.4	Estado y ubicación de armaduras	100
5.4.5	Geometría	102
5.4.6	Comportamiento en servicio	103
5.4.7	Geológicos y de suelos	104
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES		106
CONCLUSIONES.....		107
REFERENCIAS		109
ANEXOS		116
A. Listado de normativa y guías		117
B: Levantamiento Fotográfico Puente Calle-Calle I.....		123
C: Índice de Tablas.....		128
D: Índice de figuras		129

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Para *Dámazo, 2006*, las patologías de las estructuras de hormigón y otros materiales es uno de los temas que más se ha estudiado durante los últimos años. Las evaluaciones de las estructuras que han sufrido algún siniestro, un cambio de uso o destino, o cuyo material tiene una resistencia incierta se presentan con mucha frecuencia. En estos casos, la estimación de la calidad y la seguridad de servicio que la estructura puede seguir brindando a los usuarios no está necesariamente ligada, única y de manera exclusiva a la resistencia a compresión del hormigón y por ello se requieren las evaluaciones, tanto del material como de los elementos estructurales a través de las llamadas Pruebas o Ensayos No-Destructivos, los 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.

Según la definición de *García, 2007*, los Ensayos No-Destructivos son métodos físicos indirectos, que no dañan o alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material, parte o componente sujeto a inspección. Los Ensayos No-Destructivos también se conocen como Pruebas No-Destructivas y se abrevian con las siglas END.

Dentro de la Ingeniería Civil los END están tomando una gran importancia en cuanto a inspección y monitoreo de estructuras. Ofrecen una ventaja sobre los clásicos métodos destructivos, porque se pueden implementar sin generar daños, ya sea en la etapa de construcción de las obras o estando en uso, permitiendo conocer el estado de los elementos internos y externos de las estructuras ya sea su localización y/o caracterización de material, condiciones que no pueden ser visibles en la superficie pero que afectan la durabilidad o rendimiento estructural.

Existen actualmente varias guías y normativa internacional que controlan, enmarcan y sugieren el uso de estos END dentro del área de la Ingeniería Civil, entre ellos se encuentran el código ACI, Normas ASTM, escasa Normativa Chilena, entre otras que son listadas en el Anexo A.

A medida que se sigue investigando y avanzando en la tecnología para la aplicación de estos ensayos se hace necesario la normalización de estos nuevos ensayos que se van desarrollando, ya que muchos quedan a criterio del inspector o evaluador que lo aplica. En Chile existe la norma NCh 2354.Of1999 Ensayos No-Destructivos: calificación y certificación del personal; que es la homologación de la norma internacional ISO 9712 la cual especifica los requisitos de los principios para la calificación y certificación del personal que realiza ensayos industriales no-destructivos (NDT).

El sistema especificado en esta Norma Internacional también puede aplicarse a otros métodos de END o a nuevas técnicas dentro de un método de END establecido, siempre que exista un sistema completo de certificación y el método o técnica esté cubierto por normas internacionales, regionales o nacionales o se haya demostrado que el nuevo método o técnica de END es eficaz a satisfacción del organismo de certificación. A pesar de que la Norma internacional ISO 9712 se ha ido actualizando y su última versión es del año 2012, la NCh 2354.Of1999 sigue vigente para Chile.

En Chile durante diciembre del año 2016 se ha conformado la Asociación Chilena de Ensayos No-Destructivos (ACHEND), dependiente del Instituto Chileno del Petróleo, centrándose en la aplicación de ensayos en la industria petrolera para controlar procesos productivos y sus estructuras. Sin embargo no incluyen la aplicación y certificación de personal fuera de esta área.

La información sobre los distintos END para el área de la Ingeniería Civil no es accesible, ya que principalmente estos ensayos se han estado aplicando y llevan mucho más desarrollo en otras industrias como la mecánica, naval, aeronáutica o petrolera, por lo que se hace necesario tener un compilado de los principales Ensayos No-Destructivos con algunas características y aplicaciones en esta área de la ingeniería, con el fin de ser difundidos, conocidos y sean tomados como alternativa real al momento de realizar inspecciones, debido a sus múltiples ventajas, en las distintas obras, materiales y ambientes.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente no se posee claridad en cuanto a qué END están en desarrollo, cuales ya se encuentran en uso y cuales están normados en ésta área de la ingeniería, por lo que se hace necesario contar o conocer cuáles son estos avances, sus principales características, modos de uso y clasificarlos de forma clara y ordenada en un catálogo.

Para el puente Calle-Calle I de Valdivia se desconocen parámetros y estado estructural actual por lo que se requiere un estudio en profundidad sin necesidad de destruirlo ni dañarlo. Con la información recopilada se diseñará un programa de Ensayos No-Destructivos con el fin de identificar y conocer estos parámetros.

1.3 Objetivos

Objetivo General

- Identificar y describir los actuales Ensayos No-Destructivos usados en la ingeniería civil y diseñar un programa de ensayos para el Puente Calle-Calle I, Valdivia.

Objetivos Específicos

- Realizar búsqueda bibliográfica.
- Analizar ensayos por nombre y tipos.
- Descripción de las características principales de cada uno de los ensayos identificados.
- Realizar levantamiento fotográfico del Puente Calle-Calle I
- Determinar los parámetros desconocidos del Puente Calle-Calle I.
- Asignar ensayos a parámetros desconocidos.

1.4 Metodología

El procedimiento de trabajo utilizado consiste en una búsqueda bibliográfica permanente por medio de internet, biblioteca y entrevistas sobre los principales Ensayos No-Destructivos en la ingeniería civil con tal de realizar:

- Una clasificación de ensayos según su principio de funcionamiento.
- Elaborar de catálogo de estos ensayos.

Luego de obtener la mayor información sobre los Ensayos No-Destructivos que se pueden utilizar en la Ingeniería Civil se procede a:

- Determinar los parámetros desconocidos del puente Calle-Calle I en Valdivia; para esto se reúnen los antecedentes que se encuentran hasta la fecha, además se realiza visita a terreno para efectuar un levantamiento fotográfico.
- Concluyendo finalmente la presente Tesis con un diseño de programa de ensayos para el puente Calle-Calle I Valdivia con tal de en un futuro poder determinar con exactitud y por medio de este tipo de inspección dichos parámetros desconocidos.

1.5 Estructura de la Tesis

El presente trabajo de Tesis se divide en 6 capítulos ordenados desde el planteamiento del problema, el desarrollo y conclusiones, incluyendo referencias y anexos.

CAPITULO I	Presenta una introducción, cual es el planteamiento del problema, objetivos y metodologías de trabajo.
CAPITULO II	Presenta los antecedentes y estado del arte a grandes rasgos sobre los Ensayos No-Destructivos, clasificaciones previamente realizadas y sus criterios.
CAPITULO III	Contiene la clasificación de los Ensayos No-Destructivos y los criterios por los cuales se realizó.
CAPITULO IV	Despliega el catálogo de Ensayos No-Destructivos, donde cada uno posee una ficha con sus principales características y aplicaciones resultado del estudio del Estado del Arte realizado.
CAPITULO V	Se presenta el programa de Ensayos No-Destructivos para el Puente Calle-Calle I, Valdivia, describiendo previamente los pasos para realizar un correcto programa de inspección de obras civiles.
CAPITULO VI	Se presentan las conclusiones, análisis y futuras líneas de investigación de la presente Tesis.
REFERENCIAS	Se presentan las referencias bibliográficas empleadas a lo largo de esta investigación.
ANEXOS	Se encuentran los anexos necesarios para esta Tesis.

CAPÍTULO II ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE DE CLASIFICACIÓN DE END

2.1 Antecedentes

Según *Grosse, 2012*, la sostenibilidad de las estructuras de la Ingeniería Civil se está convirtiendo en un asunto cada vez más importante, sin embargo, se encuentran problemas para evaluar la condición estructural, medir el rendimiento y determinar la vida útil residual de las estructuras o componentes estructurales.

Las técnicas relativas a los Ensayos No-Destructivos y la vigilancia de la integridad estructural pueden ser valiosas para apoyar al ingeniero durante la construcción de nuevos edificios o el mantenimiento de la infraestructura ya existente y ayudar a que sean más sostenibles. Esto requiere un concepto integral para implementar estas técnicas en los planes de construcción y mantenimiento existentes. Es por ello que expone que una aplicación importante de métodos de Ensayos No-Destructivos en la evaluación de estructuras o componentes estructurales para revelar defectos, deterioros o para determinar la condición real.

Los métodos de END pueden soportar inspecciones visuales o mínimas invasivas. Existe una clara necesidad de técnicas precisas, comprensivas y rentables que sean lo suficientemente robustas como para utilizarse en ambientes hostiles. Los métodos No-Destructivos son de primera elección, si las estructuras prohíben las técnicas invasivas como objetos del patrimonio cultural. Los métodos más tradicionales como el esclerómetro de rebote o martillo de Schmidt se complementan cada vez más con métodos avanzados como ultrasonido y eco-impacto, técnicas de radar y microondas, termografía infrarroja, potencial de campo, técnicas inductivas y capacitivas, pero no en una extensión como se desearía.

Las condiciones técnicas y comerciales que son especiales para las estructuras de Ingeniería Civil y la industria de la construcción, impedían una aplicación más amplia de los métodos de END en el pasado. Ahora existen varios desarrollos que pueden alterar estos inconvenientes haciendo que las aplicaciones de END sean más confiables o más rentables, logrando combinaciones de técnicas modernas para el control de calidad, la inspección y la vigilancia de la integridad o salud estructural.

Basándose en la experiencia del constructor o del inspector, las zonas estructuralmente importantes pueden ser monitoreadas. Sin embargo, sin una evaluación adecuada de la condición antes de la supervisión a corto o largo plazo es difícil obtener éxito. Debido a limitados recursos financieros y personales, la combinación de técnicas debe ser lo más eficiente posible. Las técnicas superan los problemas que obstaculizaban sus aplicaciones en el pasado y pueden estar presentes durante todas las etapas de una construcción.

La tabla 2.1 muestra los factores que tienen una influencia significativa sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón, con los métodos de END para su adecuada identificación.

Métodos END	Fenómenos que influyen la durabilidad					
	Estructura geométrica	Macro- y microestructura	Parámetros mecánicos	Discontinuidades del material	Resistencia al agua y gases	Constitución química
Inspección visual	■	■	■	■	□	–
Microscopio	–	■	□	■	□	–
Geodésico	■	–	–	–	–	–
CCTV	□	□	–	□	–	–
Respuesta impulso	–	■	■	–	–	–
Eco-impacto	■	■	–	■	–	–
Sísmica paralela	■	■	–	■	–	–
Ultrasonido	■	■	■	■	–	–
Tomografía Ultrasónica	■	■	–	□	–	–
Emisiones Acústicas	–	□	–	■	–	–
Técnicas radiográficas	■	■	–	■	–	–
Tomografía computarizada	■	■	–	■	–	–
Inducción electromagnética	■	–	–	–	–	–
Técnicas de radar	■	■	–	■	–	–
Técnicas láser estáticas	■	–	–	–	–	–
Técnicas láser dinámicas	■	–	–	–	–	–
Técnicas estáticas esclerométricas	–	□	■	–	–	–
Técnicas dinámicas esclerométricas	–	□	□	–	–	–
Técnicas Termográficas pasivas	–	□	–	□	–	–
Técnicas Termográficas Activas	–	□	–	□	–	–
Cargas de pruebas estáticas	–	–	□	–	–	–
Cargas de pruebas dinámicas	–	–	□	□	–	–

■ - método fundamental, □ - método adicional, – no aplica

Tabla 2.1 Fenómenos que influyen en la durabilidad de las estructuras de hormigón, identificados mediante métodos END (HOŁA. 2015)

De igual forma indica que gracias a la amplia gama (continuamente extendida) de métodos y técnicas para el ensayo de estructuras de hormigón, su estado actual puede diagnosticarse con mayor precisión. Las correlaciones

presentadas entre los principales factores que influyen en la durabilidad de una estructura y los métodos o técnicas básicas de ensayos ilustran las posibilidades de diagnóstico actuales.

2.2 Mecanismos de degradación de los materiales

Un problema mucho más complejo es la predicción de la durabilidad de una estructura, ya que está saturada de incertidumbre sobre los futuros mecanismos de degradación que actuarán sobre ella y los efectos de éstos. Con el fin de mejorar los procedimientos predictivos, es necesario intensificar la investigación sobre el modelado de los fenómenos de degradación sobre la base de los resultados de los ensayos.

Grosse, 2012, identifica los fenómenos que influyen en la durabilidad del hormigón, los cuales se pueden ver en la tabla 2.2. Estos mecanismos de degradación afectan a otros materiales, produciendo de igual modo distintos fenómenos que afectan su durabilidad.

Mecanismos de degradación	Fenómenos que influyen la durabilidad					
	Estructura geométrica	Macro- y microestructura	Parámetros mecánicos	Discontinuidades del material	Resistencia al agua y gases	Constitución química
Procesos reológicos	■	■	■	■	□	—
Congelación/descongelación	□	■	■	■	■	—
Erosión	□	□	—	—	—	—
Cristalización	—	■	■	□	□	□
Lixiviación	—	□	■	—	■	■
Sobrecarga	■	□	□	■	—	—
Fatiga	—	■	■	□	—	—
Influencia de la temperatura	■	□	—	□	—	□
Influencia de la humedad	—	■	■	□	■	□
Carbonización	—	—	□	—	□	■
Corrosión	□	■	■	□	□	■
Impacto ambiental agresivo	—	□	□	—	□	■
Reacciones entre componentes del material	—	■	■	□	□	■
Influencia de organismos vivos	—	□	—	□	—	■

■ - Influencia fundamental, □ - Influencia adicional, — no aplica

Tabla 2.2 Fenómenos que influyen en la durabilidad de las estructuras de hormigón, causados por los principales mecanismos de degradación (HOŁA. 2015).

2.3 Integridad estructural

Ayswarya et al.2016 señala que se ha discutido la monitorización de la integridad estructural utilizando Ensayos No-Destructivos tales como los métodos del “Esclerómetro de rebote” y el “Ultrasonido”. El esclerómetro de rebote proporciona un método simple, rápido y barato de obtener una indicación de la resistencia del hormigón, pero la exactitud de ± 15 a $\pm 20\%$ sólo es posible para las muestras curadas y probadas en condiciones para las cuales se han establecido curvas de calibración. El método del ultrasonido es una herramienta ideal para establecer si el hormigón es uniforme. Se puede utilizar tanto en estructuras existentes como en construcción.

Se puede obtener una correlación bastante precisa entre la resistencia a la compresión del cubo y la velocidad del pulso. Estas relaciones permiten predecir la resistencia del hormigón estructural en $\pm 20\%$, siempre que los tipos de agregado y las proporciones de la mezcla sean constantes. Las pruebas ultrasónicas de velocidad de pulso tienen un gran potencial, particularmente para establecer la uniformidad y detectar grietas o defectos del hormigón.

Ayswarya et al.2016 presenta tres casos de estudios, en ellos se puede observar que los métodos de END, en particular, el método de martillo de rebote y el método de velocidad de pulso ultrasónico son eficaces en la evaluación de condiciones de puentes.

El estudio de caso de la India muestra que existe una correlación entre los resultados de métodos de ensayos destructivos y no-destructivos en la evaluación integral de la condición de la estructura. El monitoreo de los puentes en Malasia indica una buena correlación entre la calificación visual y la fuerza de los resultados del esclerómetro de rebote. Las calificaciones asignadas al puente durante la inspección visual están dentro de un rango aceptable para reflejar la fuerza del puente.

El esclerómetro de rebote tiene potencial para ser una prueba preliminar en la evaluación de la condición del puente. El análisis de puentes en Turquía muestra correlaciones casi perfectas entre los resultados de Ensayos No-Destructivos y los estados de condición basados en inspecciones visuales. Por lo tanto, las diversas técnicas de END disponibles son muy útiles para estimar la calidad y la resistencia de los puentes de hormigón existentes, que se deterioran con el tiempo y eventualmente resultan en fallas.

2.4 Clasificaciones propuestas

Centrándose en los principales Ensayos No-Destructivos que se pueden someter a las estructuras de hormigón *HOLA, et al.2015* propone una clasificación de Ensayos No-Destructivos (ver en la Fig. 2.1); esta muestra una propuesta de división general de los métodos según el principio de acción con el que funciona.

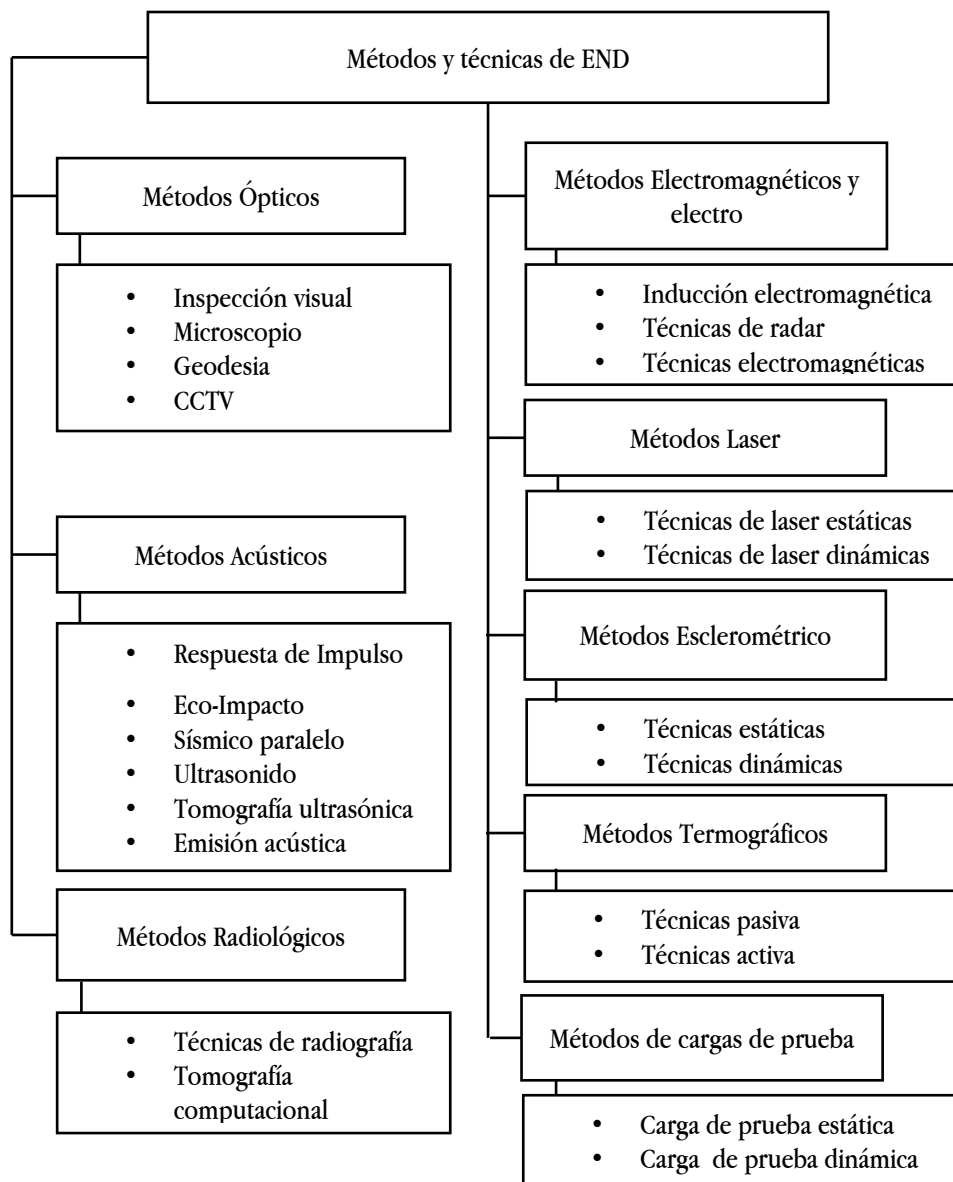


Fig 2.1 Métodos y técnicas básicas de Ensayos No-Destructivos (END) útiles para evaluar la durabilidad de la estructura de hormigón (HOLA. 2015).

Dámazo. 2006 realiza una clasificación de ensayos de hormigón en cuatro áreas según su nivel de destrucción o daño, las cuales son:

Absolutamente no destructivas:

- Inspección visual.
- Medición de grietas.
- Esclerómetro o martillo de rebote.
- Velocidad de transmisión de ultrasonido.
- Detección del acero de refuerzo e instalaciones.
- Medición de la madurez del hormigón.

Pruebas con un mínimo efecto destructivo:

- Resistencia del hormigón a la penetración. Pistola de Windsor.
- Extracción de insertos o de Pull-Out.
- Análisis petrográficos de hormigón endurecido.

Pruebas ligeramente destructivas:

- Extracción de núcleos y/o vigas.
- Determinación de la humedad y densidad del hormigón.
- Determinación de la adherencia.
- Determinación de la carbonatación.
- Determinación de la corrosión.
- Determinación de la permeabilidad.
- Arranque de cilindros colados in situ o Brake-Off.
- Cilindros colados in situ.

Pruebas que pueden ser destructivas:

- Pruebas de carga y deformación.

Es importante mencionar que este autor considera que se debe conocer en qué casos aplicar una u otra y lo que se puede esperar de cada una.

Ahora, relacionando esto con las estructuras de puentes, *Kashif, et al. 2016* realiza una revisión de métodos de Ensayos No-Destructivos en puentes de hormigón, la metodología, las ventajas y las desventajas junto con la investigación actualizada sobre los métodos de END, diferentes niveles de daño, tener menos dependencia del

juicio de los operadores. También se sugieren métodos de END para abordar problemas específicos relacionados con las estructuras. Finalmente, La relación entre algunos de los métodos bien conocidos de END y los problemas más comunes encontrados por los ingenieros. Por lo tanto, se destaca la importancia del monitoreo de la integridad estructural.

Para todo ello se debe tener en claro que la degradación del hormigón, la corrosión del acero, y el debilitamiento de las conexiones a lo largo de las estructuras son las principales preocupaciones en los puentes de carreteras. Si un puente dañado permanece sin reparación, la integridad estructural y la capacidad de servicio del puente se deterioran con el tiempo.

Las Ensayos No-destructivos ofrecen habilidades a los ingenieros y propietarios para acelerar, examinar y monitorear las estructuras. Estos métodos se utilizan para detectar el daño y mantener vigilada la salud local. Además, con esto se puede evitar el colapso prematuro de las estructuras.

La Ingeniería Civil, ingenieros y especialistas utilizaron principalmente los métodos de END para obtener información de la contra-comprobación relacionada a las estructuras y no como una parte integral de los procedimientos de prueba. La razón principal de esto es la falta de conciencia sobre las pruebas de procedimientos, manejo de equipos y recogida de los datos usando END.

Según ACI 228.2R-98, métodos de END se utilizan en la industria de la construcción principalmente por las siguientes razones.

- Control de calidad en nueva construcción.
- Solución de problemas
- Evaluación de la condición de las estructuras existentes.
- Garantía de calidad de los trabajos de reparación.

Kashif, et al. 2016 seleccionan los métodos de END según su costo económico y las capacidades de acceso físico, clasificándolas según su fuente. Por ejemplo las técnicas que se basan en el carácter audiovisual y las características del operador se agrupan en métodos Audiovisuales, mientras que las técnicas que utilizan las ondas de esfuerzo para la detección de los daños y propiedades del material se colocan en métodos de ondas de esfuerzos, por otro lado las técnicas que utilizan las señales de electroerosión para el análisis de materiales se colocan en la categoría de electromagnéticos, mientras que las técnicas que definen los resultados se colocan bajo el encabezamiento de los métodos determinísticos, por último, se incluyen otros métodos de prueba como el método

de vibración, el método de infrarrojos y los métodos radiográficos. También es importante considerar las capacidades y limitaciones de cada ensayo.

En la industria de la construcción, la mayor parte de los ingenieros y especialistas están satisfechos mediante el uso de métodos de END porque usan métodos apropiados para un problema específico. Por tanto, se recomienda hacer estudios preliminares antes de seleccionar cualquier método de END. En la literatura, este estudio se conoce normalmente como estudio teórico. La inspección es un hecho para seguir la evolución o el posible deterioro de la condiciones de trabajo del puente y para permitir la toma oportuna para su reparación, rehabilitación y / o tratamiento de emergencia, tales como el fortalecimiento o cierre. La inspección periódica de la estructura es el primer paso para la vigilancia de la salud continua, identificado los niveles de daño sobre la base de la inspección regular.

Entre las recomendaciones de *Kashif* se encuentran las siguientes:

- Para aquellas estructuras que son inaccesibles, las pruebas dinámicas, la tecnología de infrarrojos y de radar son la mejor opción. Además, el monitoreo global y local de las estructuras en tiempo real hace que las emisiones acústicas sea un método preferido comparado con otros métodos de END.
- Para puentes de largo alcance, es muy difícil inspeccionar visualmente todas las porciones o elementos del puente. La prueba de carga es especialmente buena para estructuras de piedra y mampostería, cuyos diseños y parámetros de diseño son desconocidos. Sin embargo, en las estructuras de hormigón armado sus detalles estructurales se pueden encontrar usando el método electromagnético y el “coring” (núcleo). El golpe de moneda, la cadena de arrastre y los ensayos esclerométricos son de bajo costo en la naturaleza, pero estas pruebas dependen de factor humano, lo que hace las hace menos fiables. Los operadores pueden utilizar estos métodos para la inspección periódica, ya que darán un mejor entendimiento sobre la estructura.
- Las pruebas sónicas y ultrasónicas son más confiables y tienen más capacidad para resolver problemas máximos si se resuelve correctamente el problema del acoplamiento. GPR, eco impacto y termografía infrarroja también proporcionan un análisis fiable de la estructura, si se abordan las deficiencias de estos métodos.
- Estos métodos pueden proporcionar resultados deterministas. Las pruebas eléctricas pueden realizarse rápidamente en cualquier momento y en cualquier circunstancia, pero estas pruebas proporcionan información relacionada únicamente con el refuerzo. Por otra parte, las pruebas eléctricas no son útiles para la mampostería de ladrillo y estructuras de piedra. Las pruebas basadas en radiación proporcionan

buena información sobre la existencia de vacíos y grietas, pero los rayos X, los rayos gamma y los rayos neutrónicos son peligrosos para el operador y la comunidad. Por lo tanto, se requiere un gran cuidado durante estas pruebas. Las pruebas dinámicas y de vibración son fiables y ampliamente utilizadas en la industria civil. Sin embargo, estas pruebas no son capaces de elegir el problema relacionado con los aparatos de apoyos. Si se utilizan END en combinaciones, entonces proporciona información detallada y fiable.

- Algunos de los métodos de END se desarrollan para algunas industrias específicas, como la radiografía para la industria médica, GPR para el geólogo y la geofísica, métodos eléctricos para resolver los problemas eléctricos. Por lo tanto, existe una fuerte necesidad de introducir una nueva disciplina que llene la brecha entre la Ingeniería Civil y estas tecnologías.

Es relevante mencionar a Lee, *et al.* 2014, ya que presenta una visión general de cómo los métodos de Ensayos No-Destructivos están impactando Los Estados Unidos. Con el fin de que los investigadores y los responsables de la formulación de políticas de ese país tengan una comprensión clara de cómo se pueden mejorar las estrategias de gestión de puentes.

Los autores realizaron una revisión exhaustiva de los manuales de inspección de puente de los departamentos estatales de transporte del estado, para identificar cómo se incorporan los métodos END en los sistemas estatales de gestión de puentes, para reflejar sus propias condiciones locales y en qué situaciones se consideran.

Se encontró que el total de treinta estados tienen sus propios manuales de inspección de puentes, entre los cuales ocho abordaron el uso de métodos de END en sus manuales de inspección explícitamente. Sólo un estado, Indiana, discutió los métodos END y sus aplicaciones en detalle en una sección separada, esto demuestra que aún falta mucho por discutir e informar acerca de estos ensayos.

Este autor separa los Ensayos No-Destructivos según el tipo de puente al cual se puede aplicar, teniendo dos clasificaciones, la primera es en puentes de hormigón, mientras que la segunda hace referencia a puentes de acero.

Para la inspección de estructuras de hormigón se eligieron dieciséis métodos de END, estos son:

1. Emisión acústica
2. Método eléctrico
3. Maquinaria de detección de delaminación

4. Radar de penetración en tierra
5. Métodos electromagnéticos
6. Velocidad del pulso
7. Pruebas de eco-impacto
8. Termografía infrarroja
9. Pruebas ultrasónicas
10. Pruebas ultrasónicas con láser
11. Método magnético
12. Sonda de neutrones
13. Método nuclear
14. Pacómetro
15. Hormigón inteligente
16. Rebote y penetración.

Mientras que para la inspección de estructuras de acero Se eligieron nueve métodos de END, estos son:

1. Emisión acústica
2. Sensores de corrosión
3. Pintura inteligente
4. Pruebas penetrantes
5. Partículas magnéticas
6. Pruebas radiográficas
7. Pruebas ultrasónicas
8. Corrientes de Foucault.(Pacómetro)
9. Inspección robótica.

Finalmente concluye que para lograr una buena inspección de puentes se debe mantener un nivel aceptable en su normativa, para ese propósito se han desarrollado muchos métodos de END como una herramienta para ayudar a facilitar la gestión de puentes, pero se encontró que cada método tiene algunos inconvenientes y limitaciones. Este hallazgo también es consistente con observaciones sobre métodos de END hechas por el grupo conjunto AASHTO/ASCE (2009).

La cantidad de estados que nombran a los END entre sus documentos de inspección es algo decepcionante, ya que se esperaba que muchas agencias estatales estadounidenses indicaran los tipos de métodos de ensayos No-Destructivos y sus procedimientos de solicitud y situaciones para adaptarlas para sus condiciones locales.

