



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**PROPUESTA DE NORMATIVO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN
ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y PUENTES**

Jorge Luis Rodas Pinto

Asesorado por el Ing. Foscolo Liano Quezada

Guatemala, julio de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE NORMATIVO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN
ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y PUENTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE LUIS RODAS PINTO

ASESORADO POR EL ING. FOSCOLO LIANO QUEZADA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
EXAMINADOR	Ing. José Estuardo Galindo Escobar
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Saénz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE NORMATIVA DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y PUENTES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha diecinueve de noviembre de dos mil diecinueve.

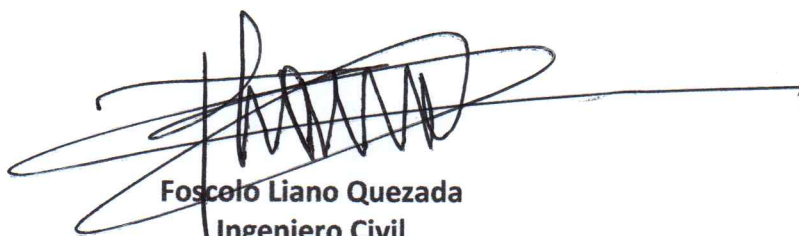
Jorge Luis Rodas Pinto

Guatemala, 7 de abril de 2021

Ingeniero
Hugo Montenegro
Coordinador Área de Materiales de Construcción y Obras Civiles
Universidad de San Carlos de Guatemala
Su Despacho

Ing. Aguilar

Por medio de la presente me permito hacer de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación titulado "PROPUESTA DE NORMATIVA DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y PUENTES" realizado por el señor Jorge Luis Rodas Pinto, quien se identifica con número de registro académico 201314840. Dicho trabajo de graduación cumple con todos los requisitos establecidos por la Universidad de San Carlos de Guatemala, por lo que extendiendo la presente carta para que se continúe con el trámite correspondiente.



Foscolo Liano Quezada
Ingeniero Civil
Colegiado Activo 2205



Guatemala, 23 abril de 2021

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes,

Le informo que he revisado el trabajo de graduación “PROPUESTA DE NORMATIVO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y PUENTES “, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Jorge Luis Rodas Pinto, quién contó con la asesoría de la Ing. Foscolo Liano Quezada.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
Coordinador del área de Materiales de Construcción y obras civiles





El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Foscolo Liano Quezada y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco al trabajo de graduación del estudiante Jorge Luis Rodas Pinto **PROPUESTA DE NORMATIVO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y PUENTES**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Armando Fuentes Roca
Director Escuela Ingeniería Civil

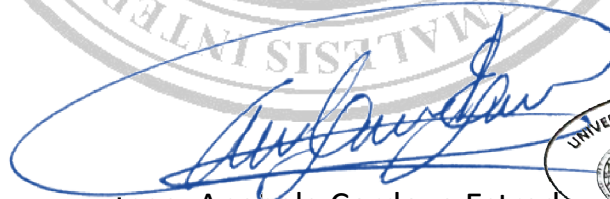
Guatemala, julio 2021
/mrrm.