Se destaca en este análisis el “*Indiana Bridge Inspection Manual*” manual de inspección de puentes del estado de Indiana, ya que solamente este manual mantiene una sección separada para describir los métodos de ensayos No-Destructivos en detalle, significando que este manual de control podrá reflejar las condiciones locales por sobre cualquier otro manual sobre cómo, cuándo y dónde se aplican los métodos de END.

El Gobierno de India por medio del ministerio de ferrocarriles, realiza una guía para pruebas no destructivas en puentes BS-103, 2009, la cual sienta las bases para realizar estos END en dicho país, ya que se considera que las pruebas no destructivas de puentes han supuesto una mayor importancia en el escenario actual, porque su sistema de inspección existente no era adecuada para identificar los defectos internos en las estructuras. Además con los recientes colapsos de puentes en la India y en otros países vecinos, se hace necesaria la creación del documento.

Este documento indica que en India el *Indian Railway Bridge Manual* (IRBM) indica la importancia de tener un monitoreo constante de puentes por un organismo independiente que realice un monitoreo de corrosión, deterioro del material, daños en el sistema, etc. Todos estos se pueden hacer usando métodos apropiados de END. Dado que el trabajo será ejecutado por una agencia independiente, es importante entender los detalles de los procedimientos de prueba como el ingeniero puede y tienen que supervisar el trabajo in situ. Los diversos métodos utilizados para diferentes tipos de puentes se han incluido en esa publicación con tal de que la guía entregada sea muy útil para los ingenieros del área, a quienes se confía el trabajo.

Esta guía concluye con un breve resumen de ensayos que se puede ver en la tabla 2.3 que contiene sus usos según el material y parámetro desconocido:

- Evaluación de la resistencia del hormigón, evaluación de la corrosión
- Ubicación y diámetro de las barras de refuerzo y su recubrimiento
- Medición de fisuras, cambios de longitud, la deflexión en, edificios y estructuras
- Ensayos No-Destructivos en puentes de acero
- Ensayos No-Destructivos en puentes de mampostería

Medición	Aplicación	Equipo
Evaluación de la resistencia del hormigón		

Resistencia superficial (Número de rebote)	Evaluación de la resistencia de la superficie.	Martillo de rebote.
Homogeneidad del hormigón	Calidad del hormigón.	Ultrasonido: Velocidad de pulso.
Combinación de ultrasonido y número de rebote	Uniformidad /homogeneidad, ubicación de defectos internos.	Ultrasonido: Velocidad de pulso.
Resistencia a la tracción	Evaluación de la resistencia en la superficie.	Pull-Off.
Fuerza de extracción	Evaluación de la resistencia en la superficie.	Pull-Out.
Prueba de rotura	En la prueba de ruptura el fallo puede estar relacionado con la resistencia a la compresión o a la flexión.	Prueba de rotura.
Resistencia a la penetración	Evaluación de la resistencia en la superficie.	Sonda Windsor.
Fuerza del núcleo (Microcore)	Evaluación local de la fuerza in-situ.	Aparato de prueba de Microcore.
Prueba de permeabilidad	Determinar la permeabilidad al aire del hormigón de la cubierta.	Prueba de permeabilidad.
Prueba de adhesión	Mide la unión o la resistencia a la tracción directa entre dos capas.	Test de adherencia.
Medición de madurez	Estima la fuerza del hormigón.	Medidores de Madurez.
Técnica estructural completa	Detectar daños y evaluación general de estructuras.	Equipos de pruebas estructurales completos.
Evaluación de la corrosión, ubicación y diámetro de las barras de refuerzo y su recubrimiento		
Potencial de corrosión (media celda)	Estado de la corrosión.	Potencial de corrosión (media celda).
Resistividad	Velocidad de corrosión probable	Medidor de resistencia.
Profundidad de Carbonatación	Riesgo de corrosión y causa	Kit de prueba de carbonatación.
Contenido de Cloruros	Riesgo de corrosión y su causa.	Sistema de Test de terreno de cloruros.
Huecos y corrosión	Viendo el interior del hormigón.	Endoscopía.
Escaneo y diámetro de las barras de refuerzo y el recubrimiento	Se utiliza para conocer la ubicación y diámetro de las barras de refuerzo y el recubrimiento de hormigón.	Pacómetro.
Medición del recubrimiento y la barra	Riesgo de corrosión y causa.	Microcontrolador.
Medición de fisuras, cambios de longitud, deflexión en edificios y estructuras		
Cambios de longitud	Medición de la deformación.	Medición y medidores de tensiones digitales.

Imágenes de infrarrojos	Grietas, delaminación.	Sistema de imagen térmica por infrarrojos.
Técnicas de emisiones acústicas	Para medir la ubicación y actividad de las grietas.	Sistema SPARTAN & MISTRAS Sistemas de emisión acústicas.
Radar de pulso corto	Detección de la delaminación en hormigón, grado de hidratación del hormigón, contenido de agua del hormigón fresco, medición del espesor de capa del hormigón.	Sistema de radar de pulso corto.
Método de propagación de estrés	Basado en la propagación de ondas de esfuerzo, usado para Ensayos No-Destructivos de hormigón.	Equipo de propagación de ondas de esfuerzos.
a) Métodos de Eco pulso	Medidas de espesor, detección de caudal y pruebas de integridad de las pilas.	
b) Método de Eco-impacto	Medidas de espesor, detección de caudal y pruebas de integridad de las pilas.	
c) Método de respuesta al impacto	Para probar pilas y estructuras de losa.	
Medición de ancho de fisura	Medición de ancho de fisura.	Microscopios, ancho de fisuras para paredes y ángulos.
Examen de endoscopia	Condición interna del hormigón, estados de los tendones de pretensado.	Alcance de perforación, cortador del núcleo.
Método nuclear	Para medir el contenido de humedad en el hormigón.	Medidor de humedad de neutrones.
Equipos de escaneo estructural	Es un sistema completo de inspección de hormigón. También se utiliza para la inspección de la fundación.	Georradar.
Análisis espectral de onda superficial de las fundaciones desconocidas	Medición de la profundidad de las fundaciones desconocidas.	Equipo SASW (Análisis espectral de ondas superficiales).
Ensayos No-Destructivos en puentes de acero		
Método de tinte penetrante	Se usa para revelar defectos superficiales por medio de purga de un tinte coloreado o fluorescente de la falla.	Equipo de tinte penetrante.
Inspección por partículas magnéticas (MPI)	Para detectar defectos en la estructura.	Equipos de partículas magnéticas para inspección.
Corriente de Foucault	Grietas, vacíos, nidos.	Medidor de corriente de Foucault.

Pruebas radiográficas	Da sombra en la imagen de un objeto o película mediante el uso de radiación penetrante, tales como rayos x o rayos gamma.	Test Radiográfico.
Prueba de integridad de la pila Cross-hole	Prueba de integridad de la pila.	Equipo de prueba ultrasónica Cross-hole
Técnica estructural completa	Detectar daños y evaluación general de estructuras.	Equipos de pruebas estructurales completos
Técnicas de emisión acústica	Para medir la ubicación y la actividad de las grietas.	Sistema SPARTAN & MISTRAS
Ensayos No-Destructivos en puentes de mampostería		
Módulo de deformación de esfuerzo	Deformabilidad in-situ del esfuerzo y resistencia de ladrillos o mampostería de piedra.	Gatos planos y accesorios.
Método de Eco-impacto	Medidas de espesor, detección de caudal y pruebas de integridad de las pilas.	Equipo de propagación de ondas de esfuerzos.
Radar de pulso corto	Detección de la delaminación, grado de hidratación, contenido de agua y medición del espesor de capa.	Sistema de radar de pulso corto.
Imágenes de Infrarrojo	Grietas, delaminación.	Sistema de imagen térmica por infrarrojos
Examen de endoscopía	Condición interna del material, condición de tendones pretensados.	Boroscopio.

Tabla 2.3 Breve descripción de equipos de END y su uso (BS-103. 2009)

CAPÍTULO III CLASIFICACIÓN ENSAYOS NO-DESTRUCTIVOS

3.1 Criterios de clasificación

Para realizar las clasificaciones de los Ensayos No-Destructivos se utilizaron dos criterios distintos: Según el método de aplicación y según el material de la estructura en el que se utiliza.

En esta clasificación se consideraron cincuenta END, los que son más representativos y prácticos al momento de realizar las inspecciones en las distintas estructuras civiles.

3.1.1 Según el método de aplicación:

Este criterio hace referencia al principio de acción de los métodos o la finalidad de su aplicación. Los grupos utilizados son los siguientes:

- Métodos Ópticos: aquí se encuentran los métodos que utilizan el espectro de visión humano para su funcionamiento.
- Métodos Acústicos: en este ítem se encasillan los métodos que utilizan ondas acústicas para su funcionamiento.
- Métodos Radiológicos: Estos métodos utilizan radiaciones para efectuar los ensayos.
- Métodos Electromagnéticos: estos métodos utilizan ondas eléctricas y/o electromagnéticas para realizar el ensayo.
- Método Laser: estos métodos utilizan rayos laser para realizar sus mediciones.
- Métodos Termográficos: en este apartado se encuentran los ensayos que utilizan diferencia de temperatura como principio de acción.
- Métodos de Carga: Estos ensayos consisten en la aplicación de carga y resistencia para realizarlos.
- Métodos de Dureza: En este apartado se encuentran los ensayos cuya finalidad sea obtener la dureza del material a ensayar.
- Métodos Químicos: en este método se encuentran los ensayos que utilizan reacciones químicas para su funcionamiento.

3.1.2 Según el material de la estructura:

Los materiales empleados en la Ingeniería Civil poseen distintas características, por lo que los Ensayos No-Destructivos se clasificarán según el material al cual se puede aplicar, estos serán hormigón, acero, madera, albañilería (mampostería) y soldadura; también se considerarán las inspecciones subacuáticas.

3.2 CLASIFICACIÓN

En la siguiente figura se encuentra de forma gráfica la clasificación de los ensayos según su método de aplicación, acción o fin. Al final de cada nombre se encuentra un número, el que corresponde al número de ficha que describe el método a grandes rasgos y de manera general.

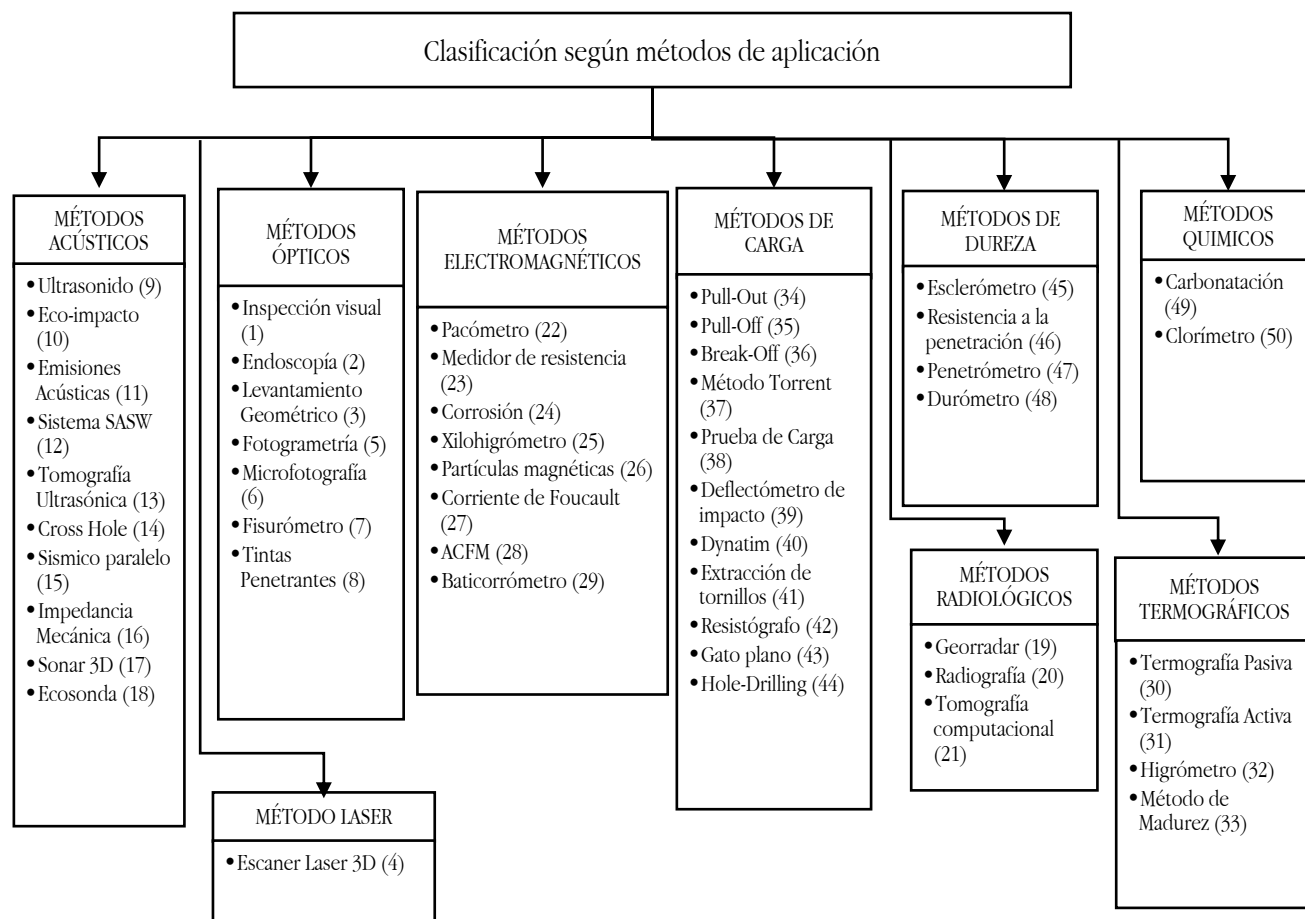


Fig 3.1 Clasificación de END según métodos de aplicación. El número que acompaña al ensayo indica el número de ficha correspondiente a dicho ensayo.

En la tabla 3.1 se encuentra la clasificación según el material que compone los elementos de la estructura a ensayar y el tipo de método; acá también se encuentran los ensayos que se pueden realizar en una inspección subacuática. En la primera columna se encuentra el material de los elementos a ensayar, mientras que en la primera fila se describen los métodos según su aplicación. Esta tabla funciona como matriz indicando el tipo de método y el material en el que se puede utilizar.

Tabla 3.1 Clasificación de END según el material que compone la estructura y el tipo de método. El número que acompaña al ensayo indica el número de ficha correspondiente a dicho ensayo.

	ÓPTICOS		ACÚSTICOS		RADIOLÓGICOS		ELECTROMAGNÉTICOS		LASER		TERMOGRÁFICOS		CARGA		DUREZA		QUÍMICO					
HORMIGÓN	Inspección Visual	1	Ultrasonido	9	Georradar	19	Pacómetro	22	Escáner laser 3D	4	Termografía Pasiva	30	Pull-Out	34	Esclerómetro	45	Carbonatación	49				
	Endoscopía	2	Eco-impacto	10	Radiografía	20	Medidor de resistencia	23		Termografía Activa	31	Pull-Off	35	Resistencia a la penetración	46		Clorímetro	50				
	Levantamiento		Emisiones acústicas	11	Tomografía computacional	21	Corrosión	24		Higrómetro	32	Break-Off	36									
	Geométrico	3	Sistema SASW	12						Método de Madurez	33	Método Torrent	37									
	Fotogrametría	5	Tomografía ultrasónica	3						Prueba de carga	38											
	Microfotografía	6	Cross Hole	14						Deflectómetro de impacto	39											
	Fisurómetro	7	Sísmico paralelo	15																		
			Impedancia Mecánica	6																		
ACERO	Inspección Visual	1	Ultrasonido	9	Radiografía	20	Partículas Magnéticas	26	Escáner laser 3D	4	Termografía Pasiva	30	Prueba de carga	38	Durómetro	48						
	Levantamiento					Corrientes de Foucault	27	ACFM		28	Termografía Activa	31										
	Geométrico	3																				
	Fotogrametría	5																				
	Microfotografía	6																				
	Tintas Penetrantes	8																				
MADERA	Inspección Visual	1	Ultrasonido	9	Georradar	19	Xilohigrómetro	25	Escáner laser 3D	4	Termografía Pasiva	30	Prueba de carga	38	Penetrómetro	47						
	Endoscopía	2	Emisiones acústicas	1	Radiografía	20		Termografía Activa		31	Dynatim	40							Esclerómetro	45		
	Levantamiento		Tomografía computacional	21	Extracción de tornillos	41																
	Geométrico	3																			Resistógrafo	42
	Fotogrametría	5																				
	Microfotografía	6																				
ALBAÑILERÍA	Inspección visual	1					Ultrasonido	9	Georradar	19		Escáner laser 3D	4	Termografía Pasiva	30	Gato Plano	43	Esclerómetro	45			
	Endoscopía	2	Eco-impacto	10		Termografía Activa	31	Hole Drilling	44													
	Levantamiento		Emisiones acústicas	11																		
	Geométrico	3																				
	Fotogrametría	5																				
SOLDADURA	Inspección visual	1	Ultrasonido	9	Radiografía	20	Partículas Magnéticas	26														
	Tintas Penetrantes	8		Corrientes de Foucault	27																	
INSPECCIÓN SUBACUATICA	Inspección visual	1				Ultrasonido	9	Radiografía	20	Partículas Magnéticas	26							Durómetro	48			
			Sonar 3D	17		Corrientes de Foucault	27	ACFM	28													
			Ecosonda	8						Baticorrómetro	29											

CAPÍTULO IV CATÁLOGO ENSAYOS NO-DESTRUCTIVOS

4.1 IDENTIFICACIÓN

Se realiza un catálogo de Ensayos No-Destructivos en donde se reúne de forma resumida y en un formato estándar en forma de ficha toda la información recopilada en el estudio del Estado del Arte de los END en la Ingeniería Civil. Estas fichas están divididas en secciones donde se encuentra la identificación del ensayo que contiene: descripción, fotografía, metodología, características, aplicaciones, normativa. Todas descripciones globales que permiten conocer a grandes rasgos su principio de acción por medio de la clasificación anteriormente hecha.

Toda ficha posee un número de identificación, el cual es utilizado para referenciarlo en la clasificación, hay ensayos que se utilizan de distintas formas según el material de la estructura a ensayar, pero poseen las mismas características físicas, por lo que para estos ensayos se realizó una sola ficha, la cual contiene información del ensayo aplicado principalmente a las estructuras de hormigón.

A continuación se detalla la información que posee cada ensayo, siempre que se encuentre referencia de esta.

Descripción: en este apartado se relata de forma breve cual es la finalidad y utilidad del Ensayo No- Destructivo.

Metodología: se realiza una descripción de la metodología de trabajo o principio de acción del Ensayo No-Destructivo.

Características: se encuentra otro tipo de información que se considera interesante e importante.

Aplicaciones: en este apartado se describen de forma general las aplicaciones que tiene cada Ensayo No-Destructivo dentro de la Ingeniería Civil.

Normativa: Se considerarán las abreviaciones de normativas y guías existentes (Nacional e Internacional) para cada ensayo en caso de contar con alguna. Para ver el detalle del nombre de estas ver el Anexo A.

4.2 FICHAS

1. Inspección Visual

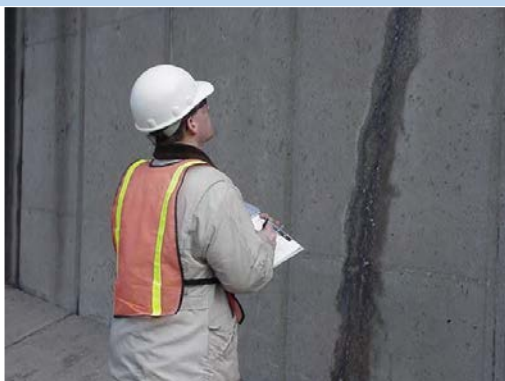


Fig. 4.1 Inspección visual (INDOT. 2013).

Descripción

Se basa en la utilización de luz visible como campo de energía y en las leyes fundamentales de la óptica. (Burne, *et al.* 2011). Permite la obtención de datos iniciales sobre las lesiones que puede presentar la estructura. (Basterra *et al.*, 2009)

Metodología

Se realiza la observación sin requerir de equipo especializado, pero sí de personal con experiencia y conocimientos de construcción, materiales e ingeniería estructural. Bien realizada puede arrojar información que lleve a identificar las causas de los daños observados (Dámazo. 2006).

Características

Bajo costo. Rápido. No requiere equipo sofisticado. Solo apto para inspección superficial. Sensibilidad limitada por iluminación y agudeza visual; 0.1 mm aproximadamente (Dámazo. 2006).

Algunas limitaciones de la técnica son las obstrucciones visuales, que pueden deberse a iluminación, acceso u obstáculos. El "factor humano" a la interpretación errónea, lo que puede dar lugar a evaluaciones contradictorias (Qasrawi. 2000).

Para la inspección subacuática se puede utilizar el apoyo de un circuito cerrado de televisión en donde el buzo porta la cámara para que en la superficie se pueda observar el estado de la estructura bajo el agua.

Aplicaciones

Complemento de todas las otras técnicas de END.

Control y detección de defectos superficiales en producción.

Detección de corrosión, erosión y fisuras en mantenimiento (Burne, *et al.* 2011).

Clasificación visual (Marín. 2013).

Norma

ACI-201.1R-08 | ACI 207.3R-94 | UNE 56544:2011

2. Endoscopía

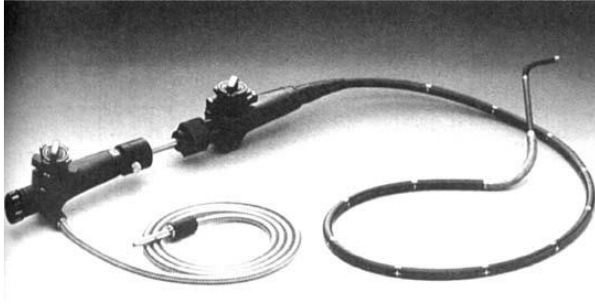


Fig. 4.2 Boroscopio flexible (Boyd *et al.* 2005)

Descripción

Un boroscopio o Fibroscopio es un instrumento óptico compuesto por un tubo diseñado para la inspección remota de objetos. Una persona en un extremo del tubo puede ver una imagen obtenida en el otro extremo. (Boyd *et al.* 2005)

Metodología

La endoscopía consiste en la observación indirecta del interior, a través de una perforación practicada o existente, que permite inspeccionarlo visualmente (Monteagudo. 2010). La imagen se transmite a través del tubo a través de paquetes de fibra óptica, pasando por el tubo, la cámara, el vídeo sistema de proyección, o lentes (Boyd *et al.* 2005).

Características

Las categorías básicas son rígidas o flexibles, según la configuración del tubo. Los boroscopios más utilizados hoy en día son: boroscopios de fibra óptica, boroscopios de cámara, boroscopios de lente y microscopios (Boyd *et al.* 2005).

Limitaciones: Obstrucciones visuales, que pueden deberse a iluminación, acceso u obstrucción.

Posee generalmente una calidad de imagen de 640x480 pixeles.

Aplicaciones

Inspección remota de objetos (Boyd *et al.* 2005).

Determinación de espesor de muros, huecos o separaciones entre bloques de ladrillo (Monteagudo. 2009).

Normativa

No existe.

3. Levantamiento Geométrico



Fig. 4.3 Medidor distancia laser (De maquinas y herramientas. S.f).

Descripción

Se realiza con el fin de obtener información tanto de la geometría general como de la geometría de detalles una estructura, para posteriormente realizar esquema o dibujo computarizado de esta.

Metodología

Para obtener el levantamiento geométrico de forma manual se deben realizar medidas en terreno por medio de huinchas, puntero laser o pie de metro para la geometría de detalles con precisión milimétrica, mientras que los levantamientos topográficos en donde se utiliza un teodolito o estación total permiten tener información de la geometría general. También se puede realizar un mediante escáner laser 3d (Ver ficha N°4).

Características

Es uno de los primeros pasos para la realización de cualquier inspección, ya que se necesitan los datos geométricos de la estructura para definir y planificar los lugares en donde se utilizarán los otros métodos.

Posee precisión de ± 1 mm.

Aplicaciones

Determinar geometría general y geometría de detalles de una estructura.

Medir variaciones de geometría en distintas pruebas o ensayos aplicados a la estructura, principalmente en pruebas de carga.

Normativa

No existe.

4. Escáner Laser 3D



Fig. 4.4 Fotografía del ensayo (Faro. 2013).

Descripción

Este ensayo se utiliza para el escaneo de objetos a grandes distancias y expuestos, permite capturar mediciones rápidas, directas y altamente precisas de objetos y edificios complejos.

Metodología

El escáner láser emite un haz de luz láser desde un espejo giratorio hacia el área que se escaneará. La unidad distribuye el haz de luz láser a un rango vertical de 300° y un rango horizontal de 360° . El haz de láser luego es reflejado nuevamente hacia el escáner por los objetos que encuentra en su camino. Después se calcula la distancia a los objetos que definen un área y también sus respectivos ángulos verticales y horizontales. Los datos son capturados y transmitidos vía WLAN para el cálculo de reproducciones 3D precisas (Faro. 2013).

Características

Los datos escaneados pueden importarse a software.

Instrumento portable.

Visualización confiable y realista, incluso bajo condiciones de iluminaciones extremas y gran distancia (330 m aproximadamente).

Captura de datos segura y rápida según la construcción con detalles de color superiores.

Menor complejidad gracias al flujo de trabajo integrado de escaneo e imágenes para todo tipo de tareas de escaneo.

Precisión de 0.009° con un error de intervalo del $\pm 2\text{mm}$.

Aplicaciones

Levantamiento geométrico de estructuras y terrenos. Inspección de fachadas. Escanear a BIM. Registro geométrico preciso de entorno construido. Optimización de espacio. Control de deformaciones mediante monitoreo de contramedidas. Escaneo de objetos grandes o distantes. Supervisión de proyectos. Cálculo de volumen de material.

Normativa

No existe

5. Fotogrametría



Fig. 4.5 Fotogrametría en vigas.

Descripción

Técnica cuyo objetivo es el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de las medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías y el modelo digital del terreno correspondiente al lugar representado. El concepto de fotogrametría es: "medir sobre fotos" (Topoequipos. S.f.).

Metodología

Se deben realizar la siguiente secuencia:

Fotografiar los objetos: Será necesario una previa planificación, luego se obtienen las imágenes y se procesan.

Orientación de las imágenes: colocación de los fotogramas en la posición adecuada, con la misma orientación que ocupaban al momento de captar la toma.

Formación del modelo por restitución para después aplicarle giros, una traslación y un factor de escala para tener el modelo en coordenadas terreno. Incluye también el escalado del objeto para obtener y realizar medidas en las magnitudes reales. Adicional se puede realizar una formación del modelo por rectificación, en donde previamente también se debe realizar una rectificación del lugar (Wikipedia. 2013).

Características

Existen tres tipos de fotogrametría:

Fotogrametría analógica: Son los modelos matemáticos utilizados.

Fotogrametría analítica: Se encarga de aplicar los modelos matemáticos a objetos físicos.

Fotogrametría digital: Con la aparición de la tecnología, se sustituye la imagen analógica por la imagen digital, del mismo modo que se empiezan a utilizar programas informáticos. Las fotografías se pueden obtener de forma aérea o a nivel del suelo. (Topoequipos. S.f.)

La precisión depende del tamaño de la fotografía y el pixel, a mayor tamaño de pixel se obtiene menor precisión.

Aplicaciones

Obtener datos de medidas de distancias sobre fotografías.

Normativa

DAN 151

6. Microfotografía

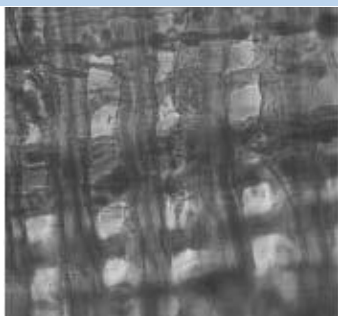


Fig. 4.6 Microfotografía de madera (Basterra *et al.* 2009).

Descripción

Esta técnica consiste en la observación de una imagen real imperceptible al ojo humano fotografiando una imagen a través de un microscopio.

Metodología

Se identifica la zona de la extracción de las probetas, se extrae una pieza pequeña del material, luego se lamina en un grosor entre 25-50um empleando un micrótopo. Se procede a la tinción de las láminas para poder observarla en un microscopio. (Basterra *et al.* 2009)

Características

Según las características anatómicas y morfológicas de la especie, puede variar la precisión en la identificación (Basterra *et al.* 2009).

La precisión de la imagen depende del equipo, generalmente es $\pm 1\text{nm}$.

Aplicaciones

Realización de análisis petrográfico del hormigón.

Reconocer propiedades metalográficas de las estructuras de acero.

Determinar las condiciones del material, causas del deterioro.

Probable comportamiento futuro, conformidad con las especificaciones del proyecto, descripción de parámetros en el hormigón.

Normativa

ASTM C 856: 2017.

7. Fisurómetro



Fig. 4.7 Medidores de grietas (ControlsGroup. 2015).

Descripción

Complementa la inspección visual. Da una mejor definición en las zonas problemáticas detectadas en la inspección visual previa, su costo es mínimo pero los resultados son poco precisos (Dámazo. 2006).

Metodología

Hay en el mercado micras y aparatos para medir el espesor y la profundidad de las grietas de manera aproximada. Otros dispositivos hechos con fibra óptica iluminan los fondos de las grietas para observarlos de manera ampliada. También, hay dispositivos para medir el cambio en el espesor de las grietas en el tiempo (Dámazo. 2006).

Características

Precisión de lectura 0,1 mm con nonio y 0,5 mm sin nonio.

Aplicaciones

Es útil para definir posibles daños o efectos de los agrietamientos. Permite establecer las probables causas de los agrietamientos, dimensiones, su ubicación, patrones y dirección.

Normativa

No existe

8. Tintas Penetrantes



Fig. 4.8 Ensayos de soldadura mediante líquidos penetrantes
(Geotecnia Consultores. S.f.).

Descripción

Es un método que se utiliza para revelar ruptura de la superficie por la capilaridad de un tinte de color o fluorescente de la falla. Se basa en la capacidad del líquido para ser arrastrado por una superficie "limpia" rompiendo un defecto por acción capilar (BS-103. 2009).

Metodología

La técnica se basa en la capacidad de un líquido para ser arrastrado a una superficie limpia (Se debe preparar muy bien la superficie) rompiendo un defecto por acción capilar. Después se aplica el penetrante y se deja actuar, se elimina el exceso de penetrante superficial y se aplica un revelador. Esto actúa como secante. Se saca al penetrante del defecto para revelar su presencia, se realiza la inspección y luego se debe realizar una limpieza final. Los penetrantes de color (contraste) requieren buena luz blanca mientras que los penetrantes fluorescentes necesitan ser usados en condiciones oscuras con una "luz negra" ultravioleta (BS-103. 2009).

Características

Es uno de los métodos más utilizados. Su popularidad se puede atribuir a dos factores principales, que son su relativa facilidad de uso y su flexibilidad. Puede ser utilizado para inspeccionar casi cualquier material a condición de que su superficie no es muy rugosa o porosa (BS-103. 2009).

Aplicaciones

Identificar fisuras y defectos superficiales de los materiales examinados.

Normativa

ASTM E 165/ E165M – 12 | UNE-EN ISO 3059:2013.

9. Ultrasonido



Descripción

La velocidad de pulso en un material depende de su densidad y sus propiedades elásticas, las cuales están relacionadas con la calidad y la resistencia a la compresión del hormigón (Proceq. 2017 (I)).

Fig. 4.9 Ultrasonido (Proceq. 2017 (I)).

Metodología

Se puede aplicar de forma directa, semi-directa e indirecta La medición directa es más fiable y apropiada como variable predictor. (Basterra *et al.* 2009)

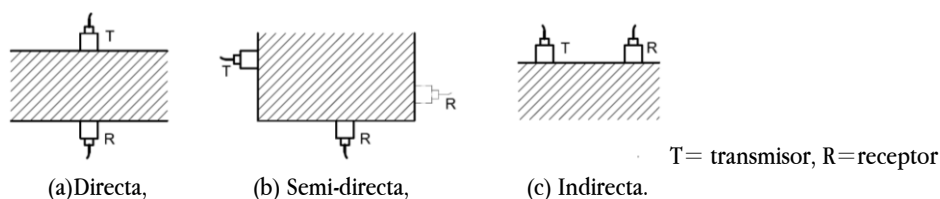


Fig. 4.10 Posición de transductores. (ISO 1920-7)

Las ondas ultrasónicas se introducen en el elemento por medio de un transductor acoplado a la superficie con un gel o medio de acople. El pulso viaja a través del elemento y es recibido por un receptor similar acoplado del lado opuesto (Germann Instruments. 2014). La velocidad se determina dividiendo el tiempo de recorrido de la onda medida entre la distancia directa o la longitud de trayecto más corta entre transductores (ACI 207.3R-94).

Características

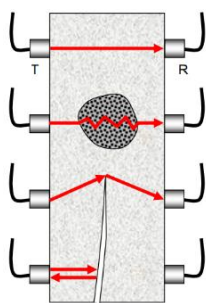


Fig. 4.11 Diferentes condiciones (Germann Instruments. 2014).

Cuando una señal no puede ser recibida, generalmente indica una de las siguientes condiciones: una grieta abierta, una consolidación insuficiente, o la energía fue absorbida entre los transductores (ACI 207.3R-94).

El ensayo se emplea in situ, es rápido y fácil de ejecutar (Dámazo. 2006). Existen transductores de velocidad de pulso ultrasónicos, que se pueden cambiar según las aplicaciones y el material a ensayar. (Proceq. 2017 (I)). Posee una precisión del $\pm 20\%$ para estimar la resistencia a compresión del hormigón.

Aplicaciones

Hormigón y albañilería: Proporcionan información sobre la uniformidad del hormigón, cavidades, grietas, defectos, espesor de losas y detección de huecos, conductos y grietas (Proceq. 2017 (I)).

Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda (Leslie y Cheesman.)		Evaluación de la calidad mediante la velocidad de pulso (Agraval, et al)	
Velocidad de la onda longitudinal m/seg	Condición del hormigón	Velocidad de pulso m/seg	Condición del hormigón
Más de 4570	Excelente	Más de 3000	Buena
De 3050 a 4570	Buena	De 2500 a 3000	Regular
De 3050 a 3650	Regular o dudosa	Menos de 2130	Pobre
De 2130 a 3050	Pobre		
Menos de 2130	Muy pobre		

Tabla 4.1 Tablas de clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad del pulso ultrasónico.

Madera: presencia de oquedades, nudos, bolsas de resina o degradaciones internas, hacen que la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas que viajan a través del material leñoso sea diferente de la que se presenta en ausencia de defectos (Basterra *et al.* 2009).

Acero y soldaduras: Identificar discontinuidades y fisuras.

Obtener información sobre la calidad general de las piezas y deducir el módulo de elasticidad dinámico. (Basterra *et al.* 2009) Resistencia a la compresión, medir espesores, determinar profundidad de grieta, obtener módulo de elasticidad (Proceq. 2017 (I)). Evaluar uniformidad de materiales e identificación de regiones anómalas y defectos (Germann Instruments. 2014).

Normativa

EN 12504-4:2006 | UNE 83-308-86 | ASTM C597 - 16 | BS EN 12504-4:2004 | BS 1881 Part 203 | ISO1920-7:2004 | IS 13311-1

10. Eco-impacto



Fig. 4.12 Ensayo Echo-impacto (Proceq. 2017 (I)).

Descripción

El método eco-impacto se basa en el seguimiento periódico de la llegada de las ondas de tensión reflejadas y permite obtener información sobre la profundidad de la interfaz de reflexión interna (Germann Instruments. 2014).

Metodología

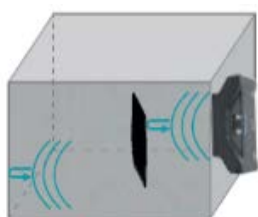


Fig. 4.13 Esquema de señal

Eco-impacto (Proceq. 2017 (I))

Este método utiliza un transductor generador de impulsos para generar ondas de tensión, sino que el impacto de un objeto, típicamente una pequeña bola de acero, proporciona la onda de tensión. (Boyd, *et al.*2005). Se requiere una preparación mínima de la superficie a ensayar. Se realiza una cuadrícula sobre la superficie y se ejecuta el movimiento del transductor que tiene acceso de un solo lado de la estructura. Este capta la señal de la onda P reflexionándola y registrándola como un patrón periódico de desplazamiento superficial que está relacionado con el espesor del elemento y la velocidad de la onda (Germann Instruments. 2014)

Características

Existe en su versión mono y multicanal, las ventajas de la evaluación multicanal es su rapidez con mejores capacidades de formación de imágenes para el emplazamiento (Proceq. 2017 (I)) lo que se conoce como Tomografía Ultrasónica (Ver Ficha 13). Tiene una precisión de 3% en la medición de la distancia al estar calibrado y 10% si no lo está, asumiendo una velocidad de onda de 3658 m/s.

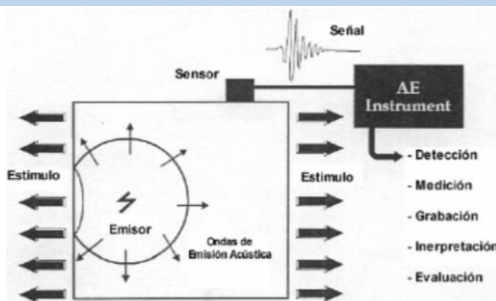
Aplicaciones

Medición del espesor de pavimentos, revestimientos de asfalto, losas sobre el suelo y paredes. Detectar la presencia y profundidad de vacíos y nidos. Detectar vacíos debajo de las losas en el suelo. Evaluar la calidad de la inyección de grout en conductos de cables de postensado. Integridad de una membrana debajo de un recubrimiento asfáltico que protege el hormigón estructural. Estudios de delaminación de cubiertas de puentes, muelles, torres de refrigeración y chimeneas. Detectar despegues de sobreimpresiones y parches. Detectar daños por reacción álcali-sílice (ASR) y daños por congelación y descongelación. Medir la profundidad de las grietas de abertura superficial. Estimar el desarrollo de la fuerza de la edad temprana (correlación apropiada) (Germann Instruments. 2014)

Normativa

EN 12504-4 | ASTM C1383 - 15 | ASTM C597-16 | BS 1881 Parte 203 | ISO1920-7:2004 | IS 13311-1

11. Emisiones Acústicas



Descripción

El ensayo por ondas acústicas se basa en la detección de ondas de energía transitoria emitidas por un material como consecuencia de la redistribución de tensiones (Lombillo. 2010).

Fig. 4.14 Proceso de emisión acústico (Sidorova. 2010).

Metodología

Es un ensayo acústico que se basa en la generación de ondas mecánicas de baja frecuencia mediante un martillo instrumentado. Los martillos suministran una masa cayendo de una determinada distancia, por lo que la masa y la dureza de la cabeza del mismo definen la energía y la frecuencia de onda inicial. La onda mecánica es recogida por un receptor (generalmente un acelerómetro) que puede situarse en varias posiciones, el registrador comienza a compilar los datos a medida que son recibidos. La elaboración de datos consiste en medir el tiempo que toma el impulso para cubrir la distancia entre el transmisor y el receptor para calcular la velocidad de la onda que se propaga por el medio. (Monteagudo. 2010)

Características

El método puede aplicarse para análisis de diferentes tipos de materiales, como hormigón armado y pretensado, acero, aluminio, materiales de cerámicos, mampostería y materiales compuestos (Sidorova. 2010). Las técnicas que utilizan las ondas sónicas tienen las mismas ventajas que las que utilizan ultrasonidos: son fiables, los equipos son portátiles, fáciles de utilizar y su coste no es elevado. No obstante, su poder de resolución es inferior a los ultrasonidos.

Debido a la complejidad del proceso de transmisión la precisión en la interpretación de resultados puede ser mayor al 10%.

Aplicaciones

Conocer la microestructura del material. Evaluar el nivel de daño presente en la estructura.

Se puede aplicar en pruebas de cargas, estudios de corrosión, control de calidad de producción, control de agrietamientos de soldaduras durante el proceso de enfriamiento, estudios del comportamiento de los materiales a altas temperaturas.

Normativa

ASTM E569 / E569M – 13 | ASTM E2374 – 16 | ASTM E749 / E749M – 17

12. Sistema SASW (Análisis espectral de ondas superficiales)



Fig. 4.15 Ensayo en pavimento (Olson. 2012).

Descripción

El análisis espectral de las ondas superficiales (SASW) es ampliamente utilizado en aplicaciones geotécnicas y de Ingeniería Civil para estimar las propiedades de los materiales en estructuras estratificadas basadas en las características de dispersión de las ondas de Rayleigh (ondas superficiales) (Olson. 2012).

Metodología

Las pruebas y análisis de SASW se realizan generalmente en tres fases:

- (1) recopilación de datos in situ (El ensayo se aplica desde la superficie);
- (2) construcción de una curva de dispersión experimental a partir de los datos de campo;
- (3) proceso de inversión iterativo para igualar los resultados experimentales y teóricos

La longitud de onda (λ), la frecuencia (f) y la velocidad de onda (V_r) se relacionan de la siguiente manera:

$$V_r = f \cdot \lambda$$

Cuando la velocidad es uniforme, la longitud de onda es la profundidad de investigación (Olson. 2012).

Características

El método se puede realizar sobre cualquier material, siempre que exista una superficie accesible para el montaje del receptor y el impacto. Los materiales que se pueden probar incluyen hormigón, asfalto, tierra, roca, mampostería y madera (Olson. 2012).

Aplicaciones

Determinación de los perfiles del sistema de pavimentación incluyendo la capa superficial, base y subsuelo. Determinación de la profundidad de las grietas de apertura superficial. Medición de la profundidad de daño del hielo-deshielo. Medición de la profundidad de incendio. Determinación de la profundidad del pilar de los puentes. Evaluación del estado de los revestimientos de hormigón en túneles y otras condiciones estructurales de hormigón (Olson. 2012).

Normativa

No existe

13. Tomografía Ultrasónica



Fig. 4.16 Tomografía ultrasónica en análisis estructural (Foppoli. S.f.).

Descripción

La tomografía ultrasónica es una técnica en donde se obtiene una imagen 2D o 3D del elemento ensayado en un ordenador, que resulta de la reconstrucción formada a partir de diferentes señales ultrasónicas

Metodología

El tomógrafo ultrasónico dispone fundamentalmente de dos componentes principales: una antena y una unidad de control que consiste en un ordenador que crea imágenes y almacena los datos obtenidos en la inspección. El funcionamiento básico de un tomógrafo ultrasónico, consiste en que la unidad de control excita una fila de transductores de la antena y las demás filas de transductores actúan como receptores. Los transductores de punto actúan como transmisores y receptores del pulso de un modo secuencial. El tiempo de tránsito de cada pulso reflejado es procesado posteriormente por la unidad de control para crear un modelo 3D de la localización de las interfaces reflectoras. Tras la adquisición de datos, el equipo utiliza una técnica de procesamiento de señales para reconstruir una imagen tomográfica 3D del interior del elemento (González, N. 2013).

Características

Escaneado en tiempo real, no requiere acoplador, genera imágenes en alta resolución.

Aplicaciones

Evaluación de objetos complejos en tres dimensiones, componentes ensamblados, detección de discontinuidades, tamaño y localización de dichas discontinuidades. Determinación de espesores, localización de artefactos, detección de fallas y defectos.

Normativa

No existe

14. Cross-Hole

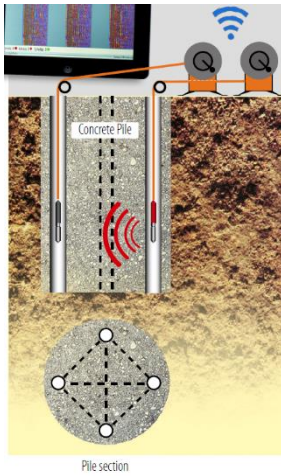


Fig. 4.17 Sistema Cross-Hole completo con 2 carretes motorizados. (ControlsGroup. 2015).

Descripción

El método "cross-hole" sirve para investigar los pilotes de cimientos de edificios y, con el uso de impulsos ultrasónicos, permite realizar ensayos precisos de alta resolución (ControlsGroup. 2015).

Metodología



Se envía una onda ultrasónica de un transmisor a un receptor, transmitida automáticamente por el dispositivo a lo largo de toda la longitud del pilote dentro de los tubos, empotrada, durante el fraguado. La velocidad de la onda sónica y su energía se ven influenciadas, en gran medida, por la calidad del hormigón (ControlsGroup. 2015).

Fig. 4.18 Esquema del ensayo (ControlsGroup. 2015).

Características

Es posible analizar las características y obtener una representación tomográfica en 2D y 3D denominada diagráfia. Tiene un porcentaje de error menor al 0.1%.

Aplicaciones

Evaluación de la calidad y la homogeneidad del hormigón.

Normativa

ASTM D6760-16

15. Sísmico Paralelo

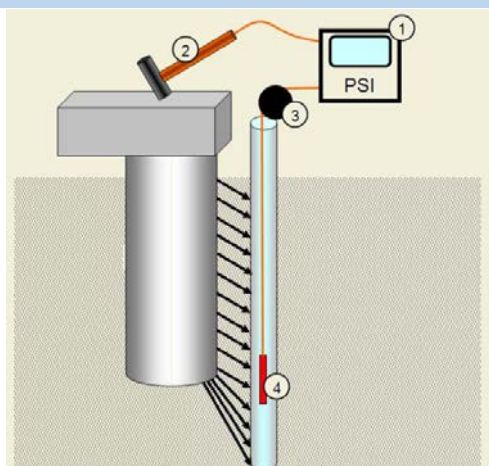


Fig. 4.19 Componentes del sistema. 1 Equipo PSI. 2Mazo equipado con un disparador. 3 Profundímetro digital. 4 Hidrófono. (Piletest. 2013)

Descripción

El ensayo Sísmico Paralelo está desarrollado para atender a situaciones en la que existen dudas sobre la integridad y la longitud de los pilotes y pantallas cuando la estructura está completamente terminada. En estos casos no suele ser accesible la cabeza de los pilotes y es difícil utilizar otro método No-Destructivo (Echeverry. 2013).

Metodología

El ensayo requiere la instalación de un tubo de plástico de acceso en paralelo y lo más cerca posible al pilote de prueba. El tubo debe ser llevado a una profundidad mayor que la profundidad estimada del pilote, unos 8-10 m por debajo, y se debe llenar de agua. En suelos no saturados el sondeo debe ser inyectado para que el tubo tenga un buen acoplamiento acústico con el suelo circundante.

Mientras se baja el hidrófono en etapas dentro del tubo de acceso, se golpea la superestructura con el martillo y el pulso al llegar a hidrófono es registrado en el ordenador que está conectado al equipo. Cuando todos los pulsos son recogidos, se representan gráficamente frente a las respectivas profundidades y muestran un quiebre en la pendiente a la profundidad donde se encuentra la punta del pilote (Piletest. 2013).

Características

Cuando en el registro se observa un quiebre de propagación, ese punto refleja un cambio de material (punta del pilote, terminación de la pantalla, etc.).

Tiene un porcentaje error menor al 0,1%.

Aplicaciones

Determinar la longitud de elementos de cimentación como pilotes, muros, pantalla, entre otros.

Determinar las velocidades de propagación de la onda en el hormigón y en el suelo.

Normativa

NF P94-160-3

16. Impedancia Mecánica



Fig. 4.20 Ensayo de impedancia mecánica en un pilote (Sanjuán. 2012).

Descripción

El ensayo se basa en el análisis de las ondas planas longitudinales, al propagarse por el pilote, una onda provocada por un golpe de martillo en la cabeza. El método consiste en estudiar la amplitud de onda y la medida del tiempo “ t ” que tarda la señal emitida al chocar sobre una anomalía o sobre la punta del pilote (Sanjuán. 2012).

Metodología

El ensayo es del tipo de martillo de mano, cuyo golpe envía una onda de compresión a lo largo del fuste del pilote. Esta onda es reflejada por las discontinuidades del pilote, por su punta, o por cambios de sección o variaciones del terreno que lo rodea. Los movimientos de la cabeza del pilote son captados por un acelerómetro. Esta señal es amplificada y digitalizada. El gráfico de velocidad de un pilote continuo aparece en la pantalla como una línea relativamente recta con dos picos. El primero de ellos es el causado por el impacto del martillo, mientras que el segundo es causado por la reflexión en la punta del pilote (Fernández & Tellez. 2000).

Características

Es un método dinámico que induce una baja deformación en el pilote, denominándose generalmente "método sónico". Antes de realizarlo se requiere conocer algunos datos como resistencia del hormigón, diámetro del pilote, armado, longitud teórica y estratigrafía del terreno.

Se aplica a cualquier tipo de pilote, no requiere ninguna preparación especial en el mismo, ni necesita equipo pesado, por lo que resulta económico y de gran rendimiento (Sanjuán. 2012).

Tiene un porcentaje de error menor al 1%.

Aplicaciones

Deducir longitud del pilote, o la profundidad del nivel de reflexión. Determinar heterogeneidades del material. Chequeo de pilotes prefabricados.

Normativa

ASTM D5882 - 16 | NF P 94-160-4. | ASTM D6760 - 16

17. Sonar 3D

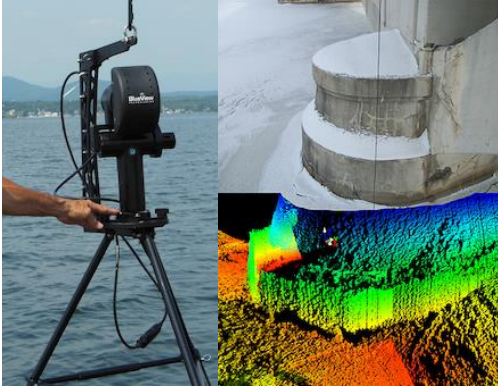


Fig. 4.21 Equipo sonar 3D e imagen de funcionamiento de puente (GrupoAvala. 2017).

Descripción

El método Sonar (originalmente un acrónimo de Sound Navigation And Ranging) es una técnica que utiliza la propagación del sonido para navegar, comunicarse o detectar objetos en la superficie o debajo del agua (Wikipedia. 2017).

Metodología

Se debe proveer el acceso al agua para el instrumento. Se realizan barridos de la superficie subacuática de los cuales se obtiene una gran cantidad de datos, estos se procesan y se crea una nube de puntos. Entrega en pantalla una imagen en 3D en donde se puede evidenciar lo escaneado bajo el agua, identificando todo tipo de discontinuidad generada por los objetos con los que choca la señal del sonar (GrupoAvala. 2017).

Características

Se pueden obtener imágenes en tiempo real. Dentro de la industria de inspecciones aún es un método nuevo que tiene potencial porque permite un nivel de detalle mayor que se puede utilizar para inspeccionar y evaluar proyectos de reparación de forma segura obteniendo datos precisos sin poner en riesgos a los buzos o inspectores bajo condiciones adversas o desconocidas.

La precisión es de ± 1 mm de desviación.

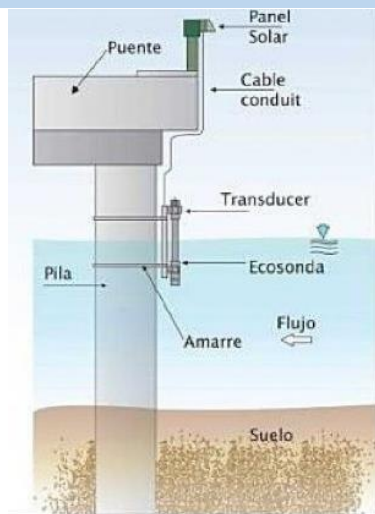
Aplicaciones

Inspección visual de estructuras como pilas y fundaciones de puentes de difícil acceso bajo condiciones adversas.

Normativa

No existe

18. Ecosonda



Descripción

Es un instrumento utilizado en navegación, para saber profundidades. El principio de funcionamiento es que transmite una señal y recibe el eco de la respuesta varias veces por segundo, indicando así la profundidad en ese punto de observación. El aparato muestra en pantalla la distancia constante al fondo. También muestra la apariencia del fondo, por ejemplo, si es rocoso, arenoso o fangoso (Wikipedia. 2017).

Fig. 4.22 Sistema de medición de socavación (Muñoz. 2011).

Metodología

Es un tipo de sonar activo. Se produce la transmisión de un pulso acústico directamente hacia abajo al fondo, midiendo el tiempo entre la transmisión y el retorno del eco, después de haber tocado fondo y rebotando de nuevo al origen. El pulso acústico es emitido por un transductor que también recibe el eco de retorno. La medición de la profundidad se calcula multiplicando la velocidad del sonido en el agua por el tiempo entre la emisión y el retorno del eco (Wikipedia. 2017).

Características

Utilizar ecosonda es un método más rápido de medir la profundidad que la técnica anterior de bajar una cuerda sonora hasta tocar fondo.

Tiene una precisión de 1 cm con $\pm 1\%$ de profundidad.

Aplicaciones

Estimar la socavación en fundaciones y pilas de puentes, conocer profundidades y distancias bajo agua. En aplicaciones de laboratorio sirve para monitorear el transporte de sedimentos, los procesos de erosión y erosión en modelos a escala (modelos hidráulicos, canales, etc.). También se pueden utilizar para crear gráficos de contornos 3D.

Normativa

No existe

19. Georradar



Fig. 4.23 Georradar y cuadrícula para ensayo (Proceq. 2017 (III)).

Descripción

Esta técnica consiste en realizar un reconocimiento de un medio heterogéneo mediante la emisión y recepción de ondas electromagnéticas que se propagan por ese medio. Las ondas son detectadas por una antena receptora tras su propagación por el medio material (Galve & Sanz. 2011). Se puede obtener una representación gráfica que indica irregularidades y su profundidad.

Metodología

Se debe colocar una cuadrícula previa a la realización del ensayo. Los impulsos con frecuencias entre los 100 MHz - 1 GHz son emitidos a través de un sólido por medio de una antena bipolar, que posteriormente se reciben en otra. Con estos transductores vamos barriendo el objeto de medición. Las ondas reflejadas y el tiempo que tardan en volver indican la presencia y la distancia a la que se encuentra la superficie que las refleja. Como resultado se obtiene un mapa (radar-grama) que refleja las posibles discontinuidades internas de la estructura (Monteagudo. 2010).

Características

Existe la posibilidad de escaneo inalámbrico que permite por medio de aplicaciones ver las lecturas en un ipad en tiempo real (Proceq. 2017 (III)).

Precisión en indicación de profundidad < 100 mm: ± 10 mm; > 100 mm: ± 15 %.

Aplicaciones

Evaluación de la calidad y uniformidad. Comprobación de la conformidad de edificios nuevos. Investigación en estructuras desconocidas. Localizar barras antes de perforar, cortar y taladrar. Comprobación de punto de cobertura y tamaño de barra. Formación completa de imágenes de la geometría de las barras en una o más filas. Medición de espesor de losa desde un solo lado (Proceq. 2017 (III)).

Normativa

AASHTO R 37-04 (2013) | ACI 228.2R.98 | ASTM D4748 - 10 | ASTM D6087 - 08 | ASTM D6432 - 11 |
EN 302 066 – ETSI

20. Radiografía

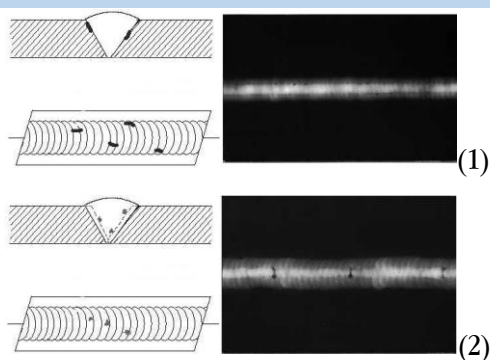


Fig. 4.24 Radiografías industriales a soldadura. (1) Inclusiones de escoria. (2) Falla de fusión (Bunge & Magallanes, 2011).

Descripción

La radiografía se basa en la interacción de un material y la radiación electromagnética a la que este material se expone. Esta técnica se emplea para medir la densidad de un material emitiendo una radiación a través de la pieza de la que se conoce su coeficiente de absorción y mide la energía recibida al otro lado (Rodríguez, 2009).

Metodología

Se pueden utilizar rayos X o rayos gamma, cuya radiación tiene una longitud de onda muy corta y es de alta energía. Al atravesar un material, éste absorbe o atenúa la radiación electromagnética. Tal absorción es proporcional a la densidad, espesor, y configuración del material en inspección. La radiación que traspasa el material se registra como una película radiográfica. Posteriormente, las zonas de mayor densidad aparecen en tonos claros y las de menor densidad, en tonos oscuros. Una discontinuidad aparece como una indicación en tonos oscuros. La imagen que la radiación genera en el medio de registro es la información en la que se basa la evaluación e interpretación de los resultados de este tipo de ensayo (García, 2007).

Características

Por la peligrosidad de exponerse a la radiación el inspector debe aplicar todas las medidas obligatorias de seguridad radiológica (distancia física entre el inspector y la fuente, barreras de protección y tiempo de exposición) (García, 2007).

Este ensayo posee alta resolución debido a la gran cantidad de tonos de grises que tiene la imagen.

Aplicaciones

Detección de ubicación y dimensiones del acero de refuerzo, densímetro nuclear para pavimentos, y otras. Detectar discontinuidades macroscópicas en el interior de un cuerpo, variaciones en su estructura interna o configuración física.

Normativa

ASTM E94 / E94M - 17 | ASTM E1742 / E1742M - 12 | ASTM E1000 - 16

21. Tomografía Computacional

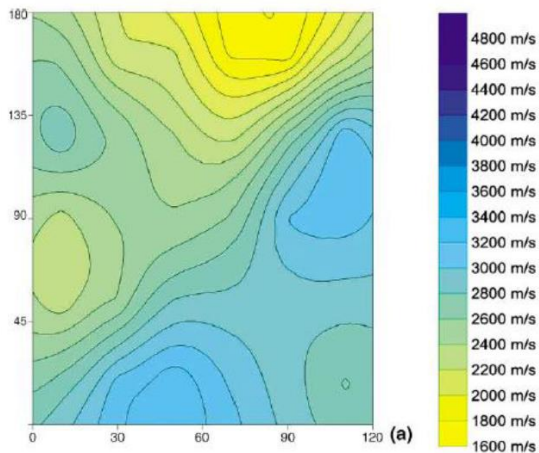


Fig. 4.25 Imagen tomográfica de una columna (Valluzzi. 2002).

Descripción

Es una técnica computacional que utiliza los datos de los ensayos ultrasónicos, sónicos o de radar para proporcionar una representación, bidimensional o tridimensional, de las propiedades internas de una determinada sección o elemento (Monteagudo. 2009).

Metodología

La precisión del ensayo depende del número de transductores empleados, por lo que deberían utilizarse ocho sensores como mínimo. Todos se conectan entre sí y la unidad central recoge los ecos recibidos por cada palpador al golpear sucesivamente cada una de las cabezas instaladas en cada sensor. Terminada la serie completa de golpes la unidad central procesa la información y asigna a cada punto de la sección del elemento de ensayo un color en función de la velocidad de transmisión de la onda que atravesase ese punto (Monteagudo. 2009).

Características

Incluye datos de otros métodos como los procedimientos de Georradar, emisiones acústicas o ultrasonidos que se deben adaptar para el empleo de tomografías, el enfoque ha mostrado una aproximación del tamaño y extensión de las anomalías internas.

Aplicaciones

Localizar defectos internos como vacíos, grietas y deterioro de un elemento.

Normativa

No existe.

22. Pacómetro



Fig. 4.26 Operario utilizando profómetro (Proceq. 2017 (I)).