DTG. 313.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE NORMATIVO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y PUENTES**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Luis Rodas Pinto**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, julio de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
- Mis padres** Osmar Omar Rodas Mazariegos y Carol Jeannette Pinto Pinto. Su amor será siempre mi inspiración y fuerza.
- Mi hermana** Enma María Rodas Pinto. Por apoyarme y alentarme en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi <i>alma mater</i> .
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme todo el conocimiento y sabiduría para desempeñar mi profesión electa.
A mi padre	Por ser un ejemplo de como debe ser un profesional y un hombre de bien.
A mi madre	Por ser mi apoyo incondicional y recordarme que siempre hay que seguir adelante a pesar de todo.
María Celeste de León González	Por estar a mi lado y ayudarme a nunca rendirme y mantener la frente en alto.
Mi asesor Ing. Foscolo Liano	Por proporcionarme el conocimiento y guía necesaria para la realización del presente trabajo.
Grupo Muratori	Por proporcionarme las herramientas necesarias para la realización de las pruebas realizadas.
Mis amigos de la Facultad	Por el apoyo incondicional que me proporcionaron a lo largo de mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES DEL MANTENIMIENTO Y CUIDADO DE LOS PUENTES EN GUATEMALA	1
1.1. Características geográficas de Guatemala	1
1.1.1. Geografía de Guatemala.....	1
1.1.2. Mapa de fallas tectónicas.....	5
1.1.3. Consecuencias de ser un país con actividad sísmica frecuente.....	7
1.2. Fallas estructurales.....	11
1.2.1. Causas de las fallas estructurales.....	11
1.2.1.1. Deformación plástica.....	11
1.2.1.2. Deformación inelástica	12
1.2.1.3. Pandeo.....	13
1.2.1.4. Fatiga.....	13
1.2.1.5. Fluencia	14
1.2.1.6. Corrosión	14
1.2.1.7. Fractura.....	15
1.3. Causas para retirar o reemplazar un elemento.....	16
1.4. Normativa utilizada en Guatemala	17

2.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA MEDIR EL DETERIORO EN PUNTES.....	21
2.1.	Evaluación no destructiva	21
2.1.1.	Ventajas de la evaluación no destructiva.....	21
2.1.2.	Aspectos por considerar	23
2.1.2.1.	Factores geométricos	25
2.1.2.2.	Factores humanos	25
2.1.2.3.	Factores ambientales	26
2.1.2.4.	Factores técnicos.....	27
2.2.	Efectividad de la evaluación no destructiva	27
2.3.	Técnicas para los ensayos no destructivos	28
2.3.1.	Clasificaciones	29
2.3.2.	Alcances.....	32
2.3.3.	Criterios para seleccionar el ensayo no destructivo	33
2.3.4.	Capacitación, calificación y certificación	34
3.	NORMAS COGUANOR	37
3.1.	¿Qué es COGUANOR?	37
3.2.	Estructura y funciones.....	37
3.2.1.	Estructura	38
3.2.2.	Funciones.....	39
3.3.	Aspectos generales de la normalización	39
3.3.1.	Proceso de elaboración de Normas Técnicas Guatemaltecas	39
3.3.2.	Requisitos generales de la normalización.....	40
3.3.3.	Objetivos de la normalización	41
3.3.4.	Fortalezas de la normalización	42
3.3.5.	Tipos de normas.....	43
3.4.	Importancia de la normalización	44

3.4.1.	A nivel general	44
3.4.2.	Para el fabricante o proveedor	45
3.4.3.	Para el consumidor	45
3.4.4.	Para la investigación y desarrollo.....	46
3.4.5.	Para la seguridad.....	47
3.5.	Comités técnicos	47
4.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	51
4.1.	Técnicas de evaluación superficial	51
4.1.1.	Evaluación visual	52
4.1.2.	Líquidos penetrantes.....	54
4.1.3.	Corrientes parásitas	58
4.2.	Técnicas de evaluación volumétricas.....	61
4.2.1.	Evaluación por ultrasonido	61
4.2.2.	Radiografía industrial	69
4.2.3.	Emisiones acústicas	74
4.3.	Técnicas para la evaluación de puentes	79
4.3.1.	Radar de penetración.....	80
4.3.1.1.	Metodología de Hermes	82
4.3.1.2.	Metodología Peres	83
4.3.2.	Sensores magneto-restrictivos.....	85
4.3.3.	Sensores de corrosión	87
4.3.4.	Antena electromagnética	88
4.3.5.	Martillo esclerométrico	89
5.	PROPUESTA DE UNA NORMATIVA QUE REGULE LOS PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS REALIZADOS EN PUENTES.....	93
5.1.	Objeto y campo de la aplicación	93
5.2.	Terminología.....	94
5.2.1.	Definiciones	94