Descripción

La detección magnética de armaduras es una técnica que en la mayoría de los casos es una técnica preliminar, para la realización de pruebas experimentales en obras de hormigón armado, para comprobar la consistencia entre aceros y para el desarrollo de las investigaciones de mampostería (Porco *et al.* 2013).

Metodología

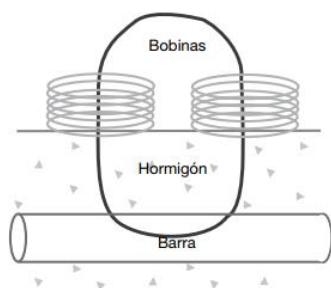


Fig. 4.27 Principio de medición (Proceq. 2017 (II)).

La sonda de búsqueda, recibe un pulso de corriente que hace que se magnetice el elemento metálico presente sin corrientes parásitas. Agotado el pulso, las corrientes de Foucault empiezan a disolver la creación del campo magnético de intensidad reducida como "eco" del pulso inicial (Porco *et al.* 2013). El instrumento mide la amplitud de la corriente inducida, que depende de la orientación, profundidad y tamaño de la barra. El cabezal de búsqueda es direccional y la señal máxima se obtiene cuando la barra está alineada con el eje largo del cabezal de búsqueda. (Germann Instruments. 2015).

Características

El instrumento ofrece control en tiempo real del procedimiento de medición directamente en el emplazamiento (Proceq. 2017 (I)). La técnica de inducción de impulsos es estable, no se ve afectada por la humedad en el hormigón o agregados magnéticos, y es inmune a las variaciones de temperatura y a las interferencias eléctricas (Germann Instruments 2015).

Tiene una precisión de ± 1 diámetro estándar de barra y de ± 3 mm para detectar el centro de la barra.

Aplicaciones

Se utiliza para la medición exacta y no destructiva del recubrimiento de hormigón, los diámetros de las barras y para la detección de la ubicación de las barras. (Proceq. 2017 (I)). Es útil para verificar la ausencia de cualquier elemento que pertenece a las instalaciones (Porco *et al.* 2013).

Normativa

BS 1881-204 | DGZfP B02

23. Medidor de Resistencia (Sonda Wenner)



Fig. 4.28 Sonda Wenner Resipod (Proceq. 2017 (I)).

Descripción

Es un ensayo que da una solución completa para la medición de la resistividad eléctrica de hormigón tanto en el laboratorio bajo condiciones controladas como en el emplazamiento (Proceq. 2017 (I)).

Metodología



Fig. 4.29 Realización de una medición (Proceq. 2015)

La superficie de hormigón debe estar limpia, húmeda y no deberá estar revestida de ningún aislante eléctrico. Debe estar marcada la cuadrícula de barras debajo de la superficie. Sumergir los contactos en agua antes de ejecutar una medición. Debe hacer una buena conexión entre el instrumento y la superficie de hormigón, presionar firmemente hacia abajo hasta esté apoyado en la superficie. Se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos

sondas interiores. La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas (Proceq. 2015).

Características

La resistividad del hormigón ha sido uno de los parámetros críticos usados para determinar la calidad de hormigón. Solución integral para ensayos de resistividad eléctrica de hormigón. Fiable, preciso y estandarizado, es más rápido que los ensayos en laboratorio (Proceq. 2017 (I)).

La presencia de barras perturba las mediciones de resistividad eléctrica ya que las mismas conducen la corriente mucho mejor que el hormigón a su alrededor (Proceq. 2015), por lo que se debe conocer la ubicación de las barras previo a la realización del ensayo.

Tiene una precisión del $\pm 2\%$.

Aplicaciones

Resistencia del hormigón a agentes agresivos, homogeneidad del hormigón, condiciones de fraguado, comprobación de la distribución de fibras en hormigón reforzado con fibras de acero y estimación de la probabilidad de corrosión, velocidad de corrosión y la implementación de sistemas de protección catódica (Proceq. 2017 (I)).

Normativa

AASHTO T 358: 2015

24. Corrosión

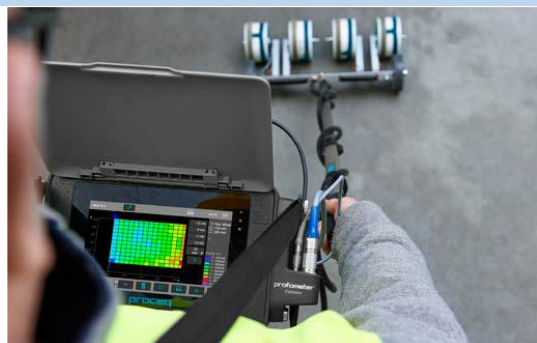


Fig. 4.30 Determinación de corrosión (Proceq. 2017 (I)).

Descripción

Este método consiste en realizar un cartografiado del potencial eléctrico medido en la superficie del hormigón, esto permite la detección de los puntos de una mayor probabilidad de corrosión y representa una herramienta primaria para el mantenimiento y para la evaluación estructural (Proceq. 2017 (I)).

Metodología

Se debe realizar una cuadrícula previa, dependiendo de la superficie se selecciona el electrodo a usar. En caso de haber revestimiento aislante eléctrico no se puede llevar a cabo la medición, por lo que se debe retirar dicho recubrimiento. Se debe humedecer la superficie de hormigón y comenzar la medición desde la esquina superior izquierda hacia el resto de las cuadrículas. Cuidar que el electrodo esté siempre húmedo (Proceq. 2017 (II)).

Características

Prueba electroquímica. Requiere de equipo y personal capacitado, se recomienda emplear electrodos de plata para una mejor medición, tiene un tiempo de lectura rápido. Permite hacer lecturas en superficies regulares, irregulares o alabeadas (Dámazo. 2006).

Aplicaciones

Evaluación in situ de la probabilidad de corrosión (Proceq. 2017 (I)).

Normativa

ASTM C876 - 15 | RILEM TC 154-EMC | DGZfP B03 | UNI 10174 | JGJ/T 152-2008 | JSCE-E 601

25. Xilohigrómetro



Fig. 4.31 Xilohigrómetro In-situ (Basterra *et al.* 2009).

Descripción

Este método de ensayo ofrece una medida de la humedad superficial de la pieza de madera en el punto en donde se clava el aparato, basándose en la relación que existe entre el contenido de humedad y la resistencia óhmica (Basterra *et al.* 2009).

Metodología

La tarea básica de funcionamiento es medir el porcentaje de humedad con relación a la resistencia ejercida por la madera al paso de una corriente continua que, a su vez, es proporcional a su contenido de humedad; este registro indica la fuerza con que absorbe la madera el campo eléctrico de alta frecuencia que la atraviesa (Rojas. 2012). Para ello se debe clavar el aparato en la madera en que se quiere conocer la humedad, cuidando que los sensores queden completamente insertados en la pieza.

Características

Permite relacionar la resistencia y módulo de elasticidad por medio del contenido de humedad de la madera (Basterra *et al.* 2009).

Existen dos tipos de xilohigrómetro, uno que funciona según el método capacitivo con una precisión del $\pm 2,5$ % a $\pm 4,0$ % y otro que se basa en la resistencia eléctrica con una precisión de $\pm 1,5$ % a $\pm 2,5$ %.

Aplicaciones

Medición del contenido de humedad.

Normativa

UNE EN-13183-2 | UNE-EN 13183-3

26. Partículas Magnéticas



Fig. 4.32 kit para ensayo de partículas magnéticas
(END - Chile. S.f).

Descripción

La inspección por partículas magnéticas es un método utilizado para la detección de defectos en estructuras de acero. Este es un método rápido y relativamente fácil de aplicar in situ. Utiliza campos magnéticos y pequeñas partículas magnéticas, para detectar defectos en los componentes (BS – 103. 2009).

Metodología

La superficie debe limpiarse antes de la inspección, debe estar libre de grasa, aceite u otra humedad.

Aplique la fuerza magnetizante utilizando imanes permanentes, un yugo electromagnético, puntas, una bobina u otros medios para establecer el flujo magnético necesario.

Aplicar una capa ligera de partículas magnéticas con la fuerza magnetizante todavía aplicada, retirar el exceso de polvo con poco aire seco. Si se utiliza la suspensión húmeda, la suspensión se pulveriza suavemente. Inmediatamente después de la aplicación se debe aplicar la fuerza de magnetización.

El área debe ser inspeccionada cuidadosamente para determinar el grupo de partículas. Las discontinuidades superficiales producirán una indicación nítida. . (BS – 103. 2009)

Características

El componente que se está inspeccionando debe estar hecho de una partícula ferromagnética como hierro, níquel, cobalto o algunas de sus aleaciones.

El método puede utilizarse eficazmente para la inspección de vigas u otras piezas de acero.

Los imanes permanentes se utilizan generalmente en inspecciones subacuáticas y en donde no se pueden utilizar electroimanes (BS – 103. 2009).

Aplicaciones

Detectar y exponer discontinuidades como grietas, porosidades, traslapes, costuras, entre otras presentes en la superficie o sub-superficie en estructuras de materiales magnetizables.

Normativa

UNE-EN ISO 17638:2017 | UNE 36282:1980 EX | UNE-EN 10228-1:2016 | UNE-EN ISO 3059:2013 | UNE-EN ISO 9934:2017 | UNE-EN 1369:2013

27. Corriente de Foucault



Fig. 4.33 Inspección por corriente de Foucault (Ropax. S.f).

Descripción

Este es el método con el instrumento más básico de prueba de corrientes inducidas. Sirve para identificar defectos como las grietas que se detectan cuando interrumpen el paso de la corriente de Foucault y debilitan su fuerza (BS – 103. 2009).

Metodología

Durante la realización de la inspección con sonda de superficie se debe adoptar la metodología siguiente:

Conectar la sonda con el sistema. Ajustar la frecuencia y el ángulo de fase según sea necesario. Ajustar la ganancia horizontal y la ganancia vertical. Colocar la sonda de medición en la probeta a ensayar, lejos de las grietas. Deslice la sonda sobre la probeta suavemente.

Los datos pueden almacenarse como datos congelados, datos capturados y datos de cascada (BS – 103. 2009).

Características

Las corrientes de Foucault son corrientes eléctricas inducidas que fluyen en una trayectoria circular.

Este método es muy sensible a pequeñas grietas y otros defectos. Detecta defectos superficiales y cercanos a la superficie de forma muy eficiente. Los resultados pueden obtenerse inmediatamente después de la inspección (BS – 103. 2009).

Aplicaciones

Los equipos de corrientes inducidas pueden ser utilizados para una variedad de aplicaciones tales como la detección de grietas (discontinuidad), medición del espesor del metal, detección de la dilución del metal debido a la corrosión y erosión, determinación del espesor del recubrimiento y la medición de la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética.

Normativa

ASTM E2934 - 14

28. ACFM (Alternative Current Field Measurement)



Fig. 4.34 Ensayo de medición de campo de corriente alterna
(AkroScan. 2011).

Descripción

Es un método de control basado en las corrientes de Foucault, que permite el control de estructuras metálicas para detectar eventuales fisuras por fatiga. Es la alternativa electrónica a los ensayos visuales, se destina a aplicaciones en un medio ambiente difícil (AkroScan. 2011).

Metodología

ACFM utiliza un calculador electrónico que inyecta una corriente alterna en la superficie del material, que debe controlarse, por medio de una sonda adaptada al medio de intervención. La corriente cruza el material generando un campo magnético inducido que se perturbará si hay presencia de un defecto en la estructura. Las sondas miden estas perturbaciones y las transmiten al calculador o al ordenador. Esto queda representado en una visualización que relaciona la perturbación del campo magnético con las dimensiones del defecto que implican estas perturbaciones (AkroScan. 2011).

Características

La sonda no necesita contacto eléctrico con la superficie y no se ve influenciada por la presencia de recubrimiento no conductor o el estado de limpieza de la pieza.

Puede ser utilizado en superficies calientes, bajo el agua o en ambientes irradiados.

Tiene como ventajas por sobre los otros métodos como partículas magnéticas (ver Ficha 26) y tintes penetrantes (ver Ficha 8) que se puede utilizar a través de los revestimientos, puede utilizarse a alta temperatura y entregan la profundidad de los defectos.

Tiene una precisión del $\pm 1\%$.

Aplicaciones

Detección y dimensionamiento de grietas por fatiga y fisuración por hidrógeno.

Control de soldaduras, hilos o piezas de grandes dimensiones.

Control de estado de plataformas Off-shore, oleoductos, grúas, calderas o equipos a presión, reactores nucleares, entre otros.

Normativa

ASTM E2928 / E2928M - 17 | ASTM E2261 / E2261M - 17

29. Baticorrómetro



Fig. 4.35 Polatrak CP GUN, dispositivo de ensayo (Stoprust. 2015).

Descripción

Es un ensayo que permite la determinación de la corrosión de estructuras submarinas, proporciona al buzo una lectura directa de la corrosión potencial en el punto de aplicación. (Buckleys. 2014)

Metodología

Se debe sumergir el Baticorrómetro en agua durante 20-30 minutos previos a la inspección. Para tomar una lectura se debe empujar la sonda apuntada sobre la estructura de acero asegurando el contacto. El potencial de corrosión de ese punto se puede ver en la pantalla.

Características

Dependiendo del tipo de agua de inspección se debe utilizar el electrodo correspondiente. Para agua de mar se utiliza electrodos de cloruro de plata (Ag/AgCl), mientras que para agua dulce se utilizan electrodos de sulfato de cobre (Cu/CuSO₄).

Tiene una precisión de $\pm 0.05\%$.

Aplicaciones

Determinar la polarización de corrosión y de interacción por medio de inspección de obras marinas como plataformas de producción y perforación, tuberías submarinas, cascos de barcos, entre otros.

Normativa

UNI 11366: 2010

30. Termografía Pasiva



Fig. 4.36 Termografía de una vivienda (Clark. 2003).

Descripción

En la termografía pasiva se estudian las diferencias de la radiación infrarroja natural entre diferentes zonas del objeto en estudio, entre el interior y el exterior de un edificio, o el propio calor generado por el funcionamiento de los sistemas mecánicos y eléctricos (PI.T.K. 2010).

Metodología

Se utilizan cámaras termográficas o de termovisión ya que son capaces de captar la energía con sensores infrarrojos. Permitiendo medir la energía radiante emitida por los objetos determinando su temperatura de la superficie a distancia, en tiempo real y sin contacto. (PI.T.K. 2010)

Por ejemplo En edificios con muros de carga se aplica preferentemente después de anochecer, ya que debido al espesor almacena calor durante el día, emitiendo más radiación térmica por falta de la radiación solar. En edificios con estructuras internas se lleva a cabo el ensayo al amanecer, ya que el interior del edificio está a mayor temperatura que el exterior. Con la fachada a menor temperatura se produce un contraste mayor (Monteagudo. 2009).

Características

En la madera el calor depende de su densidad, los cambios de la temperatura de su superficie también dependen de su densidad, hecho importante dado que la madera bio-deteriorada tiene menor densidad que la madera sana. (Rodríguez. 2009).

Aplicaciones

Inspección rápida en obras de amplias zonas, facilitando la locación de focos de humedad potencialmente peligrosos para la durabilidad de la madera. (Rodríguez. 2009)

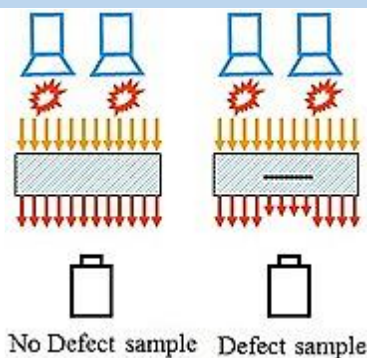
Análisis de las condiciones de aislamiento en edificios y viviendas, localización de humedad, filtraciones de aire, fugas de calefacción. Detección no invasiva de materiales y estructuras.

Detección de delaminaciones en pavimentos.

Normativa

ASTM D4788 – 03(2013) | ISO 10880:2017

31. Termografía Activa



Descripción

En la termografía activa se utilizan fuentes de calor adicionales que nos permiten provocar mayores diferencias de temperatura entre diferentes zonas de los materiales de forma que se acentúan las irregularidades internas (grietas, filtraciones, diferentes materiales ocultos) no detectables mediante termografía pasiva (Pl.T.K. 2010).

Fig. 4.37 Defectos por termografía activa.

Metodología

Para el ensayo de termografía infrarroja es necesaria la existencia de un gradiente térmico para inducir la respuesta térmica de las superficies. Se considera que una diferencia de 20°C es satisfactoria (Monteagudo. 2010) Por lo que si no se da de forma natural se aplica temperatura para producirla.

Características

Generalmente se utilizan como fuente de calor lámparas halógenas o calefactores.

Se pueden realizar representaciones tridimensionales de una imagen termográfica (Monteagudo. 2010).

Aplicaciones

Localización de humedades, identificación de estructuras, localización de huecos y grietas, reconocimiento de zonas de acumulación y pérdidas de calor. Localización de diferentes materiales, análisis de pinturas, estado de materiales. (Monteagudo. 2010).

Normativa

ASTM D4788 – 03(2013) | ISO 10880:2017

32. Higrómetro



Fig. 4.38 Higrómetro Higropin (Proceq. 2017 (I)).

Descripción

Es un equipo que ofrece la solución para identificar y monitorear la humedad en el hormigón. Debido a los pequeños y rápidos sensores de humedad del higrómetro, el diagnóstico de humedad es muy rápido y fácil. (Proceq. 2017 (I)).

Metodología

Se debe acondicionar el hormigón a temperatura/humedad de servicio por lo menos 48 horas. Definir, taladrar y preparar los agujeros de prueba para hormigón endurecido, en caso de hormigón fresco colocar agujeros. Cortar el manguito conforme a la profundidad de la prueba e insertarlo. Esperar 72 horas para el equilibrio de humedad. Realizar las mediciones insertando la sonda en el manguito previamente instalado (Proceq. 2012).

Características

La humedad excesiva en hormigón puede ser fatal para cualquier instalación de revestimiento de suelos. Para prevenir moho y daños mayores, la industria de revestimientos de suelos requiere soluciones inteligentes para ensayos que permitan verificar los suelos con respecto a humedad antes de instalar recubrimientos del suelo. Sirve como un método estandarizado para la industria de revestimientos de suelos (Proceq. 2017 (I)).

Tienen una precisión de $\pm 0.2\%$.

Aplicaciones

Evaluación del contenido de humedad en hormigón duro y en hormigón fresco (Proceq. 2012).

Normativa

ASTM F2170 -17

33. Método de Madurez



Fig. 4.39 Lector y registrador Interllirock (Scancemmaterials. 2005).

Descripción

Es una técnica de estimación de la resistencia del hormigón que tiene en cuenta los efectos del tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia in situ. Este método proporciona una estimación continua de la resistencia del hormigón durante el período de curado (Scancemmaterials. 2005).

Metodología

La solidez de una mezcla de hormigón se expresa en función de su índice de madurez mediante una relación fuerza-madurez. Es muy importante verificar los resultados con cilindros estándar. (Dámazo. 2006). Se requiere de un monitor para visualizar los datos y de sensores puestos en etapa de hormigonado para captarlos.

Características

Las estimaciones de resistencia se basan en dos supuestos importantes:

1. Hay suficiente agua para la hidratación continua; y
2. El hormigón en la estructura es el mismo que el utilizado para desarrollar la relación resistencia-madurez.

Requiere personal con experiencia en su aplicación, equipo especial y muestras previas del hormigón a evaluar. (Dámazo. 2006)

Aplicaciones

Estimar el desarrollo de la resistencia del hormigón recién colocado.

Descimbre temprano.

Aplicación de post tensado.

Protección para hormigones masivos, retracciones térmicas.

Normativa

ASTM C1074-11 | ACI 306R-16 | CSA A23.1, A23.2 | ACI 318-14 | NEN 5970: 2001

34. Pull-Out



Fig. 4.40 Prueba Pull-Out (Hissain. 2013).

Descripción

Este ensayo consiste en la prueba de tracción que mide la fuerza necesaria para extraer un inserto incrustado de una masa de hormigón. Mediante el uso de una relación previamente establecida, se utiliza la carga final de extracción medida para estimar la resistencia a la compresión del hormigón (BS-103.2009).

Metodología

Debe ser planeada antes de la colocación del hormigón ya que se deben en dejar ahogados insertos metálicos parecidos a un hongo con una perforación roscada. Al llegar la edad de determinación de la resistencia se extrae el inserto usando un gato hidráulico que cuenta con dispositivos especiales de anclaje y medición de la fuerza de extracción ejercida para extraer el inserto (Dámazo. 2006).

Los equipos necesarios para el ensayo de extracción consistirán en lo siguiente:

- a) Barras o discos de acero con formas especiales.
- b) Dinamómetro para aplicar la fuerza.
- (c) El pistón de carga asentado en el anillo del rodamiento para aplicar la fuerza de extracción.

Características

Esta prueba se ve limitada a elementos en proceso de colado. Se acepta colocar los insertos en el hormigón fresco, pero se deben tener ciertas precauciones para no afectar la calidad del hormigón adyacente.

La obtención de la fuerza de tracción tiene una precisión de 0,1 kN.

Aplicaciones

Determinar resistencia a la compresión del hormigón.

Para estructuras nuevas se utiliza para planificación de remoción de moldaje y aplicación de postensados (BS-103.2009).

Normativa

ASTM C900 - 15 | BS 1881 Part 207

35. Pull-Off



Fig. 4.41 Equipo Pull-Off (Proceq. 2017 (I)).

Descripción

Este ensayo se realiza para determinar la resistencia a la tracción cerca de la superficie de un sustrato, como un indicador de la adecuada preparación de la superficie antes de la aplicación de un material de reparación o de recubrimiento (ASTM C1583-13).

Metodología

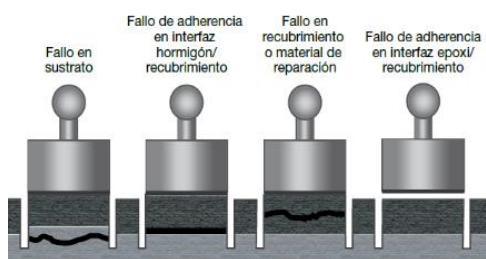


Fig. 4.42 Tipos de fallas (Proceq. 2017 (I)).

Se pule la superficie y se marca para pegar el disco de prueba. Se pega el disco al hormigón con un adhesivo de mayor resistencia que la esperada a tensión, se fija el aparato al disco, se aplica la fuerza a tensión. Conocida la fuerza y el área del disco, se calcula la adherencia del hormigón como un esfuerzo (Dámazo. 2006).

Características

La ejecución de ensayos de arranque o adherencia es uno de los métodos más usados en la industria de la construcción (Proceq. 2017 (I)).

Tiene una precisión de ± 1 % del 20 % de la fuerza máxima.

Aplicaciones

Determinación de la adherencia (Dámazo. 2006).

Evaluar la fuerza de adhesión in situ entre una capa de reparación y el sustrato.

Evaluar la resistencia a la tracción en obra del hormigón u otros materiales.

Evaluar el efecto de los procedimientos de preparación de la superficie sobre la resistencia a la tracción del sustrato antes de aplicar un material de reparación o recubrimiento (Germann Instruments. 2014).

Normativa

EN 1542:2000 | EN 1015-12:2016 | EN 1348:2008 | ISO 4624:2016 | BS 1881 Part 207 | ASTM D4541 - 17 | ASTM C1583 / C1583M | ASTM D7234 - 12 | ASTM D7522/ D7522M – 15 | ZTV-SIB 90.

36. Break-off

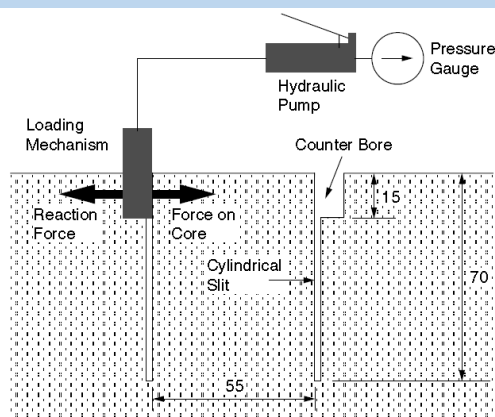


Fig. 4.43 Esquema de la muestra cilíndrica de hormigón y su ubicación de carga aplicada de ensayo (Naik. 2003).

Descripción

Este método de ensayo cubre la determinación del número de rotura del hormigón endurecido en especímenes o estructuras de ensayo, midiendo la fuerza necesaria para provocar la falla de un espécimen de núcleo pre-moldeado o perforado cargado como un voladizo (ASTM C1150-96).

Metodología

Consiste en obtener un cilindro de hormigón del cuerpo de la estructura, previamente preparado. Los cilindros son colados dentro en el elemento de hormigón por medio de una camisa plástica desechable que se inserta durante el colado y se extrae antes de la prueba. Se hace una muesca en los bordes del hormigón para apoyar el dispositivo de presión. Se aplica una fuerza lateral al cilindro para romper el núcleo en el fondo y prepararlo del elemento estructural. La fuerza aplicada ayuda a calcular la resistencia a flexión del hormigón (Dámazo. 2006).

Características

Mide el parámetro de resistencia directa (Naik. 2003).

El espécimen también puede formarse mediante el uso de una broca para corazones (Dámazo. 2006).

La precisión del ensayo es de $\pm 4\%$.

Aplicaciones

Determinar la resistencia a flexión del hormigón (Dámazo. 2006).

Se puede utilizar tanto para el control de calidad como para el aseguramiento de la calidad. El uso más práctico es determinar el tiempo para la remoción segura del moldaje, y el tiempo de liberación para transferir la fuerza en los miembros pretensados o postensados. El método también se puede utilizar para evaluar las estructuras existentes. Se ha reportado que la prueba proporciona una manera más efectiva para detectar condiciones de curado del hormigón (Naik. 2003).

Normativa

ASTM C1150-96

37. Método Torrent



Fig. 4.44 Equipo de método Torrent (Torrent & Ebensperger. 2010).

Descripción

El método Torrent proporciona una medición rápida, fiable y no destructiva de la permeabilidad al aire de estructuras de hormigón (Proceq. 2017 (I)). Se basa en crear vacío dentro de una celda colocada sobre la superficie del mismo y en medir la velocidad con que la presión retorna al valor atmosférico (Torrent & Ebensperger. 2010).

Metodología

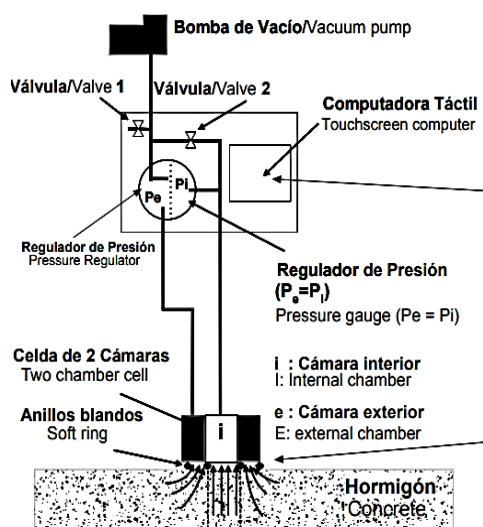


Fig. 4.45 Esquema y detalles del método Torrent (Torrent & Ebensperger. 2010).

Para su funcionamiento se debe cerrar la válvula 1 y tener la válvula 2 abierta, se crea vacío en ambas cámaras mediante la bomba. Cuando la presión P_i baja a 30 mbar se cierra la válvula 2, Se equilibra la presión en ambas cámaras. La presión P_i se mide a partir de los 60 s. Se efectúan los cálculos para mostrar el valor del coeficiente de permeabilidad al aire kT (m^2)

Tabla 4.2 Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de K_t

Clase N°	Descripción	$kT(10^{-16}m^2)$
1	Excelente	<0.01
2	Muy buena	$0.01-0.01$
3	Normal	$0.1-1$
4	Pobre	$1-10$
5	Muy Mala	>10

Características

La clase 1 corresponde a hormigones de alta resistencia (>60 MPa), bien compactados y curados, la clase 5 corresponde a hormigones de baja resistencia (>15 MPa) mal curados (Torrent 1998). Una medición de la permeabilidad in. Situ dura de 2 a 12 minutos, precisa, repetible (Torrent & Ebensperger. 2010).

Aplicaciones

Especificar y controlar la calidad del recubrimiento de la estructura terminada, medir la resistencia del hormigón de recubrimiento a la penetración, por distintos mecanismos, de agentes agresivos que afectan la durabilidad de las estructuras (Torrent & Ebensperger. 2010).

Normativa

SIA 262/1-E

38. Prueba de Carga



Fig. 4.46 Prueba de carga (CivilGeek. 2011).

Descripción

La prueba de carga de una estructura es un conjunto de operaciones consistente en la reproducción de uno o varios estados de carga sobre la misma, con objeto de confirmar que el proyecto y construcción de la obra se han llevado a cabo de forma satisfactoria (Serie normativas. 1999).

Metodología

La prueba consiste en cargar el elemento a evaluar con 85% de la carga de diseño. La carga se aplica en fracciones de 25% y se toman lecturas de deformación en cada etapa y la final. El elemento se deja cargado 24 horas y se mide de nuevo la deformación. Se descarga y se mide la recuperación del elemento, volviéndose a determinar la deformación a las 24 horas de descargado. Si el elemento se recupera a 75% o más de la deformación total y no se aprecian daños, agrietamientos, desprendimiento de hormigón o fallas en el mismo, se da por concluida la prueba. Si la recuperación no llega a 75% se esperan 72 horas para medir la recuperación (Dámazo. 2006).

Características

Requiere de sensores de desplazamiento, extensómetros, acelerómetros y otros artefactos para realizar las mediciones. Generalmente los extensómetros tienen una precisión de 0,01 mm.

Requiere de personal capacitado y equipo especializado.

Una prueba de carga no debe realizarse hasta que la porción de la estructura que se someterá a la carga tenga al menos 56 días de edad (ACI 318S-14).

Aplicaciones

Evaluar la resistencia en recepción de una estructura. Evaluar la resistencia en estructuras existentes. Verificar la capacidad portante. Establecer la reserva de carga de servicio. Para estudiar la factibilidad del cambio de uso de la estructura. Estructuras sometidas a sobrecargas inhabituales, como fuego o explosión. Estructuras defectuosas, por su concepción, deficiencias del material o mano de obra. Estructuras reparadas. Estructuras de forma o concepción especial (CivilGeek. 2011).

Normativa

ACI 318-14 | ASTM D4945 – 12

39. Deflectómetro de Impacto



Fig. 4.47 Deflectómetro de impacto (Road Survey Devices. S.f.).

Descripción

El ensayo de deflexión se realiza sobre la superficie de una estructura a auscultar, la cual, es sometida al impacto de una masa en caída libre con diferentes alturas predeterminadas, registrando las deformaciones elásticas, mediante una serie de sensores (Figueroa. 2009).

Metodología

El ensayo simula el pulso de una carga de tráfico a través de una masa que se deja caer en caída libre, el impacto es transmitido a través de un plato sobre la superficie auscultada.

En reposo se ubica el equipo y sobre la superficie se ubica el plato de carga y el conjunto de sensores. Se levanta la masa a alturas predeterminadas y se deja caer para registrar las deflexiones del pavimento, mediante una serie de sensores, los cuales deben ser capaces de diferenciar el reposo inicial y la máxima deflexión.

Se registran el valor de la temperatura, acompañado del valor de la fuerza máxima. Luego mediante un método de retro-análisis se pueden obtener los parámetros de rigidez del pavimento (Figueroa. 2009).

Características

Las superficies donde se mide las deflexiones pueden ser: pavimentos flexibles, rígidos o compuestos (recapados), capas granulares o suelos de fundación.

La precisión del ensayo generalmente es de un 0,5% para valores de hasta 10-3 mm pero se ve influenciada por la precisión de la celda de carga de $2\% \pm 0,2$ KN, la precisión del geófono mejor que $\pm 2\%$ y la precisión del contador de distancia que debe ser mejor que ± 1 m.

Aplicaciones

Evaluación de calidad estructural del pavimento y estimación de su vida útil. Detección de vacíos bajo losas de hormigón. Capacidad de transferencia de carga entre losas de pavimentos rígidos o compuestos. Estimar la capacidad estructural y propiedades de los materiales de cada capa en forma individual. Determinación en forma estadística de secciones con diferentes comportamientos.

Se utiliza en proyectos de control, rehabilitación, investigación y detección de fallas.

Normativa

ASTM E2583 - 07(2015) | ASTM D4695 - 03(2015) | ASTM D4694 - 09(2015) | UNE 41250-3:2016

40. Dynatim (Ensayo de carga dinámica)

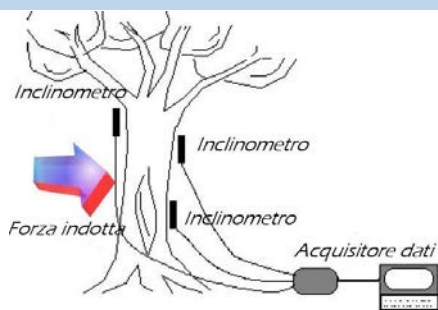


Fig. 4.48 Esquema explicativo del sistema Dynatim (Passola. 2013).

Descripción

Este ensayo se utiliza para conocer el comportamiento ante carga dinámica. La frecuencia natural de vibración representa una importante propiedad mecánica. Cuando una pieza vibra, su frecuencia natural de vibración está relacionada con algunas de sus propiedades físicas y mecánicas (Marín. 2013).

Metodología

El sistema Dynatim somete a la estructura de madera a una carga en la zona elástica de la deformación (para no generar daños en su estructura) y permite determinar la carga de rotura y, asociada a esta carga, la fuerza del viento necesaria para generarla. Consiste en medir la frecuencia natural de vibración de una pieza y, a partir de ella, estimar sus propiedades resistentes (Passola. 2013).

Características

Sistema de grabación que es sensible a los movimientos mínimos del árbol o de las construcciones de madera. Específicamente, está formado por software para visualización y registro continuo de inclinación y comportamiento elástico bajo la acción del viento o bajo la acción de fuerzas inducidas en diferentes dimensiones espaciales (Passola. 2013).

Precisiones: para el sensor de inclinación $0,001^\circ$, sensor de fuerza de tracción 1 kg y el sensor de alargamiento 0,001mm.

Aplicaciones

Estimar la resistencia a la rotura y al vuelco. Estudiar y analizar el comportamiento de las estructuras bajo las cargas y oscilaciones.

Normativa

No existe

41. Extracción de tornillos



Fig. 4.49 Extracción de tornillos en obra (Basterra *et al.* 2009).

Descripción

Este ensayo utiliza un dispositivo que registra la máxima fuerza que se requiere para arrancar un tornillo de características específicas previamente introducido en la pieza de madera. (Basterra *et al.* 2009).

Metodología

El instrumento registra el arranque de un tornillo de 4mm de diámetro y 18mm de longitud. La fuerza que se necesita para realizar el arranque está relacionada con la densidad y el módulo de elasticidad en piezas pequeñas y libres de defectos (Rodríguez. 2009).

Características

La escasa penetración del tornillo ofrece información localizada de la pieza de difícil extrapolación a madera estructural de gran escuadría (Rodríguez. 2009).

Aplicaciones

Detectar daños y lesiones ocultos en las piezas de madera.

Obtención de la densidad de la madera.

Normativa

No existe

42. Resistógrafo



Fig. 4.50 Uso del Resistógrafo in situ (Marín. 2013).

Descripción

La resistografía es un ensayo que se basa en la evaluación de la energía consumida al penetrar la madera con una aguja calibrada, es decir, la resistencia que la madera opone a la penetración de una broca a velocidad constante, medida como el consumo de potencia de motor de taladro, que podrá relacionarse con la densidad del elemento a ensayar (Basterra *et al.* 2009).

Metodología

El ensayo se realiza mediante el taladro, incrustando una aguja calibrada en el elemento.

El registro de datos se realiza mediante la aplicación instantánea del ensayo en dos formas:

Gráficamente en escala 1:1 con una impresión en papel y Numéricamente, se almacenan en el ordenador datos por cada centímetro de penetración de la aguja (Basterra *et al.* 2009).

Características

Se utiliza una broca de 1,5 mm de diámetro de vástago y 3 mm en la cabeza.

La potencia consumida es variable según la zona que atraviere y son estas variaciones las que ofrece el aparato gráficamente en forma de resistograma.

La resolución del ensayo es tan alta que se pueden detectar variaciones de densidad entre los anillos de crecimiento del árbol (Basterra *et al.* 2009).

Aplicaciones

Inspección de zona oculta de las cabezas de las piezas (dentro de un muro)

Detección de pudriciones interiores en zonas sensibles a la degradación y susceptibles de acarrear problemas graves en el futuro (Basterra *et al.* 2009).

Normativa

No existe

43. Gato Plano



Fig. 4.51 Ensayo de gato plano sobre albañilería
(Lombillo. 2010).

Descripción

Es una técnica para medir la tensión en una estructura de albañilería en una zona cercana a la superficie. Consiste en dos planchas de acero inoxidable soldadas a lo largo de las esquinas con uno o dos puertos de entrada y salida, que conectados a un circuito hidráulico con bomba son capaces de producir una presión interna (Monteagudo. 2010).

Metodología

Para su utilización se requiere de la extracción de una porción de mortero en la junta en la que se desea conocer la tensión. Se introduce el gato plano y se aplica presión hasta que los puntos recobren su posición inicial. La presión hidráulica requerida es igual a la tensión existente. Al final del ensayo se rellena la hendidura. La relación entre la tensión y la deformación permiten calcular el módulo de deformación (Monteagudo. 2010).

Características

Para calcular estimación de deformabilidad se emplean dos gatos planos, pudiendo tener un error de hasta un 20%.

Aplicaciones

Medir la tensión y estimar deformaciones en estructura de albañilería.

Normativa

ASTM D 4729-08 | RILEM LUM.D.2. | RILEM LUM .D.3.

44. Hole Drilling

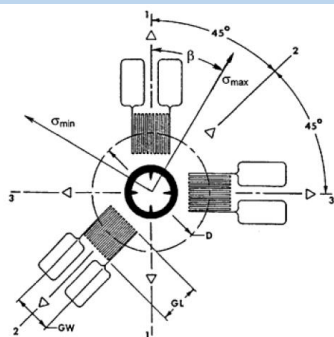


Fig. 4.52 Esquema de roseta del ensayo de hole drilling
(Monteagudo. 2010).

Descripción

Este ensayo consiste en la medición de las tensiones reales de servicio a la que están sometidos los ladrillos. Se basa en la medida de las deformaciones captadas por tres bandas extensométricas. El estado tensional al que estaba sometida la zona analizada puede deducirse, a partir de estas deformaciones, mediante el adecuado proceso matemático (Monteagudo. 2010).

Metodología

Para realizar este ensayo se debe realizar un pulido superficial que debe abarcar una zona tal que asegure que las bandas extensométricas se coloquen sobre un ladrillo (cada una en un ladrillo) y que el taladro se centre en otro. En el caso de albañilería el taladro abarcará mortero y ladrillo (Monteagudo. 2009). En primer lugar se miden las distancias de los diámetros de la roseta, a continuación se ejecuta una perforación mediante un taladro de corona hueca concéntrica con la roseta referida. Finalmente, se registran los desplazamientos de la superficie de la roseta debido a la relajación tensional (Lombillo. 2010).

Características

Requiere ensayos complementarios (ensayo de gato plano, ver Ficha 43), se necesita conocer las características de deformabilidad del punto de ensayo. Se necesita una superficie accesible y libre de al menos 20 cm x 20 cm (Lombillo. 2010). Posee una precisión del $\pm 20\%$.

Aplicaciones

Deducir estados tensionales en servicio y su dirección a partir de tres deformaciones registradas en tres direcciones.

Permite deducir un estado tensional plano completo, siendo posible obtener estados a tracción.

Normativa

ASTM E 837-13

45. Esclerómetro de rebote



Fig. 4.53 Esclerómetro Schmidt (Proceq. 2017 (I)).

Descripción

En este ensayo se utilizan instrumentos usados para medir las propiedades elásticas o la resistencia del hormigón o roca. (Proceq. 2017 (I)). Se obtiene un valor de índice de rebote de una zona. Las lecturas obtenidas se introducen en una curva facilitada por el fabricante que permite estimar una resistencia a compresión (Fernández. 2014).

Metodología

Debe aplicarse en superficies sanas, lisas, limpias y sin recubrimiento, con un espesor mayor a 10 cm y un diámetro no menor a 15 cm.

Se debe sujetar el esclerómetro firmemente de modo que el émbolo golpee perpendicularmente a la superficie de ensayo. Aumentar gradualmente la presión contra la superficie de ensayo hasta que el martillo dispare. Después de cada impacto mantener presionado el instrumento. Leer en la escala aproximando al entero más próximo y registrar el valor. Tomar 10 lecturas por cada área de ensayo. La distancia entre dos puntos de impacto debe ser $\leq 25\text{mm}$ y la distancia al borde $\leq 50\text{ mm}$. (NCh 1565.Of2009)

Características

Se puede aplicar en hormigón fresco, hormigón de baja resistencia, hormigón normal, hormigón de alta resistencia y en hormigón de rendimiento ultra alto. Para los casos especiales se deben utilizar curvas personalizadas definidas (Proceq. 2017 (I)).

Aporta buenos resultados en hormigones jóvenes (< 28 días), aparato de bajo peso, se utiliza in-situ. Los resultados se ven alterados si el hormigón ha sufrido carbonatación (Fernández. 2014).

La precisión es de $\pm 15\%$ en el valor de la resistencia, indicado en la curva facilitada por el fabricante.

Aplicaciones

Evaluar la uniformidad del hormigón in situ; Delinear zonas de hormigón deteriorado o de baja calidad en una estructura; estimar el desarrollo de resistencia in situ. (NCh 1565.Of2009)

Obtener la resistencia a la compresión y homogeneidad. (Proceq. 2017 (I))

Normativa

ASTM C805 / C805M-13a | ASTM D5873-14 | BS EN 12504-2:2001 | DIN 1048-2 | EN 12504-2:2013 | EN 13791:2009 | ISO 1920-7:2004 | JGJ/T 23-2011 | NCh 1565.Of2009

46. Resistencia a la Penetración



Fig. 4.54 Set de ensayo Windsor (INDOT. 2013).

Descripción

Los métodos de resistencia a la penetración se basan en la determinación de la profundidad de penetración de las sondas (varillas o pernos de acero) en el hormigón. Esto proporciona una medida de la dureza o resistencia a la penetración del material que puede estar relacionada con su resistencia (BS – 103. 2009).

Metodología

La sonda Windsor se compone de una pistola accionada por polvo o un excitador, sondas de acero aleado endurecido, cartuchos cargados, un medidor de profundidad para medir la penetración de las sondas y otros equipos relacionados (BS – 103. 2009). Consiste en lanzar tres elementos metálicos impulsados por la carga determinada de pólvora. La determinación de la calidad del hormigón está en función de la longitud promedio que los insertos penetren en el hormigón midiendo la parte externa de estos usando una placa triangular (Dámazo. 2006).

Características

Requiere de equipo especial y de personal capacitado.

La prueba también causa algunos daños menores en la superficie, que generalmente necesitan ser reparados.

Las principales ventajas de esta prueba son la velocidad y la simplicidad, y sólo se requiere una superficie para la prueba.

Cada carga tiene un nivel de energía para dar una velocidad de salida con una tolerancia de + 3%.

Aplicaciones

Determinar la resistencia a la compresión del hormigón in situ, esto se utiliza para garantizar el control de calidad. Determinar el tiempo seguro de retirada del moldaje. Determinar la uniformidad del hormigón y delimitar zonas de mala calidad o de hormigón deteriorado en las estructuras (BS – 103. 2009).

Normativa

ASTM C803/ C803M-17 | BS 1881 Part 207

47. Penetrómetro



Fig. 4.55 Empleo del penetrómetro Pilodyn 6J (Palaia. 2014.)

Descripción

Para este ensayo se utiliza un aparato que mide la profundidad de penetración de una varilla de acero que es impulsada por un resorte con una energía conocida. Por tanto, el valor obtenido es el valor de resistencia a la penetración que, a su vez, está íntimamente ligado entre otras características del material con la dureza superficial (Marín. 2013).

Metodología

Funciona mediante el disparo de una aguja de acero ($\varnothing$ 2,5 mm. o $\varnothing$ 2,0 mm) sobre la madera con una energía uniforme. La profundidad de penetración se lee en una escala. La punta se cambia cada 5.000 golpes aproximadamente (Pilodyn. S.f.).

Características

Tiene como ventaja su ligereza, la portabilidad, la facilidad de manejo y la obtención de un valor numérico. El inconveniente es que el valor obtenido resulta poco representativo ya que es excesivamente local y se recomienda realizar varias lecturas en puntos próximos para tomar el valor medio.

Aplicaciones

Detectar zonas con una dureza inferior a la media en la zona superficial de la madera.

Determinar propiedades mecánicas de árboles.

Determinar la densidad de elementos estructurales.

Normativa

UNE 41809:2014

48. Durómetros



Fig. 4.56 Equotip (Proceq. 2017 (IV)).

Descripción

Este ensayo consiste en la medición de la dureza de los materiales utilizando equipos portátiles que se basan en los métodos Leeb, Rockwell, Vickers, Brinell, UCI, entre otros, dependiendo de las distintas aleaciones o material. Permiten la inspección de prácticamente cualquier objeto, de piezas pulidas y superficies tratadas térmicamente.

Metodología

Las mediciones de dureza se realizan usando el método de ensayos de rebote dinámico según Leeb o Shore, el ensayo de dureza estática portable Rockwell o Brinell y el método de impedancia de contacto ultrasónica (UCI). Los durómetros están diseñados para la ejecución de ensayos de dureza portátiles en el laboratorio o en el emplazamiento. La innovación más reciente es un dispositivo de impacto inalámbrico, una aplicación móvil, datos en tiempo real y una función de copia de seguridad en una nube (Proceq. 2017 (IV)).

Características

Depende de otras propiedades como la elasticidad, la plasticidad y la cohesión.

Existen distintos tipos de principios de ensayos de dureza que se utilizan dependiendo del material a ensayar.

Tiene una precisión de $\pm 0,5\%$.

Aplicaciones

Analizar la homogeneidad de un material. Comprobar la homogeneidad de un tratamiento. Búsqueda de fallos en soldaduras y ensambles. Obtener la resistencia al desgaste. Evaluar aproximadamente la resistencia a tracción.

Normativa

ASTM A956 /A956M – 17 | DIN 50156 | GB / T 17394 a 1998 | ISO 16859:2015 | DIN 50157 | ASTM A1038 – 13e1 | DIN 50159: 2015 -01 | ASTM D2240: 2015 | ASTM E 10-17 | ISO 6506-1:2014 | ISO 18265:2013 | NCh1474.Of1978 | NCh197.Of 1956 | NCh198.Of 1956 | NCh1473.Of 1978 | NCh1832.Of 1981

49. Carbonatación



Fig. 4.57 Ensayo de carbonatación (Gavilán y Asociados. S.f).

Descripción

Es un ensayo químico. Requiere de materiales especiales y de personal capacitado para su ejecución. Se utiliza para diagnóstico del hormigón y se puede realizar rápidamente in situ. Se basa en cambios de color producidos en la superficie del hormigón por un agente reactivo (Dámazo. 2006).

Metodología

Se emplea generalmente la sustancia fenolftaleína al 1% en alcohol 70% sobre el hormigón a ensayar, el cual debe estar expuesto, en caso de no estarlo se realiza una perforación. Se deben observar los cambios de coloración que se producen. Si el hormigón se colorea violeta indica PH aceptable, pero si no varía de color, indica una carbonatación y su PH será menor a 9,2.

Características

Se requiere Fenolftaleína y un medidor de profundidad.

Aplicaciones

Estimar profundidad de carbonatación para conocer la vida útil residual del elemento de hormigón armado.

Normativa

EN 13295: 2004

50. Clorímetro



Fig. 4.58 Principales componentes del ensayo sistema prove'it (Germann Instruments. 2014).

Descripción

Ensayo que permite evaluar la resistencia en el hormigón al ingreso de iones cloruros. Se determina que tan fácil es forzar a los cloruros dentro del hormigón saturado, por medio de la aplicación de un potencial eléctrico a través de un espécimen de prueba (Germann Instruments. 2014).

Metodología

Se debe obtener una muestra de diámetro de 100 mm, espesor de 50 mm, saturado de agua. Se coloca el espécimen asentado en las celdas. Las cámaras deben tener soluciones de NaCl al 3% y NaOH 0,3 N. Se mide la corriente durante 6 horas con un instrumento de alimentación de 60 V para finalmente calcular la carga total pasada a través de la muestra como el área debajo de la corriente- curva de tiempo (ASTM C1202-12). De la siguiente tabla se pueden obtener los resultados.

Carga pasada (Coulomb) para muestras de 95mm diámetro y 51mm espesor	Penetración de iones de cloruro	Típico de *(w/c = relación agua cemento)
>4000	Elevado	w/c $\geq$ 0.5
2000 a 4000	Moderado	w/c = 0.4 a 0.5
1000 a 2000	Mínimo	w/c < 0.4
100 a 1000	Muy baja	Hormigón modificado con látex
< 100	insignificante	Hormigón polimérico

Tabla 4.3 Penetrabilidad de iones de cloruro según en la carga pasada (Germann Instruments. 2014).

Características

Requiere de equipo y personal capacitado. La duración de la prueba es de seis horas, se pueden ensayar ocho especímenes a la vez.

La permeabilidad es por medición de la penetración de los iones-cloruro en la muestra de hormigón. Se produce un ligero deterioro al extraer los núcleos de hormigón que después debe ser reparado (Dámazo. 2006).

Aplicaciones

Evaluar la resistencia del hormigón al ingreso de iones cloruros. El resultado de este ensayo igual se puede relacionar con: El tipo de cemento y contenido de otros aglutinantes, la porosidad de la pasta de cemento y la Conectividad y tortuosidad de los poros en la pasta de cemento.

Normativa

ASTM C1202 - 17 | ACI 234R-96 | T259-80. | AASHTO T 277 - 2015 | NT Build 492 | ASTM C1760- 12 | XP P 18-461

CAPÍTULO V PROGRAMA DE END PARA EL PUENTE CALLE-CALLE I

5.1 Introducción

Una de las actividades más importantes relacionadas con la aplicación de los END es elegir el o los que generen resultados útiles y confiables para el usuario según los recursos que se tienen.

Para ello se deben considerar las distintas circunstancias, principalmente de acuerdo con el campo de acción y sensibilidad de cada grupo de métodos. Los ensayos de un grupo de métodos no sustituyen a los de otro grupo, ya que algunos son efectivos de forma superficial y otros lo son sólo al interior del elemento a inspeccionar. Los ensayos se pueden complementar entre sí, porque entregan información importante para que el siguiente ensayo se pueda realizar y por lo mismo no se sustituyen debido a sus propias limitaciones.

5.1.1 Conceptos básicos

Para la realización del programa de ensayos en el Puente Calle-Calle I se debe tener conocimiento de la nomenclatura y definiciones básicas de un puente, éstas fueron obtenidas del Manual de Carreteras Vol.3 y Vol.7 (2017).

5.1.2 Clasificación

Un puente se puede clasificar según lo descrito en la siguiente tabla:

Clasificaciones de puentes					
Longitud Total (L)	Longitud de Vano (Lv)	Calzada	Objetivo	Materiales	Diseño
- Alcantarillas y puentes losas $0,5m \leq L \leq 10m$ - Puentes menores $10m < L \leq 40m$ - Puentes medianos $40m < L \leq 200m$ - Puentes mayores $200m < L$	- Alcantarillas y estructuras menores $0,5m \leq Lv \leq 10m$ - Estructuras medianas $10m < Lv \leq 70m$ - Estructuras Mayores $70m < Lv$	De acuerdo al número de pistas o vías de tránsito para el que está diseñado el puente: - Simple Vía - Doble Vía - Triple Vía o más	- Puentes rurales - Puentes urbanos - Viaductos - Pasos desnivelados - Pasarelas - Puentes ferroviarios - Puentes militares - Puentes provisorios	- Madera - Acero - Hormigón armado - Hormigón pretensado - Acero estructural de corrugación profunda - Mampostería y sillería - Puentes mixtos (combinación de materiales)	- Puentes de tramos simplemente apoyados, continuos o de vigas voladizas (Gerber) - Puentes en arco - Puentes apuntalados - Puentes aporticados, marcos - Puentes colgantes, con o sin viga atiesadora - Puentes atirantados - Puentes de acero estructural de corrugación profunda

Tabla 5.1 Criterios de clasificaciones de puentes (Adaptado del Manual de Carreteras Vol.3. 2017).

5.1.3 Nomenclatura

Eje Longitudinal del Puente: En los puentes de calzada simple (dos pistas), es el eje de la calzada del puente.

Eje de Estribos: es el eje definido por la intersección de un plano vertical que pasa por el eje longitudinal del puente y el plano que está definido por la superficie de la cara contrario al lado de las tierras del muro espaldar del estribo. Estos ejes definen los kilómetros de entrada y salida del puente, según el sentido de avance del kilometraje.

Eje de Cepas: es el eje definido por la intersección de un plano vertical que pasa por el eje longitudinal del puente y el plano vertical que pasa por el eje longitudinal de la planta de la cepa.

Longitud Total: Es la longitud medida entre los ejes de ambos estribos y se mide como la diferencia entre las distancias acumuladas de entrada y salida del puente.

Longitud Tramo: Es la distancia comprendida entre ejes de estribos, en el caso de puentes de un tramo, o entre ejes de estribos y cepas y/o entre ejes de cepas, en el caso de puentes de más de un tramo. Esta longitud comprende el largo de la losa del tramo más la mitad de la separación de las juntas de dilatación.

Luz Libre o Vano: Es la distancia libre entre los paramentos de muros de las elevaciones de cepas y/o estribos. Según la cantidad de tramos del puente, pueden existir variedad de luces y en tal caso se hablará de luz mayor y menor.

Luz de Cálculo: Es la longitud de diseño de las vigas o losas y se mide, normalmente, entre centros de apoyo.

Calzada: Es el área del puente destinada al tránsito vehicular, cuyo ancho se mide en forma perpendicular al Eje Longitudinal del Puente.

Pista o Vía de Tránsito: Es la faja de la calzada destinada a la circulación de una sola fila de vehículos.

Pasillos o Aceras: Zona longitudinal del puente, elevada o no, reservada al tránsito de peatones.

Bandejón: Franja longitudinal del puente no destinada a la circulación de vehículos, que separa calzadas contiguas.

Ancho del Puente: Corresponde al ancho total de la superestructura e incluye, calzadas, medianas, pasillos y barandas.

Gálibo: Altura existente entre el fondo de viga y el fondo del lecho en el caso del cruce sobre ríos o esteros.

Revancha: Es la distancia vertical entre la cota de aguas máximas o de diseño y el fondo de vigas o cota inferior de la superestructura del puente.

Barras de Anclaje: Elementos de fijación de la superestructura a la infraestructura. Habitualmente esta fijación se hace a través de los travesaños extremos directamente a los cabezales y mesas de apoyo.

Cantoneras: Son perfiles angulares metálicos colocados en los cantos vivos de las losas de hormigón para protegerlos del golpe de las ruedas.

Juntas de Expansión: Elemento cuyo propósito es permitir las deformaciones longitudinales debidas a cambios de temperatura, sismos u otras acciones. Deben proteger los cantos vivos y ser estancas para proteger los sistemas de apoyo.

Barbacanas o desagües: Elementos que permiten vaciar las aguas lluvias que fluyen sobre la calzada y pasillos del puente.

Sistemas de Apoyo: Son elementos sobre los que se apoya el sistema de vigas o losas del tablero y que permite el traspaso de las cargas a la infraestructura. Habitualmente son de neopreno y se ubican entre la mesa de apoyo y el ala inferior de las vigas o cara inferior de las losas.

Alas: muros de los estribos que contienen lateralmente los terraplenes de acceso o relleno estructural. Según su orientación en planta pueden ser alas rectas u oblicuas, según el ángulo que forman con el muro frontal del estribo.

Esviaje: Ángulo con que un puente cruza sobre un río, cuando el eje definido por los apoyos del sistema estructural del tablero se orienta en forma paralela a estos flujos o vías. Se define como el ángulo agudo medido entre el sentido de escurrimiento del río o estero y la normal al eje longitudinal del puente. Se dirá que el esviaje es derecho cuando el avance de medición del ángulo es hacia la derecha, y es izquierdo cuando el avance de la medición es hacia la izquierda.

Zampeado: Protección de mampostería, hormigón, gaviones o guarda radier para proteger el fondo del lecho contra la socavación.

Cota de Rasante del Puente: Corresponde a las cotas de pavimento del eje de la calzada del puente y sus accesos.

Cota de Aguas Máximas: Es la cota de aguas máximas esperada para la crecida del río, según el período de retorno de diseño.

Cota de Fondo de Lecho: Es la cota inferior del levantamiento topográfico del fondo del lecho.

Cota de Socavación Total: Corresponde al nivel de socavación para distintos períodos de crecidas y debe contemplar la socavación general más la local.

Cota de Fundación: Es la cota de proyecto o la aprobada por la Inspección Técnica y corresponde a la cota de la superficie de contacto donde se apoyan las fundaciones, sean éstas directas, cajones o sobre pilotes.

5.1.4 Definiciones

Una estructura de puente tiene cuatro partes bien definidas, las que son superestructura, infraestructura, accesos y obras de defensa.

Superestructura: Es aquella parte del puente que permite la continuidad del camino con su calzada y bermas, sobre un río u otra vía. La superestructura soporta el paso de las cargas móviles las que transmite a la infraestructura a través de los sistemas de apoyo, y está conformada por uno o más tramos dependiendo de la cantidad de apoyos que la sustenten. La superestructura está constituida por el tablero, su sistema estructural, el sistema de vigas o losas y los dispositivos especiales que tienen determinadas funciones.

Tablero: Está constituido por la superficie de rodadura, los pasillos o aceras y las barandas. Los pasillos o aceras se proveen en aquellos casos donde el tránsito de peatones lo amerita. Las barandas se colocan a lo largo de los bordes externos del sistema del tablero y ellas proporcionan protección. EL tablero puede contemplar además barreras vehiculares o barreras de contención que separen el tránsito peatonal o vehicular.

Sistema estructural del Tablero: Encargado de proporcionar capacidad de soporte de cargas del tablero. Puede ser de madera, hormigón (armado o pretensado) o acero y se apoya habitualmente sobre vigas longitudinales, dependiendo de la longitud de los tramos.

Sistemas de apoyo: Se encuentran entre la superestructura y la infraestructura.

Anclajes antisísmicos: Se contemplan sistemas en la superestructura e infraestructura para evitar los desplazamientos verticales de la superestructura de sus apoyos durante un sismo.

Juntas de expansión: Ante los cambios de longitud por variaciones de temperatura y desplazamientos sísmicos, la superestructura requiere de juntas de expansión que permitan su movilidad; estas juntas habitualmente consideran protecciones en los bordes (cantoneras) y en los puentes más modernos, sellos elastoméricos que impiden la filtración de agua y suciedad hacia las zonas de apoyo.

Barandas: A lo largo de los bordes de la superestructura se encuentran las barandas o barreras que impiden la caída de vehículos y personas desde el puente.

Infraestructura: Es aquella parte del puente donde se apoya la superestructura y a través de la cual se transmiten las cargas al terreno de fundación. La infraestructura está constituida por los estribos (soportes extremos del

puente) y las cepas o pilas que son los apoyos intermedios de puentes con superestructuras construidas por más de un tramo.

Estribos: Están constituidos por dos partes. La primera es la *elevación del estribo* que está conformada por un muro frontal, la mesa de apoyo, el muro espaldar y las alas. La segunda es la *fundación del estribo* que es la encargada de traspasar al terreno las cargas. Existen tres tipos de fundaciones, directa, pilotes y cajones o pilas de fundación. Los estribos también contienen los terraplenes de acceso al puente.

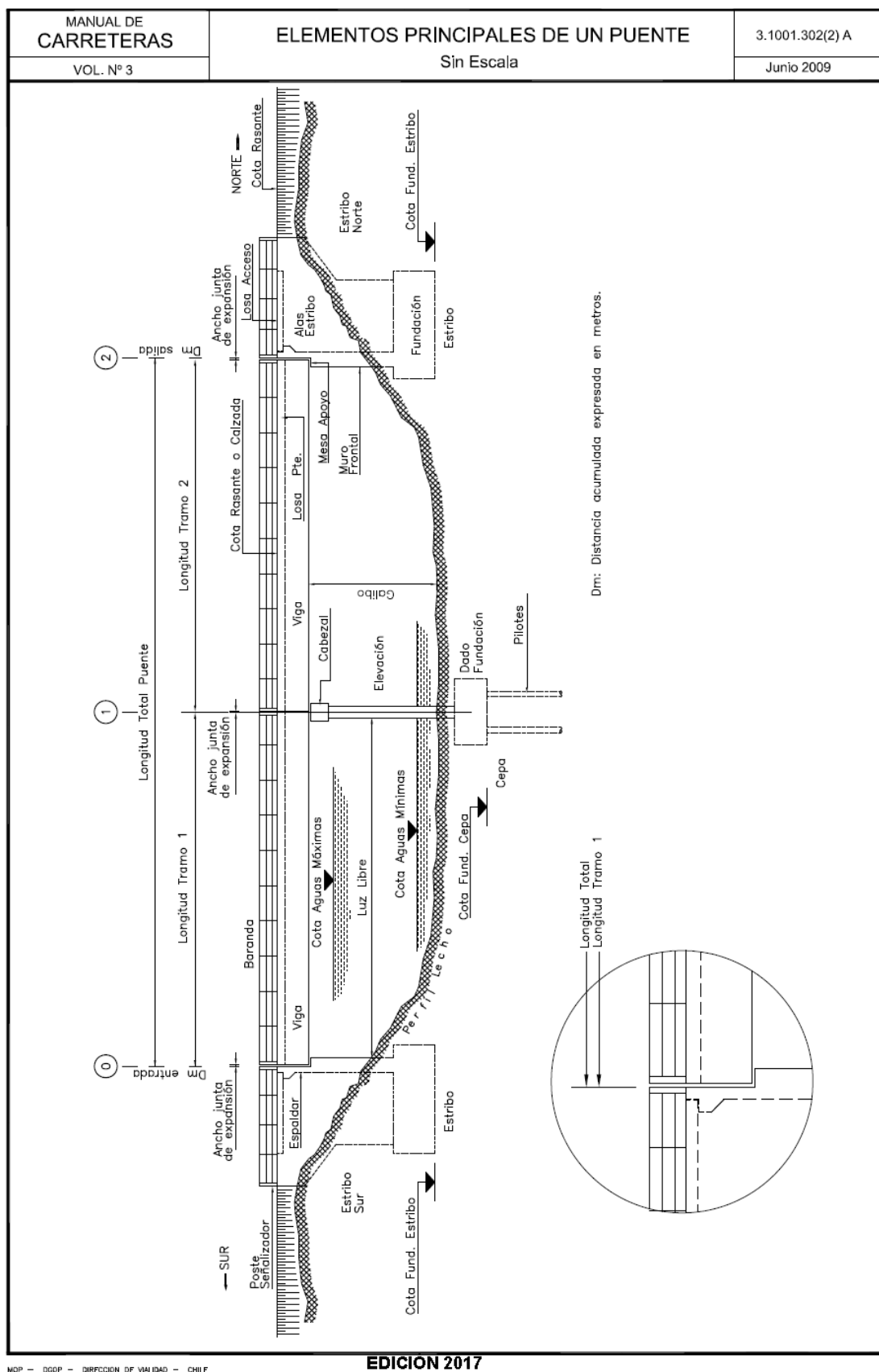
Cepas: Son los apoyos intermedios de los puentes, y al igual que los estribos están constituidos por la elevación y la fundación.

Accesos: Los accesos del puente están constituidos, en general, por las siguientes obras: *terraplenes* de acceso, estructura de pavimentos, bases, *bermas*, y *losas* de acceso.

Obras de defensa: Comprenden los enrocados, gaviones, bajadas de agua en los terraplenes de acceso, y elementos de contención de tierras.

Ver Figura 5.1, en donde se muestran los elementos principales de un puente.

Fig. 5.1 Elementos principales de un puente. (Manual de Carreteras Vol.3. 2017).



5.1.5 Deterioros y Daños

El volumen 7 del Manual de Carreteras 2017 expone que el mantenimiento vial de puentes y estructuras, que son los elementos que demandan la mayor inversión por unidad de longitud de camino, requieren de reparaciones que muchas veces resultan técnicamente complejas y que interfieren el tránsito usuario por periodos muy prolongados, por lo que una falla es normalmente muy perjudicial, ya que inicialmente es muy peligrosa, su efecto es muy destructor y su reemplazo costoso y lento.

El mantenimiento de estas obras es una de las labores fundamentales en la administración de una red vial. Ello implica una inspección regular y acuciosa para detectar falencias y programar oportunamente las correcciones y mantenimientos necesarios.

En general, los daños de tipo estructural, como grietas y fisuras, que afectan los elementos principales de la obra, requieren la participación de especialistas que estudien y definan las causas de la falla y especifiquen su reparación. A su vez, las fallas menores que afectan la serviciabilidad aun cuando no la estabilidad, pueden y deben ser reparados por los equipos habituales de mantenimiento, antes de que pasen a comprometer en forma más severa la estructura.

5.1.5.1 *Deterioros*

Causas que originan el deterioro

Los puentes y pueden deteriorarse por el escurrimiento natural de una corriente, por los vehículos que los utilizan o por causas naturales como sismos, aluviones, corrosión, etc.

Los escurrimientos naturales habituales, las grandes crecidas y aluviones son los que más comúnmente producen daños, tales como socavaciones en torno a las fundaciones, erosiones de los taludes de los terraplenes de acceso y otras fallas similares. La socavación de las fundaciones muchas veces se traduce en asentamientos que generan grietas y fisuras en la estructura.

Los daños más comunes provocados por el tránsito de vehículos son los impactos a las barandas y parapetos, los que producen cargas mayores a la permitida. La circulación de vehículos propiamente tal deteriora el pavimento provocando desgastes, ahuellamientos, fisuras, alabeos, asentamientos entre otros. También se dañan las juntas de expansión, se sueltan las cantoneras, se obstruyen las barbacanas.

Los sismos de magnitud importante son otros de los agentes que provocan daños de consideración, inducen grietas y asentamientos en la infraestructura y, en algunos casos, el colapso parcial o total de la estructura.

El medio ambiente, las variaciones térmicas, humedad del aire, precipitaciones, ambientes marinos, entre otros, provocan deterioros importantes en obras de madera y elementos metálicos. La corrosión de vigas, barandas y arriostramientos metálicos, así como la pudrición de la madera, obligan a efectuar periódicamente su mantenimiento. Los hormigones agrietados o con fisuras sufren la corrosión de armaduras, desprendimiento de recubrimiento dejando al descubierto las enfierraduras con lo que se acentúa el proceso de corrosión. Éste fenómeno es acelerado en las armaduras o cables pretensados en los hormigones post y pretensados, con el agravante de que se puede producir el colapso del elemento estructural.

Los efectos señalados son especialmente notorios en los puentes más antiguos, muchos de los cuales tienen más de 35 años de servicio, en su mayoría obsoletos porque no cumplen los requerimientos básicos de seguridad y capacidad para las actuales cargas de diseño.

5.1.5.2 *Fallas comunes en elementos de hormigón*

Las fallas que comúnmente afectan a los hormigones son: agrietamiento y fisuración, descascaramiento y desprendimiento superficial, corrosión de armadura de refuerzos y pretensadas, mala calidad del hormigón y ataques químicos.

El hormigón es un material que resiste muy bien los esfuerzos de compresión pero es poco resistente a los esfuerzos de tracción, de manera que para mejorar su capacidad resistente se refuerza con armaduras de acero.

Los usos del hormigón en puentes pueden ser los siguientes:

- Hormigón en masa: no lleva armaduras y se usa frecuentemente para estribos, cepas, muros de retención y veredas.
- Hormigón armado: lleva barras de acero y se usa frecuentemente para estribos, capas, tableros, losas, vigas, vigas cajón.
- Hormigón pretensado: lleva acero pretensado en cables o barras, se usa frecuentemente en losas, vigas y vigas cajón.

El agua y aire al interior del hormigón puede corroer el acero de refuerzo o el acero pretensado y acelerar el proceso cuando existen agentes químicos. Esto se puede evitar construyendo un hormigón de buena calidad colocado de manera que proteja efectivamente el acero.

El agua que alcanza el tablero debe evacuarse con prontitud, en caso contrario, tiende a infiltrarse hacia el hormigón de pavimento y la losa; esto pasa cuando las barbacanas están obstruidas o el tablero no dispone de

drenaje y/o pendiente transversal adecuada. El agua libre causa severos daños en las armaduras; así como en las vigas bajo las losas. Se forman grietas, carbonatación y pérdidas de hormigón de recubrimiento.

El agrietamiento fino no constituye un serio problema (fisuras por retracción de fraguado), sin embargo, cuando se detectan grietas de significación, se debe informar a los especialistas para que diagnostiquen las causas del problema y su reparación.

La corrosión es un deterioro habitual y muy importante porque puede provocar el colapso del elemento. El agua salada acelera el proceso. La corrosión tiene su origen en recubrimientos insuficientes o inexistentes de las armaduras, agrietamientos, desprendimiento del hormigón de recubrimiento o nidos de piedra.

Los hormigones de mala calidad presentan, generalmente, nidos de piedra en la superficie que permiten que el agua y el aire se infiltren fácilmente. Debe evitarse la infiltración del agua en la losa.

En el agua o medio ambiente pueden existir agentes químicos que dañan la superficie del hormigón. Como es el caso de la carbonatación del hormigón, que afecta de forma importante su durabilidad. Se produce por acción del tiempo y su exposición a la intemperie. Los hidróxidos de calcio, Ca(OH) , contenidos en el hormigón recién vaciado poseen un $\text{PH} = 12$, que protege a la armadura de refuerzo, con el tiempo se produce una reacción química que produce carbonato de calcio, si el proceso de carbonatación se desarrolla hasta que el PH llegue a valores menores que 9, se crea un ambiente propicio para la oxidación del fierro, iniciándose la corrosión.

Lo señalado indica la importancia de detectar a tiempo el proceso de oxidación de las armaduras, por lo que conviene observar en busca de los siguientes indicios.

- Armaduras a la vista.
- Óxido o fisuras a lo largo de líneas donde debe estar el acero de refuerzo.
- Áreas donde se ha iniciado el desprendimiento del hormigón de recubrimiento.

Los deterioros descritos deben ser reconocidos por personal entrenado adecuadamente, de manera que conozca la forma y modo en que se debe preparar un informe de fallas, y en particular, que reconozca cuales deben ser informadas con urgencia. Una grieta es importante si presenta una abertura de 1 mm o más en su parte más ancha, o si se ubica en un lugar especialmente sensible de la estructura.

5.1.5.3 *Deterioros de los sistemas de apoyo*

Los sistemas de apoyos más comunes para las vigas de una superestructura son las placas elastoméricas; antiguamente se utilizaban placas metálicas. Los deterioros más comunes son los aplastamientos y los desplazamientos. Una placa en buenas condiciones se encuentra centrada respecto al eje de la viga, enteramente en la mesa de apoyo del estribo y no debe presentar signos de aplastamiento.

5.1.5.4 *Deterioro de las barras antisísmicas*

Los elementos que amarran el tablero a la infraestructura y que se instalan por el costado o entre las vigas. El diseño más antiguo consistía en dos barras de acero liso cruzadas, formando un ángulo de 50° (colocadas en el interior de algún ducto sin protección), sus extremos estaban empotrados en la mesa de apoyo del estribo o cepa por un cabo y en la losa por el otro. En la actualidad se colocan de forma vertical, dentro de conductos que permiten un cierto juego, empotradas en un extremo y apernadas en el otro. Cualquier defecto exige una reparación inmediata.

5.1.5.5 *Problemas con los enrocados y gaviones*

La socavación del suelo, tanto localizada en las fundaciones como generalizada del lecho es uno de los problemas más habituales. El descenso que experimenta el lecho móvil con respecto de su nivel natural debido al desbalance entre la capacidad erosiva de una corriente y el suministro de sedimentos. Este descenso afecta a pilas y estribos.

Los enrocados de protección de riberas se diseñan en función de la velocidad del escurrimiento calculada con la crecida de diseño, ajustándose a una granulometría que asegure su estabilidad. Los gaviones es otro sistema de protección que son elementos celulares constituidos por malla de alambre galvanizado rellenos con piedras. Son relativamente flexibles por lo que pueden cambiar de forma o sufrir asentamientos importantes sin experimentar daños, por lo que son útiles para proteger los estivos, cepas y taludes en terraplenes de acceso.

5.2 **Procesos de creación de programa de inspección de puentes**

Las inspecciones de estructuras se deben principalmente a inspecciones técnicas de rutina, cambio de uso de la estructura o modificaciones en esta (ampliaciones), patologías presentes por uso, exposición a catástrofes u otros o fallas en el control de calidad y ejecución de estas estructuras en su proceso de construcción.

Tomando en consideración lo descrito por *Muñoz, 2011*. Los alcances de la inspección son los siguientes:

- Predicción de las necesidades de mantenimiento y de los fondos requeridos.
- Establecer prioridades de rehabilitación.
- Identificar las restricciones o limitaciones de servicio.
- Búsqueda de la mejor alternativa de rehabilitación.

- Cuantificar los costos de inversión.
- Determinación de la capacidad de carga de los puentes.

En la Figura 5.2 se muestran las principales causas que motivan la aplicación de ensayos.

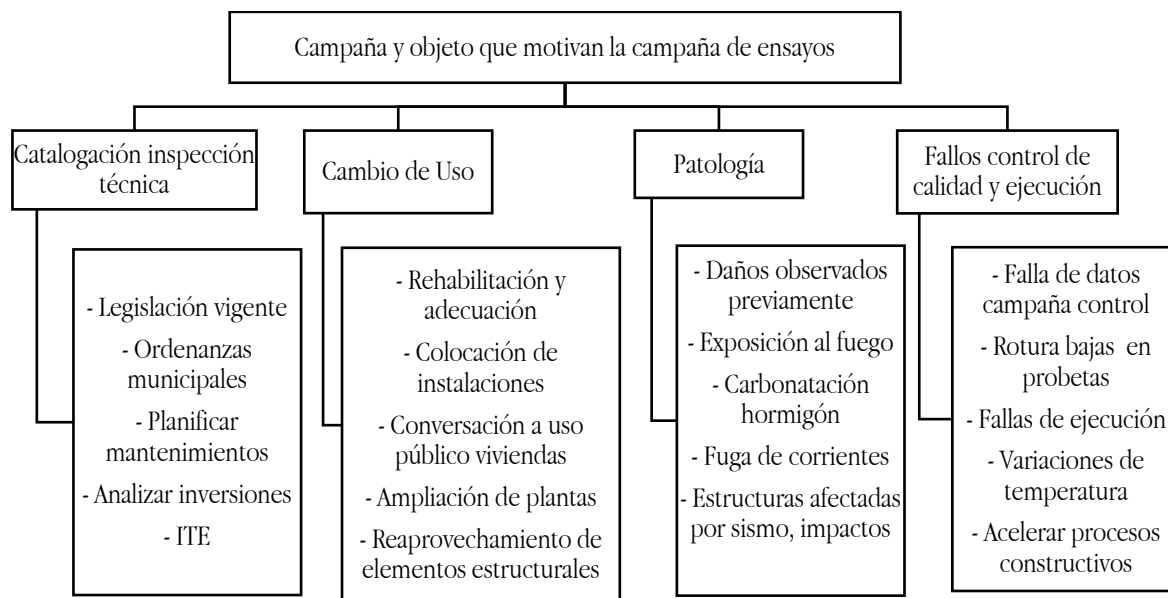


Fig. 5.2 Conocer el alcance de la actuación (Adaptado de Fernández. 2014).

Para la planificación de la inspección se requiere previo conocimiento de cuáles son los parámetros que se desean estimar, cual es la accesibilidad para realizar el ensayo y con qué recursos se cuenta para aplicarlos. En la figura 5.3 se puede ver el esquema del proceso de caracterización de los materiales en donde aparecen los pasos a realizar, para la presente tesis se llegará hasta el segundo proceso, el cual consiste en la planificación y determinación de la campaña de ensayos a aplicar.

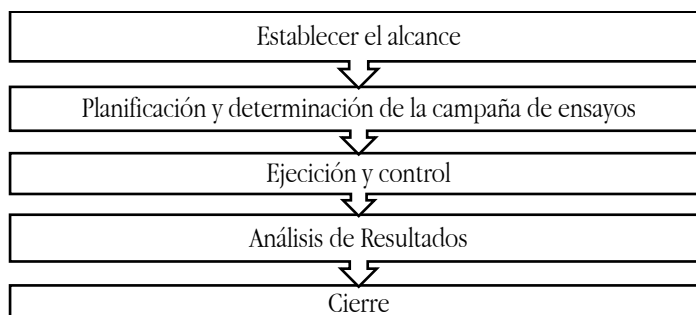


Fig. 5.3 Proceso de caracterización de los materiales mediante ensayos informativos (Adaptado de Fernández. 2014).

Para poder realizar el programa de inspección y que estos puedan dar información para lograr los alcances se deben definir los pasos a realizar, los cuales están dispuestos en la figura 5.4 para una inspección de cualquier estructura en general.

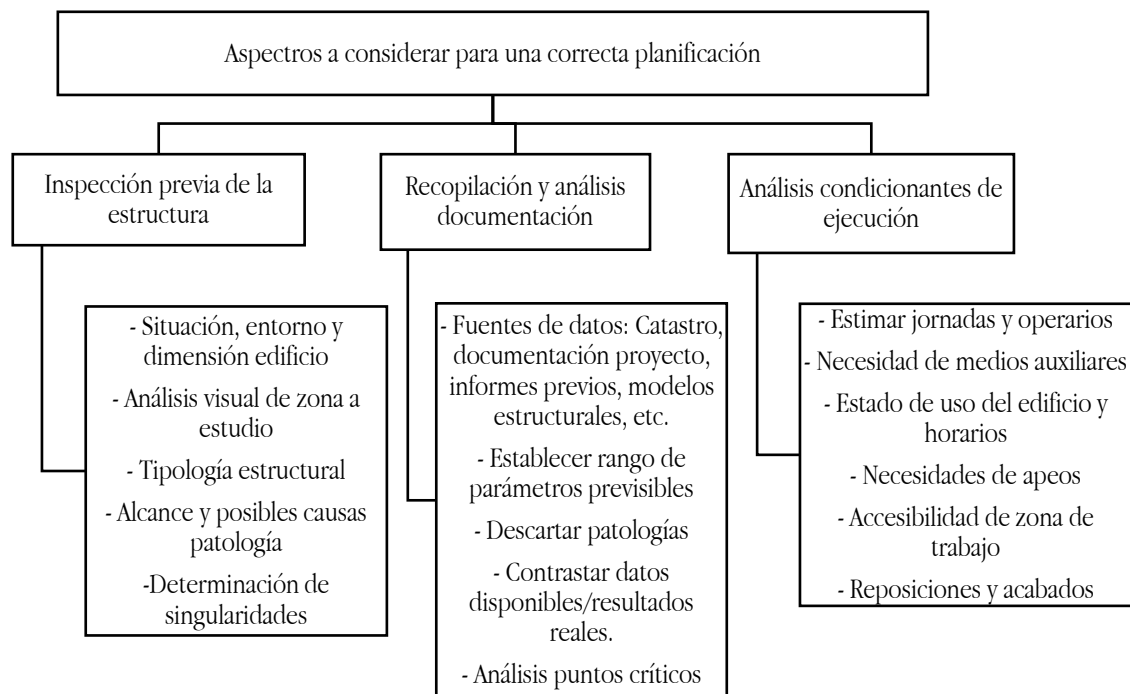


Fig. 5.4 Planificación y determinación de la campaña de ensayos (Adaptado de Fernández. 2014).

Según Muñoz, 2011. Para poder llevar a cabo una inspección en un puente se deben acotar los pasos a los siguientes puntos:

1. **Inventario:** Contiene información seleccionada sobre la localización, administración, geometría, tipologías de la infraestructura y superestructura, capacidad de carga, entre otros.
2. **Inspección Principal:** Consiste en una inspección visual de cada uno de los componentes principales del puente (Superficie, barandas, bordillos, andenes, vigas, losa, pilas, estribos, apoyos, armaduras). Se puede dar una calificación previa en cuanto a daños.
3. **Inspección especial:** Consiste en auscultaciones profundas de la estructura que incluyen ensayos destructivos y No-Destructivos especiales in situ.
4. **Capacidad de carga:** pretende identificar los puentes débiles y servir de herramienta para los permisos de cargas especiales.

El programa de Ensayos No-Destructivos forma parte de la Inspección Especial y sus alcances son los siguientes:

- Topográfico: se debe realizar un levantamiento del sitio, alineamiento de los márgenes del cauce aguas arriba y aguas abajo con los niveles de aguas observados, además de batimetrías.
- Hidrológico, hidráulico y socavación: Se debe recopilar información. El **Estudio Hidrológico** determina el caudal de diseño y datos sobre la cuenca hidrográfica. Los **Estudios Hidráulicos** incluyen la determinación de las líneas de corrientes, determinación de sedimentos, alineamiento de pilas dentro del cauce y las recomendaciones para obras de protección del cauce. El **Estudio geológico o geomorfológico** incluye información para la evaluación de la estabilidad del cauce. También se deben hacer cálculos de la **socavación** mediante análisis local y global.
- Suelos y geotécnicos: Reconocimiento de campo y exploraciones, realización de sondeos, capacidad portante, estados de las cimentaciones y refuerzos.
- Estudio estructural: **Patologías de Materiales** mediante Ensayos No-Destructivos se debe evaluar las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los componentes principales de la superestructura e infraestructura. Los componentes estructurales son: Losas, vigas, pilas, estribos, apoyos, aletas, elementos de arco, cables y pendolones, elementos de armadura. Los componentes funcionales son: Superficie de puente, juntas de dilatación, andenes y bordillos, barandas, taludes, entre otros. También se hace necesario un estudio **sismoresistente** del puente en general y de sus componentes principales, incluyendo estudios de suelos y las profundidades de socavación.

La siguiente figura expone algunas recomendaciones de Fernández (2014) para evaluar características estructurales en cualquier estructura mediante técnicas de Ensayos No-Destructivos que serán utilizadas para la creación del programa de inspección del Puente Calle-Calle I.

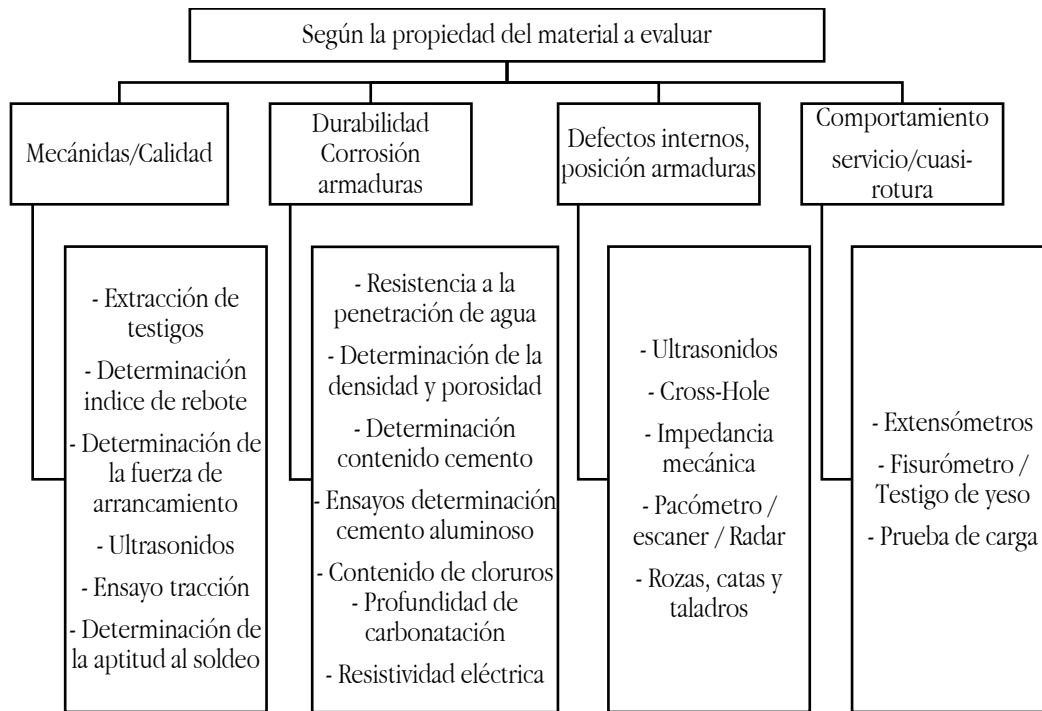


Fig. 5.5 Determinación de los ensayos informativos (Adaptado de Fernández. 2014).

- Diseño de obras de rehabilitación: Luego de obtener los resultados de los ensayos se deben analizar y diseñar las reparaciones que incluyan: mantenimiento, refuerzo y rehabilitación. Esta evaluación debe incluir un análisis de costo-beneficio, especificaciones de construcción y presupuesto.

5.3 Puente Calle-Calle I

5.3.1 Antecedentes del Puente Calle-Calle I

Los datos conocidos del Puente Calle-Calle I de Valdivia han sido obtenidos de *González, T. 2013* y de visitas en terreno al puente.

El Puente Calle-Calle I se ubica en la ruta rol 202 (Valdivia) sobre el cauce del río Calle-Calle. Fue construido el año 1944 para uso carretero, teniendo actualmente uso urbano. Está fabricado con hormigón armado. Posee una longitud total de 223,2 m, un ancho total de 9 m, ancho de calzada de 6,1 m y un gálibo variable de aproximadamente 34 m y una revancha variable de 12 m medido hasta la cota de altura de río.



Fig. 5.6 A la izquierda, vista satelital de la ciudad de Valdivia. A la derecha vista satelital ampliada sobre el Puente Calle-Calle I (GoogleMaps. 2017).

La Superestructura del puente es de hormigón armado, de una longitud total de 223,2 m, el tramo central es de 64,8 m, dividiéndose los metros restantes entre los tramos laterales de 49,2m y los accesos en forma de pasos superiores como vigas continuas de 30 m de largo. El puente posee 5 tramos, los vanos centrales salvan el ancho del río en tramos de vigas tipo Gerber de canto variable. El canto varía a lo largo del puente, creciendo desde el centro de la luz hacia los apoyos con una curva parabólica. La calzada de es de 6,1 m y la vereda de 1,4 m.

La Infraestructura está formada por fundaciones tipo cajón de hormigón armado, que se hincaron hasta el terreno de fundación mediante dragado interior. En los extremos, las vigas continuas tipo paso superior, se empalman al terreno mediante terraplenes. El puente posee cuatro cepas, ubicándose dos en el lecho del río.

El 18 de diciembre de 1938 se comienza la construcción del Puente Calle-Calle, diseñado por el ingeniero Federico Wiese Isense. El puente es inaugurado el 11 de febrero del 1945 con un diseño diferente al proyecto, ya

que originalmente éste estaba planteado con cuatro arcos, es por este motivo que se desconoce la geometría, distribución de armaduras y materialidad que posee el puente.

5.3.2 Parámetros desconocidos del Puente Calle-Calle I

Los planos que se encontraban archivados de este puente no coinciden con la estructura que fue construida. El puente no cuenta con acceso a la dovela de las vigas tipo cajón que lo componen, esto dificulta su inspección teniendo que realizar previamente un proyecto para generar un acceso al interior del cajón.

Dentro de los parámetros desconocidos más importantes del Puente Calle-Calle I se encuentran:

- Sección del puente, se asume que es muy similar al Puente Pedro de Valdivia.
- Geometría global y geometría de detalles exteriores e interiores, distribución de armaduras y recubrimientos.
- Sección y geometría de vanos, cepas o pilas y estribos.
- Tipo de armadura pasiva y/o activa en caso de tenerla.
- Existencia de aparatos de apoyos y sus materiales
- Tipos y forma de juntas de dilatación
- Elementos no estructurales: ubicación, geometría (espesores) y pesos de pavimentos, barandas, luminarias, postes para banderas, entre otros.
- Materiales:
 - Hormigón: Grado y estado de conservación (Calidad)
 - Acero: Tipo de acero, diámetros y distribución de armaduras y el estado de conservación, corrosión.
- Fundaciones: su geometría, materialidad y estado de conservación.

5.4 Programa de END Puente Calle-Calle I

5.4.1 Introducción

Se presenta una propuesta relativa a los Ensayos No-Destructivos a realizar, con el fin de establecer el estado actual del Puente Calle-Calle I de Valdivia, que es necesario para definir un completo plan de conservación de la estructura, conocer su geometría y características principales de las cuales no se cuenta con información, con tal de generar posteriormente mantención y reparación de las deficiencias que sean detectadas.

Todos los ensayos y pruebas complementarán los resultados del levantamiento fotográfico general realizado, el cual consistió en un levantamiento de daños superficiales que está disponible en el Anexo B. Al momento de ejecutar el presente programa de END se debe realizar una inspección visual de forma meticulosa.

5.4.2 Conocer la calidad del hormigón endurecido

Es necesario conocer la calidad del hormigón endurecido y sus características principales, además de identificar cuál es su actual estado de conservación. Para ello se pueden realizar distintos ensayos, todos en los siguientes grupos.

Para la superestructura, se realizarán los ensayos en la parte inferior de la losa superior y en la parte superior de la losa inferior, en las almas y diafragma de la viga tipo cajón. En el vano central se realizarán mediciones en tres zonas, un grupo en el centro, y otros dos grupos entre la cepa y la rótula. Para la infraestructura se realizarán tres ensayos por cepa, con el fin de medir y estimar las distintas etapas de hormigonado. En los vanos de aproximación se realizará una prueba a la losa de hormigón y una para las vigas longitudinales y otra para las vigas transversales. Los sectores a ensayar se pueden ver en las siguientes figuras:

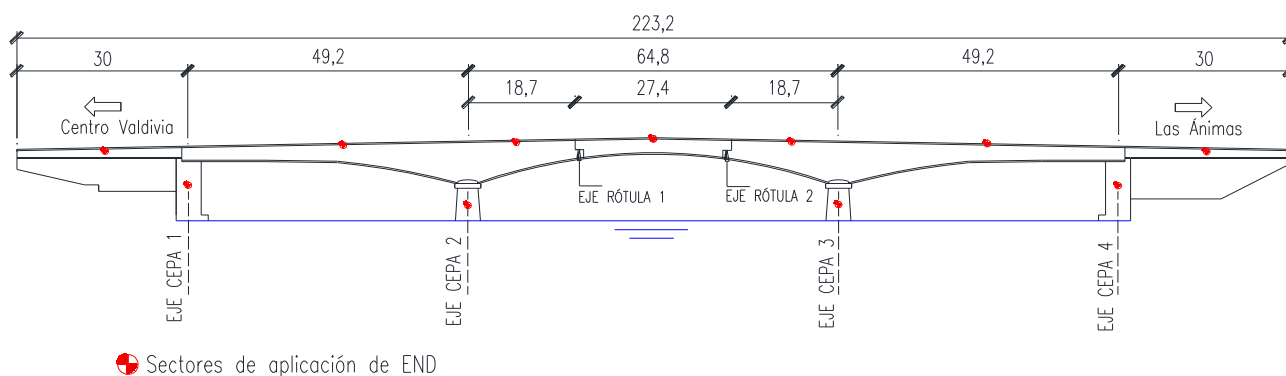


Fig. 5.7 Representación esquemática en elevación eje longitudinal de aplicación de ensayos para Puente Calle-Calle I, Valdivia.

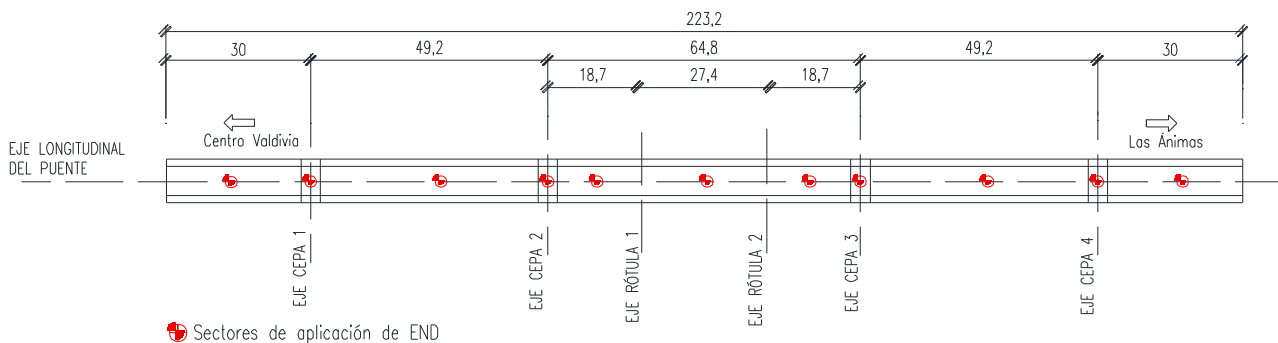


Fig. 5.8 Representación esquemática en planta de aplicación de ensayos para Puente Calle-Calle I, Valdivia.

Los ensayos que permitirán conocer estas características son:

a. Esclerómetro de rebote, Martillo Schmidt o similar.

Son instrumentos usados para medir las propiedades elásticas o la resistencia del hormigón. Se obtiene un valor de índice de rebote de una zona. Las lecturas obtenidas se introducen en una curva facilitada por el fabricante que permite estimar una resistencia a compresión.

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la NCh 1565.Of2009

b. Ultrasonidos

Para complementar las lecturas del esclerómetro en los distintos sectores que se pueden ver en la figura 5.7 y 5.8 se realizará la medición mediante el método del ultrasonido. Este ensayo proporciona información sobre la calidad y grado del hormigón.

Estas mediciones se pueden realizar de forma directa, semi-directa o indirecta según lo permita la geometría del elemento a ensayar, en este puente se estima que se realizarán mediciones indirectas.

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la EN 12504-4:2006, UNE 83-308-86 y ASTM C597 – 16

c. Eco-impacto

Este método se empleará para la medición de espesores de pavimentos, revestimientos de asfalto, losas sobre el suelo y elementos estructurales. También se usará para detectar la presencia y profundidad de vacíos, grietas, aberturas superficiales y nidos.

Se realiza una cuadrícula sobre la superficie y se ejecuta el movimiento del transductor que tiene acceso de un solo lado de la estructura. Este capta la señal de la onda P reflexionándola y registrándola

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la ASTM C1383 – 15. Los puntos a evaluar serán los mismos expuestos en la figura 5.7 y 5.8.

d. Medidor de resistencia eléctrica (Sonda Wenner)

Permite medirla resistividad eléctrica del hormigón. Se debe marcar una cuadrícula en la superficie para no utilizar el equipo sobre las líneas en donde se encuentre la armadura. Por lo que este ensayo se debe realizar después de determinar la ubicación de las armaduras de refuerzo.

Su implementación permitirá estimar: la resistencia del hormigón a agentes agresivos, homogeneidad del hormigón, condiciones de fraguado, comprobación de la distribución de fibras en hormigón reforzado con fibras de acero y estimación de la probabilidad de corrosión, velocidad de corrosión.

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la AASHTO T 358: 2015. Los puntos a evaluar serán los mismos expuestos en la figura 5.7 y 5.8.

e. Higrómetro

Este método permitirá identificar la humedad en el hormigón. En este caso se habla de hormigón endurecido, por lo que previamente se debe acondicionar el hormigón a temperatura/humedad de servicio por lo menos 48 horas. Definir, taladrar y preparar los agujeros de prueba. Cortar el manguito conforme a la profundidad de la prueba e insertarlo. Esperar 72 horas para el equilibrio de humedad para realizar las mediciones insertando la sonda en el manguito previamente instalado.

Los puntos a evaluar serán los mismos expuestos en la figura 5.7 y 5.8.

Todos los ensayos son complementarios y ninguno se sustituye entre sí. Se asignaron estos ensayos por ser accesibles y más económicos.

5.4.3 Determinar agentes agresivos para la armadura

a. Método de Corrosión

Consiste en realizar un cartografiado del potencial eléctrico en la superficie del hormigón, esto permite la detección de los puntos de una mayor probabilidad de corrosión y representa una herramienta primaria para el mantenimiento y para la evaluación estructural.

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la ASTM C876 - 15. Los puntos a evaluar serán los mismos expuestos en la figura 5.7 y 5.8.

b. Carbonatación

Este método se basa en cambios de color producidos en la superficie del hormigón por el agente reactivo fenolftaleína. Se utiliza con el objetivo de estudiar la durabilidad por medio de la profundidad de carbonatación para estimar la vida útil residual de la estructura.

Los puntos a evaluar serán los mismos expuestos en la figura 5.7 y 5.8.

Todos los ensayos son complementarios y ninguno se sustituye entre sí, sin embargo el ensayo de carbonatación es el más utilizado y el que entrega mayor información a un menor costo.

5.4.4 Estado y ubicación de armaduras

Es necesario contar con la información de la cantidad y disposición de la armadura de refuerzo de las vigas, losas y pilares que componen la estructura. Se debe realizar una cuadrícula previa, con el fin de identificar en donde se ubican las barras de acero.

Se estima que el puente posee doble simetría tanto en el plano vertical y longitudinal en el centro del puente, por lo que se realizará un barrido de un cuarto del puente. En la superestructura, se auscultará la armadura en la losa superior, losa inferior y almas, cerca de los apoyos, cerca de la rótula Gerber y en los centros de vanos. Además de una viga longitudinal y transversal que componen el vano de acceso.

Como no existen planos de la estructura, se debe aplicar el ensayo a estribos, cepas laterales, voladizos y travesaños para conocer la información faltante. En los vanos de acceso se aplicará en los siguientes puntos descritos en la figura 5.9 con el fin de aprovechar la simetría ensayando solo una viga longitudinal, una viga transversal, un segmento de la losa y voladizos; mientras que en la viga tipo cajón que compone el tablero se aplicará en un cuarto de esta.

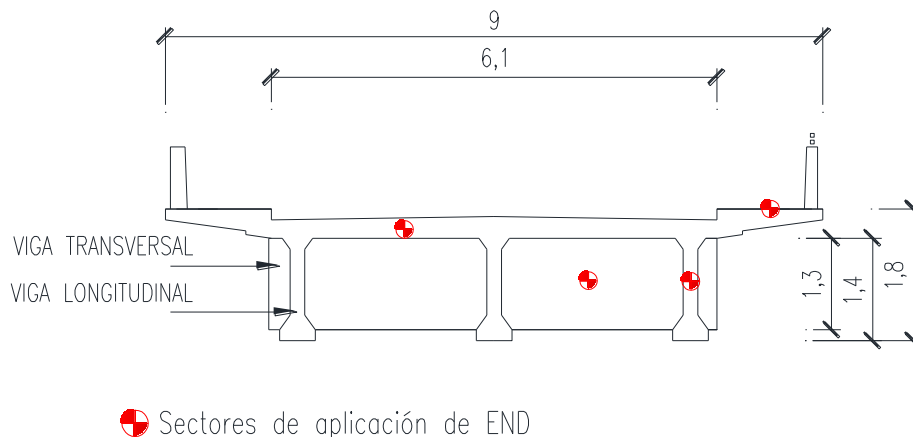


Fig. 5.9 Representación esquemática en corte sección transversal (vano de acceso) de aplicación de ensayos para Puente Calle-Calle I, Valdivia.

a. Georradar

Este ensayo se utiliza para la evaluación de la calidad y uniformidad del hormigón, investigación en estructuras desconocidas, analizar de forma eficaz áreas de gran tamaño encontrando objetos metálicos y no metálicos incrustados, localizar barras de acero o pretensado en varias capas, su tamaño y orientación y mediciones de espesores y recubrimientos. También se utiliza para evaluar el tablero en puentes.

Los impulsos son emitidos a través del hormigón por medio de una antena bipolar. Con estos transductores vamos barriendo el objeto de medición. Como resultado se obtiene un mapa (radar-grama 2d o modelo 3d) que refleja las posibles discontinuidades internas de la estructura en la pantalla del equipo.

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la AASHTO R 37-04 (2013) y ASTM D6087 - 08 (2015) e1.

b. Pacómetro

Este ensayo está diseñado para detectar la distribución de armadura, espesores de recubrimiento, espaciamiento y diámetros aproximados, empleando para ello un procedimiento de prospección electromagnético.

Para realizar el ensayo se debe realizar un barrido de forma horizontal y vertical con finalidad de identificar las armaduras en distintas direcciones y profundidades.

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la BS 1881, Part 204.

c. Microfotografía

Con el fin de identificar el tipo de acero estructural utilizado, se tomarán pequeñas muestras para ser analizadas en laboratorio.

Como primera opción se considera el Georradar ya que es capaz de entregar mayores datos, sin embargo con un pacómetro se pueden obtener de igual forma la distribución y diámetro de las armaduras pero aún quedaría incertidumbre sobre alguno de estos parámetros desconocidos.

5.4.5 Geometría

Se obtendrán todas las dimensiones geométricas actuales del puente, que permitan generar planos de detalle de esta estructura. También se determinará la existencia de irregularidades (desaplomo, flechas, inclinación, asentamientos etc.). Se realizarán las siguientes actividades:

- Medición de deformaciones longitudinales y transversales, pendientes y cotas.
- Medición de asentamientos e inclinación de las cepas.
- Verificación de alturas de fundación, incluyendo la verificación de estados de socavación local.
- Estudios de fisuración de losas y áreas de tráfico.

a. Levantamiento Geométrico, topográfico

Se realizará con el fin de obtener información tanto de la geometría general como de la geometría de detalles una estructura, para posteriormente realizar esquema o dibujo computarizado de esta.

El levantamiento se realizará en forma manual por medio de medidas en terreno con huinchas, puntero laser o pie de metro. También son necesarios levantamientos topográficos en donde se obtiene información de la geometría general.

Las mediciones se realizarán aprovechando la simetría de la estructura.

b. Escaner laser 3d

Se utiliza para el levantamiento geométrico de estructuras y terrenos, escanear a BIM y obtener un registro geométrico preciso de entorno construido.

Es una herramienta útil para el control de deformaciones mediante monitoreo de contramedidas en ensayos de carga.

Permite el escaneo de objetos a grandes distancias y expuestos, permite capturar mediciones rápidas, directas y altamente precisas de objetos y edificios complejos.

c. Fotogrametría

Permite medir y conocer dimensiones en base a fotografías de la estructura con una dimensión de referencia.

La mejor técnica para realizar el levantamiento geométrico general de la estructura es la utilización del escáner laser 3d, sin embargo como alternativa menos costosa se puede realizar un levantamiento geométrico, complementar con topografía. El levantamiento geométrico si se debe realizar para la geometría de detalles y se puede complementar con la realización de fotogrametría y uso de dron en caso de ser necesario.

5.4.6 Comportamiento en servicio

a. Deflectometro de impacto

Este ensayo permite conocer la calidad del pavimento y estimar su vida útil.

El ensayo de deflexión se realiza sobre la superficie de una estructura a auscultar, la cual, es sometida al impacto de una masa en caída libre con diferentes alturas predeterminadas, registrando las deformaciones elásticas, mediante una serie de sensores.

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la ASTM D4694 - 09(2015)

b. Termografía Pasiva

Este ensayo se aplica para detectar las delaminaciones en la cubierta del puente. Se utilizan cámaras Termográficas para detectar la energía radiante emitida por los objetos determinando su temperatura de la superficie a distancia, en tiempo real y sin contacto.

Se aplicará este ensayo preferentemente en un día soleado, ya que las delaminaciones actúan como una barrera térmica, por lo que cuando el sol calienta la cubierta, estas áreas aparecen como "puntos calientes" en los datos de infrarrojos.

c. Prueba de carga

La prueba de carga de una estructura es un conjunto de operaciones consistente en la reproducción de uno o varios estados de carga sobre la misma, con objeto de confirmar que el proyecto y construcción de la obra se han llevado a cabo de forma satisfactoria.

Para esto se debe cerrar el tránsito del puente en dirección a las ánimas. El puente se debe cargar y medir las deformaciones y deflexiones con sensores de desplazamientos, extensómetros y acelerómetros.

d. Fisurómetros

Complementa la inspección visual, da una mejor definición en las zonas problemáticas detectadas en la inspección visual previa.

Se utilizan para medir el espesor y profundidad de grietas, también se pueden dejar fijos para ver la evolución de las grietas durante la implementación de las pruebas de carga.

Todos estos ensayos son complementarios entre sí permitiendo determinar los parámetros desconocidos en servicio del puente.

5.4.7 Geológicos y de suelos

Con el objeto de verificar la capacidad portante de la estructura se realizarán ensayos de prospección de suelos en ambas riveras del puente, que permitan establecer una clasificación de estratos adecuada del lugar de fundación del puente. Serán considerados todos los estudios de suelos realizados en estructuras cercanas al Puente Calle-Calle I.

Los ensayos mencionados a continuación se hacen con la utilidad de detectar propiedades de las fundaciones del puente, por lo que se realizarán en las cepas indicadas en la figura 5.10.

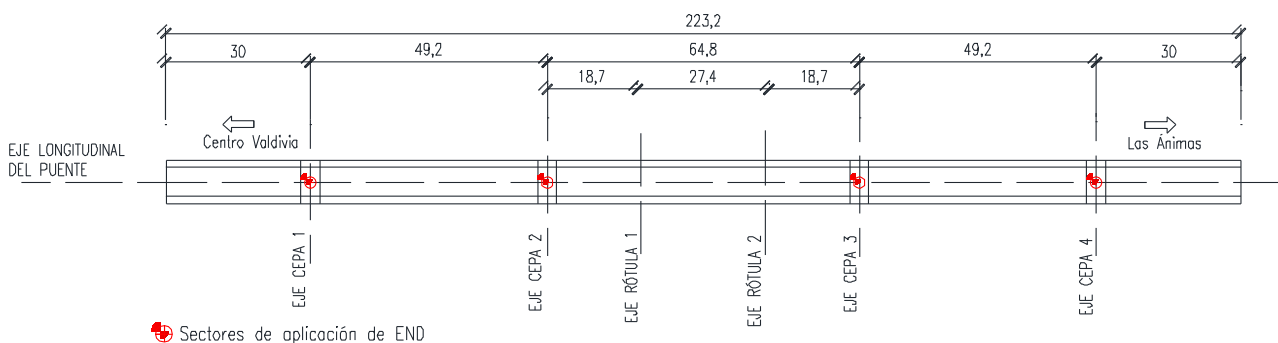


Fig. 5.10 Representación esquemática de aplicación de ensayos de fundaciones en planta para Puente Calle-Calle I, Valdivia.

a. Sasw (Análisis espectral de ondas superficiales)

Este ensayo se utiliza en aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil para estimar las propiedades de los materiales en estructuras estratificadas basadas en las características de dispersión de las ondas de Rayleigh (ondas superficiales).

b. Sísmico paralelo

Se utilizar para estimar la profundidad de los pilotes

Para este ensayo se requiere instalar un tubo plástico paralelo a las pilas, con una longitud mayor en 8-10m a la longitud estimada de la pila.

Para realizar este ensayo se tomará en consideración lo descrito en la NF P94-160-3

Ambos ensayos pueden ser complementarios, pero el sísmico paralelo requiere de mayor preparación para su utilización.

Subacuático

c. Inspección visual con buzo

Se requiere de un buzo para realizar la inspección. Consiste en la toma de fotografías subacuáticas, también el buzo puede utilizar una cámara de circuito cerrado de televisión para que en la superficie el experto vea como se encuentran las estructuras que están bajo el agua.

d. Eco sonda

Esta sonda se utilizará para medir socavación en las fundaciones de las pilas del puente.

Es un instrumento que se utiliza para saber profundidades. Es un tipo de sonar activo que se puede instalar en las cepas del puente.

Se utilizará una combinación entre el ecosonda y la inspección visual por medio de un buzo.

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Los Ensayos No-Destructivos presentan ventajas sobre los Ensayos Destructivos, ya que se pueden aplicar sin generar daños significativos a la estructura, además de permitir explorar e identificar defectos internos dentro de los elementos, sin embargo, al ser métodos en constante desarrollo aún existe incertidumbre sobre su potencial.

La aplicación de END en el área de la Ingeniería Civil es una herramienta útil para detectar daños y analizar la situación actual de las estructuras existentes sin destruirlas, como es el caso de obras patrimoniales, mientras que su utilización en obras nuevas se aplica para controlar la construcción y poder estimar en obra la futura calidad de la estructura.

Para acceder a la información con respecto a los END se realizó un amplio estudio del Estado del Arte de la bibliografía disponible, sin embargo, para los ensayos más nuevos no existe tanta información con respecto a la aplicación de estos métodos en el área de la Ingeniería Civil.

La clasificación de los END evidenció que los métodos más explorados son los métodos acústicos y métodos de carga, mientras que los métodos láser, químicos y radiológicos no cuentan con muchos ensayos. El material con aplicación de mayores END es el hormigón; sin embargo todos los métodos de clasificación y materiales a ensayar están en constante desarrollo e innovación tecnológica de acuerdo a las nuevas necesidades y requerimientos del mercado.

La falta de normativa chilena con respecto a estos ensayos demuestra que para la mayoría de estos métodos el campo de aplicación aún no se ha desarrollado por completo o no ha habido una real necesidad de actualizar los métodos de inspección. El único ensayo que cuenta con normativa actualizada es el del esclerómetro de rebote, mientras que la escasa normativa existente sobre algunos ensayos de dureza no se encuentran actualizados.

Dentro del ámbito nacional estos ensayos no se consideran de forma adecuada en ninguna guía de inspección estructural, siendo escasamente mencionados en el Manual de Carretas.

El Puente Calle-Calle I es uno de los puentes más antiguos, importantes y significativos de la ciudad de Valdivia, sin embargo, no existen registros sobre sus parámetros básicos, ni de sus planos de estructura e infraestructura. Existe falta de inspección y mantención, lo que se pudo evidenciar en la visita a terreno para realizar el levantamiento fotográfico (disponible en el Anexo B) en donde se visualizaron grietas, fisuras y desprendimiento de hormigón de recubrimiento, además de no existir un acceso al interior de la viga tipo cajón que conforma el tablero de este puente.

Es importante considerar para la creación de un programa de Ensayos No-Destructivos las distintas limitaciones con las que se cuenta, entre ellas pueden estar: no tener antecedentes previos, una gran cantidad de parámetros desconocidos, limitantes económicas y de accesos a los ensayos.

La propuesta de END para el Puente Calle-Calle I presenta una combinación de END, ya que entre ellos se pueden complementar para obtener buenos resultados asimilables a métodos más modernos, sin embargo los ensayos no se pueden sustituir entre ellos ya que aportan información sobre distintos aspectos a evaluar.

Existe la necesidad de contar con métodos más precisos y rentables que permitan su aplicación en cualquier ambiente adverso, se espera que un futuro esto se consiga ya que aún varios de estos métodos de END se encuentran en desarrollo.

Como posibles líneas de investigación se sugiere continuar actualizando el catálogo de END incluyendo nuevos ensayos según el avance de las innovaciones y nuevas clasificaciones si fuese necesario. Como mejora se sugiere incorporar un marco teórico para cada uno de los END indicando las fórmulas con las cuales se obtienen los resultados y los pasos para interpretarlos.

En el ámbito normativo se espera que en los próximos años Chile considere homologar la normativa ASTM para la aplicación de estos ensayos bajo las condiciones específicas del país, con el fin de validar su aplicación en las distintas áreas de la ingeniería.

Con respecto al manual de carreteras se recomienda revisar el *“Indiana Bridge Inspection Manual”* guía del estado de Indiana en Estados Unidos y la *“Guidelines on Non-Destructive Testing of Bridges BS - 103”* guía de la India, con el fin de citarlas u homologar la información de acuerdo a las necesidades de la inspección en Chile para que los profesionales tengan una visión más clara de cómo se puede mejorar las estrategias de inspección de Puentes y estructuras en nuestro país.

En Chile durante diciembre del año 2016 se ha conformado la asociación chilena de ensayos No-Destructivos, centrándose en la aplicación de estos ensayos en la industria petrolera para controlar procesos productivos y sus estructuras. Esta asociación se encuentra abierta a expandir las áreas que abarca, dejando una posibilidad real a colaborar y trabajar con toda empresa e institución que permita la expansión de los END en Chile, tanto en difusión, innovación e investigación.

REFERENCIAS

ACI 207.3R-94 Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions.

ACI 318S-14 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural.

ARKOSCAN. 2011. A.C.F.M. Alternating Current Field Measurement (Disponible en: http://www.akroscan.com/DOWNLOAD_files/AKROSCAN%20ACFM%20COMP.pdf. Consultado el: 08 de noviembre de 2017)

ASTM C1150-96, (1996) Standard Test Method for the Break-Off Number of Concrete (Withdrawn 2002), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996.

ASTM C 1202 - 12. (2012) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM C1583 / C1583M-13, Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method) ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

AYSWARYA, K.; A. JOHNSON; CHAITHANYA; D. PRASAD; D. KRISHNAN; R. NAIR. 2016. Evaluation of Bridge Performance Using Non-Destructive Testing - A Review. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. 2016.(5): 5-18.

BASTERRA, L.; L. ACUÑA; M. CASADO; G. RAMÓN-CUETO; G. LOPEZ. 2009. Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid). Informes de la Construcción. 2009. (61):21-36.

BS – 103. 2009. Directorate research designs and standards organization. (INDIA) Guidelines on non-destructive testing of bridges.

BUCKLEYS 2014. DATA SHEET H1 BUCKLEYS BATHYCORROMETER® (Disponible en: <http://www.ashtead-technology.com/datasheets/H1-Buckleys-BathyCorrometer.pdf>. Consultado el: 17 de octubre de 2017)

BUNGE, J.; D. MAGALLANES. 2011. Ensayos no destructivos. (Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/6716/Presentacion%20NDT.pdf>. Consultado el: 14 de noviembre de 2017)

BURNE, J.; D. MAGALLANES. 2011. Clases. Ensayos industriales. Facultad de Ingeniería-UBA.

- BOYD, A.; B. BIRGISSON; C. FERRANO; S. CUMMING. 2005 Nondestructive Testing for Advanced Monitoring and Evaluation of Damage in Concrete Materials. Final Report.
- CIVILGEEK. 2011. Prueba de cargas de estructuras (Disponible en: <https://civilgeeks.com/2011/12/10/prueba-de-cargas-de-estructuras/>. Consultado el: 22 de octubre de 2017).
- CLARK, M. 2003. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. Elsevier, NDT&E International. (36): 265-275 (Original no consultado, citado por: MONTEAGUDO, S. 2010. Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos. Tesis Master Oficial de estructuras, cimentaciones y materiales. Madrid, Univ. Politécnica de Madrid, Esc. Técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos.).
- CONTROLSGROUP. 2015. Equipos de Ensayo para la industria de la Construcción. Catálogo General 2015. 8va Edición. (Disponible en: <http://www.controls-group.com/catalogue-online/es/index.html>. Consultado el: 06 de noviembre de 2017).
- DÁMAZO, J. 2006. Pruebas no destructivas del concreto las estructuras no son eternas. Construcción y Tecnología. 2006. (101):48-54
- DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS. S.f. (Disponible en: <http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/introduccion-al-medidor-de-distancia-a-laser>. Consultado el: 09 de noviembre de 2017)
- ECHEVERRY. 2017 (Disponible en: <http://blog.360gradosenconcreto.com/explandict/pistola-de-windsor/> / .Consultado el: 27 de septiembre de 2017)
- ECHEVERRY. 2013 (Disponible en: <http://blog.360gradosenconcreto.com/ensayos-no-destructivos-para-la-rehabilitacion-de-una-edificacion/> Consultado el: 14 de noviembre de 2017)
- END-CHILE. S.f. (Disponible en: <http://www.endchile.cl/>. Consultado el 05 de octubre de 2017)
- FARO. 2013. Faro laser Scanner Focus 3D. Características, beneficios y especificaciones técnicas.
- FERNÁNDEZ, C.; E. TÉLLEZ. 2000. Los ensayos de integridad estructural de pilotes, situación actual en España y perspectivas. Comunicación presentada en el Simposio de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica sobre geotecnia de las infraestructuras del transporte. Barcelona del 27 al 29 de septiembre de 2000.
- FERNÁNDEZ, J. 2014. Jornadas Técnicas, Ensayos y pruebas para la caracterización del hormigón y el acero (Disponible en: www.seg-sa.es/)

- FIGUEROA, A. 2009. Auscultación del monolitismo de pavimentos multicapas mediante deflectómetro de impacto. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Univ. de Chile, Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, Dpto. de Ingeniería Civil.
- FOPPOLI MORETTA E ASSOCIATI. S.f. (Disponible en: <http://www.foppolimoretta.it/en/gallery/alb/bridges-12/ganda-bridge-in-morbegno-so--seismic-hazard-analysis-59/>. Consultado el: 07 de noviembre de 2017)
- GALVE, C.; B. SANZ. 2011. Caracterización del pino radiata mediante el análisis de la respuesta dieléctrica de la técnica no destructiva del georradar y del resistógrafo. (Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13752/CARACTERIZACION%20DEL%20PINO%20RADIATA%20MEDIANTE%20EL%20ANALISIS%20DE%20LA%20RESPUESTA%20DIELECTRICA%20DE%20LA%20TECNICA%20NO%20DESTRUCTIVA%20DEL%20GEORRADAR%20Y%20DEL%20RESITOGRAFO.pdf>)
- GARCÍA, A. 2007. Fundamentos a los Ensayos No Destructivos. Instituto Mexicano de Ensayos No Destructivos, A.C.
- GAVILÁN Y ASOCIADOS. S.f. (Disponible en: <http://gavilan.com.py/>. Consultado el: 06 de noviembre de 2017)
- GEOFISICA CONSULTORES. S.f. Sísmica Paralela (Disponible en: <http://www.geofisica-consultores.es/es/sismica.html>. Consultado el: 14 de noviembre de 2017)
- GEOTECNIA CONSULTORES. S.f. (Disponible en: <http://www.geotecniaconsultores.com/diagnostico-y-patologias-edificacion/>. Consultado el 06 de noviembre de 2017)
- GERMANN INSTRUMENTS. 2015. Chloride penetration in concrete, short overview and available instruments (Disponible en: <http://www.germann.org/TestSystems/PROOVEit/Chloride%20Penetration%20Overview.pdf>. Consultado el: 16 de octubre de 2017)
- GERMANN INSTRUMENTS. 2014. NDT Systems, Bridging NDT theory and Practice. Catalog NDT 2014
- GONZÁLEZ, N. 2013. Comparación de técnicas no destructivas en la inspección del hormigón armado: georradar versus tomografía ultrasónica. Tesis Máster en Edificación. Univ. Politécnica de Valencia, Esc. Técnica superior de Ingeniería de Edificación.
- GONZÁLEZ, T. 2013. Identificación del patrimonio de Ingeniería en Puentes en la Región de los Ríos con un ejemplo de evaluación de la posibilidad de conservación. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Valdivia, Univ. Austral de Chile, Fac. de Ciencias de la Ingeniería, Esc. De Ingeniería Civil en Obras Civiles.

- GOOGLE MAPS. 2017. (Disponible en: <https://www.google.cl/maps/@-39.8188286,-73.2301566,491m/data=!3m1!1e3?hl=es&authuser=0>. Consultado el: 27 de noviembre de 2017)
- GROSSE, C. 2012. Non-destructive testing and continuous monitoring: Modern tools for performance assessment and life time prognosis of structures. En: Alexander, H.; D. Beushausen; F. Dehn; P. Moyo, eds. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III. 2012 Taylor & Francis Group. eBook ISBN: 978-0-415-89952-9. P: 42-49.
- GRUPOAVALA. 2017. Inspección de pilares de puentes con sónar 3D (Disponible en: <http://www.grupoalava.com/ingenieros/actualidad/inspeccion-de-pilares-de-puentes-con-sonar-3d/>. Consultado el: 15 de noviembre de 2017)
- HOLA, J.; J. BIENÍ; Ł. SADOWSKI; K. SCHABOWICZ. 2015. Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability. Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences. 2015 (63): 87-96.
- HUSSAIN, Z. 2013, Julio 19. Mungo MHDA Pull out test (Archivo de video, disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=LBe4okYOvyA>)
- INDIANA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, INDOT. 2013. Indiana Bridge Inspection Manual. Part 6. NDT and PDT testing.
- ISO1920-7:2004 Testing of concrete -- Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete.
- KASHIF, S.; Z. IBRAHIM; S. MEMON; M. JAMEEL. 2016. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. Constructicon and Building Materials. 2016 (107): 58-86.
- LEE, S.; N. KALOS, D. SHIN. 2014. Non-destructive testing methods in the U.S. for bridge inspection and maintenance. KSCE Journal of Civil Engineering. 2014. (18): 1322-1331.
- LOMBILLO, I. 2010. Investigación teórico- experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido. Tesis Dr. Santander, Univ. De Cantabria, Depto. de Ing. Estructural y mecánica.
- MINISTERIO OBRAS PÚBLICAS; MOP, 2017. Manual de Carreteras. Volumen N°3. Instrucciones y Criterios de Diseño. Parte III. Capítulo 3.1000 Puentes y Estructuras Afines.
- MINISTERIO OBRAS PÚBLICAS; MOP, 2017. Manual de Carreteras. Volumen N°7. Mantenimiento Vial. Parte VII. Capítulo 7.201.4 Puentes y Estructuras.

- MARÍN, R. 2013. Estudio sobre técnicas de ensayo no destructivas (NDT) y semi-destructivas (SDT) con el objetivo de determinar algunas de las propiedades mecánicas de la madera, Volumen I. Trabajo final de grado. Grado en ciencias y tecnologías de la edificación. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Politécnica superior de edificación de Barcelona.
- MONTEAGUDO, S. 2010. Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos. Tesis Master Oficial de estructuras, cimentaciones y materiales. Madrid, Univ. Politécnica de Madrid, Esc. Técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- MUÑOZ, E. 2011. Ingeniería de puentes: Tomo I: Reseña histórica, tipología, diagnóstico y recuperación. Tomo II: Colapso, inspección especial, socavación, vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga, Volumen 1. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. Pag: 3-22
- NAIK, T. 2003. The Break-Off Test Method. En: Malhotra, V.; N. Carino, eds. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition. 2004 Taylor & Francis Group. eBook ISBN: 978-1-4200-4005-0. P: 4-1 – 4-16.
- NCh 1565.Of2009 Hormigón - Determinación del índice esclerométrico.
- OLSON. 2012. Spectral analysis of surface waves test sasw-s/sasw-g nde-360 (Disponible en: <http://www.pcte.com.au/images/pdf/spectral-analysis-of-surface-waves/NDE-360-SASW-S-and-SASW-G-Manual.pdf>. Consultado el 05 de noviembre de 2017)
- PALAIA, L. 2014. Empleo del penetrómetro para madera para el diagnóstico de la madera en servicio en edificios antiguos. Informes de la Construcción, 66(533)
- PASSOLA, G. 2013. Test de tracción para determinar la necesidad de anclaje en árboles (Disponible en: <http://www.doctorarbol.com/es/metodologia-y-aplicacion-del-test-de-traccion-para-determinar-la-necesidad-de-anclaje/>. Consultado el: 19 de octubre de 2017)
- PI.T.K. 2010. Dossier de termografía. (Disponible en: <http://pitkgroup.com/termografia/>. Consultado el: 22 de octubre de 2017)
- PILETEST. 2013. Sistema para ensayos de pilotes. Catálogo de productos. (Disponible en: http://fernandeztadeo.com/Adobe/Piletest%20-catalogo%20de%20Productos_2013_Espanol.pdf. Consultado el: 14 de noviembre de 2017)
- PILODYN. S.f. (Disponible en: <http://www.dagasl.es/PILODYN.pdf>. Consultado el: 07 de noviembre de 2017)

- PORCO, G.; G.VALER; D. ROMANO.2013. Las técnicas de ensayos no destructivos para el control de materiales y estructuras de ingeniería civil. IX Congreso Regional de ENDE y Jornadas de Soldaduras. Mar del plata- Octubre 2013.
- PROCEQ S.A. 2012. Hygropin. Manual de operario, higrómetro.
- PROCEQ.S.A. 2015. Resispod family. Manual de operación. Ensayos de durabilidad de hormigón.
- PROCEQ S.A. 2017 (I). Instrumentos portátiles de ensayos no destructivos de hormigón. Catálogo en español Proceq.
- PROCEQ S.A. 2017 (II). Profometer. Manual de operación.
- PROCEQ S.A. 2017 (III). Proceq GPR Live – Portable ground penetrating radar solution (Disponible en: <https://www.proceq.com/es/producto/proceq-gpr-live/>. Consultado el: 18 de octubre de 2017)
- PROCEQ S.A. 2017 (IV). Instrumentos portátiles de ensayos no destructivos de metal.
- QASRAWI, H. 2000. Concrete Strength by Combined Nondestructive Methods - Simply and Reliably Predicted. Cement and Concrete Research. (5), 739-746. Original no consultado, citado por: BOYD, A.; B. BIRGISSON; C. FERRANO; S. CUMMING. 2005 Nondestructive Testing for Advanced Monitoring and Evaluation of Damage in Concrete Materials. Final Report.)
- ROAD SURVEY DEVICES. S.f. (Disponible en: <https://www.roadsurveydevice.com/equipos-ver-en-espa%C3%B1ol/deflect%C3%B3metro-hwd/>. Consultado el: 09 de noviembre de 2017)
- RODRIGUEZ, I. 2009. Evaluación de la técnica no destructiva del Georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera. Tesis Dr. Valencia, Univ. Politécnica de Valencia, Dpto. de Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría.
- ROJAS, M. 2012. El Xilohigrometro: Un Guardián para la Industria Maderera. El Mueble y La Madera. (62): 101-105
- ROPAX. S.f. (Disponible en: <http://www.ropax.co.uk/eddy-current-inspection.html>. Consultado el: 06 de noviembre de 2017)
- SANJUÁN, C. 2012. Impedancia mecánica en comprobación de integridad en pilotes. (Disponible en: <https://www.patologiasconstruccion.net/2012/07/impedancia-mecanica-en-comprobacion-de-integridad-en-pilotes/>. Consultado el 08 de noviembre de 2017)

- SCANCEMATERIALS. 2005. The Concrete Maturity Method. (Disponible en: <http://www.scancemmaterials.com/cms.html>. Consultado el: 24 de octubre de 2017)
- SERIE NORMATIVAS. 1999. Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción de puentes de carreteras / Dirección general de Carreteras. Madrid. Ministerio de Fomento. Centro de publicaciones. 1999
- SIDOROVA, A. 2010. Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón. Tesis de Master Ingeniería Estructural y de la Construcción. Barcelona. Univ. Politécnica de Cataluña., Esc. Técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona
- STOPRUST 2015. POLATRAK® CP GUN™ bathycorrometer-style corrosion-testing probe for diverS (Disponible en: <https://stoprust.com/media/3455/cp-gun-overview-a4.pdf>. Consultado el 16 de octubre de 2017)
- TOPOEQUIPOS. S.f. ¿Qué es fotogrametría? (Disponible en: <http://www.topoequipos.com/dem/que-es/terminologia/que-es-fotogrametria>. Consultado el: 08 de noviembre de 2017)
- TORRENT, R. 1998. Un método rápido y no-destructivo para medir la permeabilidad al aire del hormigón. Materiales de construcción. 1999. (49):51-56
- TORRENT, R.; L. EBENSPERGER. 2010. Medición “in situ” de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo. Revista Ingeniería de Construcción 2010. (25):371-382
- VALLUZZI, M. 2002. Structural investigations and analyses for the conservation of the Arsenale of Venice. Elsevier. Jousnal of Cultural Heritage (3): 65-71. (Original no consultado, citado por: MONTEAGUDO, S. 2010. Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos. Tesis Master Oficial de estructuras, cimentaciones y materiales. Madrid, Univ. Politécnica de Madrid, Esc. Técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos.)
- WIKIPEDIA. 2017. Echo sounding (Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Echo_sounding. Consultado el: 15 de noviembre de 2017)
- WIKIPEDIA. 2013. Fotogrametría. (Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Fotogrametr%C3%ADa>. Consultado el: 09 de noviembre de 2017)

ANEXOS

A. Listado de normativa y guías

Código	Título
AASHTO R 37-04 (2013)	Standard Practice for Application of Ground Penetrating Radar (GPR) to Highways.
AASHTO T 277 (2015)	Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
AASHTO T 358 (2015)	Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
ACI 201.1R-08	Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service.
ACI 207.3R-94	Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions.
ACI 228.2R-98	Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.
ACI 234R-96	Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", Reported by ACI Committee 234.
ACI 306R-16	Cold Weather Concreting.
ACI 318-14	Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
ASTM 1383 - 15	Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method.
ASTM A956 /A956M -17	Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products.
ASTM A1038 - 13e1	Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method.
ASTM C597 - 16	Standard test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
ASTM C803/ C803M-17	Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete.
ASTM C805 / C805M-13a	Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.
ASTM C856 - 17	Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete.
ASTM C876 - 15	Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
ASTM C900 - 15	Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete.
ASTM C1074-11	Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.
ASTM C1150-96	Standard Test Method for the Break-Off Number of Concrete (Withdrawn 2002).
ASTM C1202 - 17	Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

Código	Título
ASTM C1583 / C1583M - 13	Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method).
ASTM C1760 - 12	Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. ASTM International.
ASTM D2240 - 15	Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.
ASTM D4541 - 17	Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.
ASTM D4694 - 09(2015)	Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device.
ASTM D4695 - 03(2015)	Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements.
ASTM D4729 - 08	Standard Test Method for In Situ Stress and Modulus of Deformation Using Flatjack Method (Withdrawn 2017).
ASTM D4748 - 10(2015)	Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar.
ASTM D4788 - 03(2013)	Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography.
ASTM D4945 - 12	Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations.
ASTM D5873 - 14	Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method.
ASTM D5882 - 16	Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations.
ASTM D6087 - 08(2015)	Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar - See all versions.
ASTM D6432 - 11	Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation.
ASTM D6760 - 16	Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing.
ASTM D7234 - 12	Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers.

Código	Título
ASTM D7522/ D7522M - 15	Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete Substrate.
ASTM E10 - 17	Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.
ASTM E94/ E94M - 17	Standard Guide for Radiographic Examination Using Industrial Radiographic Film.
ASTM E165 / E165M - 12	Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry.
ASTM E569/ E569M - 13	Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation.
ASTM E749/ E749M - 17	Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Continuous Welding.
ASTM E837-13a	Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.
ASTM E1000 - 16	Standard Guide for Radioscopy.
ASTM E1742 / E1742M - 12	Standard Practice for Radiographic Examination.
ASTM E2261 / E2261M - 17	Standard Practice for Examination of Welds Using the Alternating Current Field Measurement Technique.
ASTM E2374 - 16	Standard Guide for Acoustic Emission System Performance Verification.
ASTM E2583 - 07(2015)	Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD).
ASTM E2928/ E2928M - 17	Standard Practice for Examination of Drillstring Threads Using the Alternating Current Field Measurement Technique.
ASTM E2934 - 14	Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for Eddy Current (EC) Test Methods.
ASTM F2170 -17	Standard Test Method for Determining Relative Humidity in Concrete Floor Slabs Using in situ Probes.
BS 1881 Part 203	Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete (Withdrawn 2004).
BS 1881 Part 204	Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters.
BS 1881 Part 207	Testing concrete. Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests.
BS EN 12504-2:2001	Testing concrete in structures. Non-destructive testing. Determination of rebound number.

Código	Título
BS EN 12504-4:2004	Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity.
CSA A23.1, A23.2	Concrete materials and methods of concrete construction/test methods and standard practices for concrete.
DGZfP B02	Instruction sheet for non-destructive concrete cover measurement and location of reinforcement on steel and prestressed concrete components.
DGZfP B03	Leaflet for electrochemical potential measurements for the detection of reinforcement steel corrosion.
DIN 1048-2	Testing concrete; testing of hardened concrete.
DIN 50156	Electrical equipment for furnaces and ancillary equipment.
DIN 50157	Metallic materials - Hardness testing with portable measuring instruments operating with mechanical penetration depth.
DIN 50159: 2015 -01	Metallic materials - Hardness testing with the UCI method.
EN 302 066 – ETSI	Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Ground- and Wall- Probing Radar applications (GPR/WPR) imaging systems.
EN 1015-12:2016	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros de revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes.
EN 1348:2008	Adhesivos para baldosas cerámicas. Determinación de la resistencia a la tracción de los aditivos cementosos.
EN 1542:2000	Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la adhesión por tracción directa.
EN 12504-2:2013	Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote.
EN 12504-4:2006	Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.
EN 13295: 2004	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance to carbonation.
EN 13791:2009	Evaluación de la resistencia a compresión in-situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón.
GB / T 17394 a 1998	Metallic materials Leeb hardness test.
IS 13311-1:	Method of Non-destructive testing of concret, Part 1: Ultrasonic pulse velocity.

Código	Título
ISO 1920-7:2004	Testing of concrete -- Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete.
ISO 4624: 2016	Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion.
ISO 6506-1:2014	Metallic materials -- Brinell hardness test -- Part 1: Test method.
ISO 10880:2017	Non-destructive testing -- Infrared thermographic testing -- General principles.
ISO 16859:2015	Metallic materials -- Leeb hardness test.
ISO 18265:2013	Metallic materials -- Conversion of hardness values.
JGJ/T 23-2011	Technical specification for inspecting of concrete compressive strength by rebound method.
JGJ/T 152-2008	Technical specification for test of reinforcing steel bar in concrete.
JSCE-E 601	Test method for half-cell potentials of uncoated rebars in concrete structures.
NCh197.Of 1956	Ensayo de la dureza Brinell en materiales metálicos.
NCh198.Of 1956	Ensayo de la dureza Rockwell y de la dureza Rockwell superficial.
NCh1473.Of 1978	Tablas de valores de dureza Vickers (HV) para materiales metálicos.
NCh1474.Of 1978	Tablas de valores de dureza Brinell (HB) a usar en ensayos efectuados sobre superficies planas.
NCh1565.Of 2009	Hormigón - Determinación del índice esclerométrico.
NCh1832.Of 1981	Caucho vulcanizado y plásticos - Determinación de la dureza Shore.
NCh 2354.Of 1999	Ensayos no destructivos: calificación y certificación del personal.
NEN 5970: 2001	Determination of strength of fresh concrete with the method of weighted maturity.
NF P94-160-3	Recognition and testing - Auscultation of a foundation element - Part 3: Parallel seismic method (P. S. M.).
NF P 94-160-4.	Soils: reconnaissance and tests. Auscultation of a foundation element. Part 4: Impedance method.
NT Build 492	Nordtest Method for concrete, mortar and cement-based repair materials:Chloride migration coefficient from Non-Steady-State migration experiments.
RILEM LUM.D.2	In-situ stress tests on masonry based on the flat jack, 1991.
RILEM LUM .D.3	In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat jack, 1991.
RILEM TC 154-EMC	Electrochemical Techniques for measuring metallic corrosion.
SIA 262/1-E	Non-Destructive Site Air Permeability Test.
T259-80.	Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration.

Código	Título
UNE 83-308-86	Ensayos de hormigón. Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.
UNE 36282:1980 EX	Clasificación de piezas de acero moldeado según el examen por partículas magnéticas.
UNE 41250-3:2016	Métodos de ensayo para la medida de las deflexiones en firmes de carretera. Parte 3: Deflectómetro de impacto.
UNE 41809:2014	Estructuras de madera existentes. Uso del penetrómetro para diagnóstico de los elementos de madera en edificios existentes.
UNE 56544:2011.	Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de conífera.
UNE-EN 1369:2013	Fundición. Ensayo por partículas magnéticas.
UNE-EN 10228-1:2016	Ensayos no destructivos de piezas de acero forjadas. Parte 1: Inspección por partículas magnéticas.
UNE-EN-13183-2	Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.
UNE-EN 13183-3	Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 3: Estimación por el método capacitivo.
UNE-EN ISO 3059:2013	Ensayos no destructivos. Ensayo mediante líquidos penetrantes y partículas magnéticas. Condiciones de observación. (ISO 3059:2012).
UNE-EN ISO 9934:2017	Ensayos no destructivos. Ensayo por partículas magnéticas.
UNE-EN ISO 17638:2017	Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo mediante partículas magnéticas. (ISO 17638:2016).
UNI 10174	Instruction For The Inspection Of Reinforced Concrete Structure Exposed Atmosphere By Half Potential Mapping.
UNI 11366: 2010	On safety and health protection in professional diving and hyperbaric activities at the service of industry - operating procedures.
XP P 18-461	Accelerated stationary chloride ion migration test.
ZTV-SIB 90	Additional Technical Terms and Conditions of Contract and Guidelines for the Protection and Repair of Concrete Components.

Tabla A.1 Listado de normativa y guías aplicables a los Ensayos No-Destructivos.

B: Levantamiento Fotográfico Puente Calle-Calle I

Las fotografías pertenecientes a este levantamiento fotográfico han sido tomadas en visitas al Puente Calle-Calle1, verificándose que para noviembre del 2017 siguieran las mismas condiciones.

En las fotografías se puede apreciar los deterioros actuales de los distintos elementos estructurales y no estructurales de este Puente.



Fig. B.1 Calzada puente.



A la izquierda, junta de expansión y capa de rodadura, presenta grietas y acumulación de basura en la junta. A la derecha, acceso norte del puente. Pavimento en mal estado.



Fig. B.2 Cableado.

Puerta abierta en sector de mantención de cables de electricidad presentes bajo el puente.



Fig. B.3 Astas de banderines.

Oxidación y falta de pintura de astas de banderines.



Fig. B.4 Vista inferior tablero.



A la izquierda, desprendimiento de recubrimiento en borde de viga, se observa la armadura de la losa inferior. A la derecha, desprendimiento del recubrimiento de la losa inferior de la viga, se observa armadura a la vista.



Fig. B.5 Voladizo.

Desprendimiento de recubrimiento en parte inferior de la losa superior, armadura a la vista en estado de oxidación.



Fig. B.6 Rótula Gerber.



Se ve la infiltración de agua, la presencia de moho y vegetación además de fisuras y falta de recubrimiento.



Fig. B.7 Ceba y viga.

Separación entre la ceba y el tablero, se puede ver los aparatos de apoyo.



Fig. B.8 Viga y mesa de apoyo, vista superior.

Encuentro viga con mesa de apoyo, se puede ver presencia de moho y ausencia de recubrimiento quedando la armadura a la vista.



Fig. B.9 Mesa de apoyo vista inferior.

Fisuras, grietas y vegetación presente en la mesa de apoyo.





Fig. B.10 Vista inferior unión tablero y cepa acceso norte.

Vegetación creciendo en el encuentro entre la cepa de apoyo entre viga tipo cagón y vigas de acceso. Acceso norte del puente.



Fig. B.11 Vista inferior unión tablero y cepa acceso sur.

Sección faltante de losa inferior en la viga tipo cajón del puente. Acceso Sur a un costado de la cepa.



Fig. B.12 Armadura

Armadura sin recubrimiento, en estado de oxidación y corrosión; además se pueden ver fisuras y agrietamiento del hormigón. Encuentro entre viga de acceso y estribo del puente.



Fig. B.13 Unión viga y cepa

Fotografía inferior del puente, se puede ver la unión viga y la cepa, además del moho y grietas presentes en la cepa del puente.



Fig. B.14 Cepa acceso sur

Socavación de la fundación de la fundación de la cepa de acceso sur al puente.



Fig. B.15 Cepa acceso norte

Cepa de acceso norte. El nivel del cauce del Río Calle-Calle ha disminuido. Protección del cauce inexistente o en mal estado.

C: Índice de Tablas

Lista de Tablas

Capítulo II

Tabla 2.1	Fenómenos que influyen en la durabilidad de las estructuras de hormigón, identificados mediante métodos END (HOŁA. 2015)	9
Tabla 2.2	Fenómenos que influyen en la durabilidad de las estructuras de hormigón, causados por los principales mecanismos de degradación (HOŁA. 2015).....	10
Tabla 2.3	Breve descripción de equipos de END y su uso (BS-103. 2009)	21

Capítulo III

Tabla 3.1	Clasificación de END según el material que compone la estructura y el tipo de método. El número que acompaña al ensayo indica el número de ficha correspondiente a dicho ensayo.....	25
-----------	--	----

Capítulo IV

Tabla 4.1	Tablas de clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad del pulso ultrasónico.	38
Tabla 4.2	Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de Kt	66
Tabla 4.3	Penetrabilidad de iones de cloruro según en la carga pasada (Germann Instruments. 2014).	79

Capítulo V

Tabla 5.1	Criterios de clasificaciones de puentes (Adaptado del Manual de Carreteras Vol.3. 2017).	81
-----------	---	----

Anexo A

Tabla A.1	Listado de normativa y guías aplicables a los Ensayos No-Destructivos.	122
-----------	---	-----

D: Índice de Figuras

Lista de Figuras

Capítulo II

Fig 2.1	Métodos y técnicas básicas de Ensayos No-Destructivos (END) útiles para evaluar la durabilidad de la estructura de hormigón (HOŁA. 2015).	12
---------	---	----

Capítulo III

Fig 3.1	Clasificación de END según métodos de aplicación. El número que acompaña al ensayo indica el número de ficha correspondiente a dicho ensayo.	24
---------	--	----

Capítulo IV

Fig. 4.1	Inspección visual (INDOT. 2013).	29
Fig. 4.2	Boroscopio flexible (Boyd <i>et al.</i> 2005)	30
Fig. 4.3	Medidor distancia laser (De maquinas y herramientas. S.f.)	31
Fig. 4.4	Fotografía del ensayo (Faro. 2013).	32
Fig. 4.5	Fotogrametría en vigas.	33
Fig. 4.6	Microfotografía de madera (Basterra <i>et al.</i> 2009)	34
Fig. 4.7	Medidores de grietas (ControlsGroup. 2015)	35
Fig. 4.8	Ensayos de soldadura mediante líquidos penetrantes (Geotecnia Consultores. S.f.)	36
Fig. 4.9	Ultrasonido (Proceq. 2017 (I))	37
Fig. 4.10	Posición de transductores.(ISO 1920-7)	37
Fig. 4.11	Diferentes condiciones (Germann Instruments. 2014).	37
Fig. 4.12	Ensayo Echo-impacto (Proceq. 2017 (I)).	39
Fig. 4.13	Esquema de señal Eco-impacto (Proceq. 2017 (I)).	39
Fig. 4.14	Proceso de emisión acústico (Sidorova. 2010).	40
Fig. 4.15	Ensayo en pavimento (Olson. 2012)	41
Fig. 4.16	Tomografía ultrasónica en análisis estructural (Foppoli. S.f.)	42
Fig. 4.17	Sistema Cross-Hole completo con 2 carretes motorizados. (ControlsGroup. 2015).	43
Fig. 4.18	Esquema del ensayo (ControlsGroup. 2015).	43
Fig. 4.19	Componentes del sistema. 1 Equipo PSI. 2Mazo equipado con un disparador. 3 Profundímetro digital. 4 Hidrófono. (Piletest. 2013)	44
Fig. 4.20	Ensayo de impedancia mecánica en un pilote (Sanjuán. 2012).	45
Fig. 4.21	Equipo sonar 3D e imagen de funcacion de puente (GrupoAvala. 2017).	46

Fig. 4.22	Sistema de medición de socavación (Muñoz. 2011).....	47
Fig. 4.23	Georradar y cuadrícula para ensayo (Proceq. 2017 (III)).	48
Fig. 4.24	Radiografías industriales a soldadura. (1) Inclusiones de escoria. (2) Falla de fusión (Bunge & Magallanes.2011).	49
Fig. 4.25	Imagen tomográfica de una columna (Valluzzi. 2002).	50
Fig. 4.26	Operario utilizando profometer (Proceq. 2017 (I)).	51
Fig. 4.27	Principio de medición (Proceq. 2017 (II)).	51
Fig. 4.28	Sonda Wenner Resipod (Proceq. 2017 (I)).	52
Fig. 4.29	Realización de una medición (Proceq. 2015)	52
Fig. 4.30	Determinación de corrosión (Proceq. 2017 (I)).	53
Fig. 4.31	Xilohigrómetro In-situ (Basterra <i>et al.</i> 2009).	54
Fig. 4.32	kit para ensayo de partículas magnéticas (END - Chile. S.f).	55
Fig. 4.33	Inspección por corriente de Foucault (Ropax. S.f).	56
Fig. 4.34	Ensayo de medición de campo de corriente alterna (AkroScan. 2011).	57
Fig. 4.35	Polatrack CP GUN, dispositivo de ensayo (Stoprust. 2015).	58
Fig. 4.36	Termografía de una vivienda (Clark. 2003).	59
Fig. 4.37	Defectos por termografía activa.	60
Fig. 4.38	Higrómetro Higropin (Proceq. 2017 (I)).	61
Fig. 4.39	Lector y registrador Interllirock (Scancemmaterials. 2005).	62
Fig. 4.40	Prueba Pull-Out (Hissain. 2013).	63
Fig. 4.41	Equipo Pull-Off (Proceq. 2017 (I)).	64
Fig. 4.42	Tipos de fallas (Proceq. 2017 (I)).	64
Fig. 4.43	Esquema de la muestra cilíndrica de hormigón y su ubicación de carga aplicada de ensayo (Naik. 2003).	65
Fig. 4.44	Equipo de método Torrent (Torrent & Ebensperger. 2010).	66
Fig. 4.45	Esquema y detalles del método Torrent (Torrent & Ebensperger. 2010).	66
Fig. 4.46	Prueba de carga (CivilGeek. 2011).	67
Fig. 4.47	Deflectómetro de impacto (Road Survey Devices. S.f.).	68
Fig. 4.48	Esquema explicativo del sistema Dynatim (Passola. 2013).	69
Fig. 4.49	Extracción de tornillos en obra (Basterra <i>et al.</i> 2009).	70
Fig. 4.50	Uso del Resistógrafo in situ (Marín. 2013).	71
Fig. 4.51	Ensayo de gato plano sobre albañilería (Lombillo. 2010).	72

Fig. 4.52	Esquema de roseta del ensayo de hole drilling (Monteagudo. 2010).	73
Fig. 4.53	Esclerómetro Schmidt (Proceq. 2017 (I)).	74
Fig. 4.54	Set de ensayo Windsor (INDOT. 2013).	75
Fig. 4.55	Empleo del penetrómetro Pilodyn 6J (Palaia. 2014.)	76
Fig. 4.56	Equotip (Proceq. 2017 (IV)).	77
Fig. 4.57	Ensayo de carbonatación (Gavilán y Asociados. S.f).	78
Fig. 4.58	Principales componentes del ensayo sistema proove'it (Germann Instruments. 2014).	79

Capítulo V

Fig. 5.1	Elementos principales de un puente. (Manual de Carreteras Vol.3. 2017).	86
Fig. 5.2	Conocer el alcance de la actuación (Adaptado de Fernández. 2014).	91
Fig. 5.3	Proceso de caracterización de los materiales mediante ensayos informativos (Adaptado de Fernández. 2014).	91
Fig. 5.4	Planificación y determinación de la campaña de ensayos (Adaptado de Fernández. 2014).	92
Fig. 5.5	Determinación de los ensayos informativos (Adaptado de Fernández. 2014).	94
Fig. 5.6	A la izquierda, vista satelital de la ciudad de Valdivia. A la derecha vista satelital ampliada sobre el Puente Calle-Calle I (GoogleMaps. 2017).	95
Fig. 5.7	Representación esquemática en elevación eje longitudinal de aplicación de ensayos para Puente Calle-Calle I, Valdivia.	97
Fig. 5.8	Representación esquemática en planta de aplicación de ensayos para Puente Calle-Calle I, Valdivia.	98
Fig. 5.9	Representación esquemática en corte sección transversal (vano de acceso) de aplicación de ensayos para Puente Calle-Calle I, Valdivia.	101
Fig. 5.10	Representación esquemática de aplicación de ensayos de fundaciones en planta para Puente Calle-Calle I, Valdivia.	104

Anexo B

Fig. B.1	Calzada puente.	123
Fig. B.2	Cableado.	123
Fig. B.3	Astas de banderines.	123
Fig. B.4	Vista inferior tablero.	124
Fig. B.5	Voladizo.	124
Fig. B.6	Rótula Gerber.	124
Fig. B.7	Cepa y viga.	125
Fig. B.8	Viga y mesa de apoyo, vista superior.	125

Fig. B.9	Mesa de apoyo vista inferior.	125
Fig. B.10	Vista inferior unión tablero y cepa acceso norte.	126
Fig. B.11	Vista inferior unión tablero y cepa acceso sur.	126
Fig. B.12	Armadura	126
Fig. B.13	Unión viga y cepa.....	127
Fig. B.14	Cepa acceso sur	127
Fig. B.15	Cepa acceso norte.....	127