5.3.	Resumen del procedimiento.....	95
5.4.	Catálogo de ensayos no destructivos.....	95
5.4.1.	Evaluación superficial.....	95
5.4.2.	Evaluación volumétrica.....	96
5.4.3.	Evaluaciones para puentes.....	96
5.5.	Equipo.....	97
5.5.1.	Evaluación superficial.....	97
5.5.1.1.	Evaluación visual.....	98
5.5.1.2.	Líquidos penetrantes.....	98
5.5.1.3.	Corrientes parásitas.....	98
5.5.2.	Evaluación volumétrica.....	99
5.5.2.1.	Evaluación por ultrasonido.....	99
5.5.2.2.	Radiografía industrial.....	99
5.5.2.3.	Emisiones acústicas.....	99
5.5.3.	Evaluaciones para puentes.....	100
5.5.3.1.	Radar de penetración.....	100
5.5.3.2.	Martillo esclerométrico.....	100
5.6.	Procedimiento.....	100
5.7.	Informe de resultados.....	101
5.7.1.	Antecedentes del puente.....	101
5.7.2.	Métodos de ensayos seleccionados.....	102
5.7.3.	Procedimientos realizados.....	102
5.7.4.	Resultados obtenidos.....	102
	CONCLUSIONES.....	103
	RECOMENDACIONES.....	107
	BIBLIOGRAFÍA.....	109
	APÉNDICES.....	113
	ANEXOS.....	123

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa de Guatemala.....	2
2.	Mapa de cuencas y vertientes de la República de Guatemala	3
3.	Mapa tectónico de la República de Guatemala	6
4.	Crecimiento de grietas con procesos cíclicos de inspección / reparación para alagar la vida de un componente estructural	17
5.	Diagramas en secciones transversales de vigas	24
6.	Proceso para la creación de normas	40
7.	Dispositivos de magnificación para evaluaciones visuales	53
8.	Endoscopio	54
9.	Inspección en la base de un puente por medio de líquidos penetrantes	58
10.	Representación del método de corrientes parásitas	59
11.	Equipo Hocking Phasec 2200	60
12.	Representación del equipo utilizado y la realización de la evaluación por ultrasonido	63
13.	Representación de los espectros de respuesta en base a la dirección de la fisura o grieta encontrada	65
14.	Representación en función de la coordenada espacial del espectro de respuesta (Método “B”)	66
15.	Representación en dos dimensiones del espectro de respuesta (Método “C”).....	67
16.	Equipos de radiografía industrial	71

17.	Gráfica de inicio de propagación de efectos de corrosión	76
18.	Radar de penetración modelo RD1500	84
19.	Martillo esclerométrico	91

TABLAS

I.	Cuencas y vertientes de la República de Guatemala	4
II.	Clasificación de los métodos de ensayo disponibles	30

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CA	Carretera Centroamericana
f_c	Esfuerzo máximo a compresión del concreto
kHz	Kilo Hertz
mHz	Mega Hertz
m	Metro
mm	Milímetro
nm	Nanómetro
Km	Kilometro
PSI	<i>Pound per square inch</i> (libra sobre pie cuadrado en inglés)

GLOSARIO

Delaminaciones	Superficies delgadas (entre 3 a 9 mm) que se separan de la capa base, debido a la presencia del agua.
Efecto Barkhausen	Sonido en la salida magnética de un material ferromagnético cuando el campo magnético aplicado en él cambia.
END	Ensayos no destructivos.
Fotosensible	Que es sensible a la acción de la luz.
Transductor	Dispositivo que recibe un tipo de energía (mayormente eléctrica), y la convierte en otro tipo de energía a la salida.

RESUMEN

La investigación y normalización acerca de las técnicas y ensayos del hormigón han sido la base para el diseño y construcción de obras seguras y estables, sin embargo, el mantenimiento de estas estructuras es un tema diferente. Se describe la geografía nacional y el ente encargado de la normalización nacional.

Se analizan las diferentes fallas que pueden sufrir las estructuras y los procedimientos que se utilizan para detectar el deterioro o daños en las mismas. Finalmente se hace una propuesta a normativa para la realización de estos procedimientos, con el fin de que su utilización sea obligatoria y no opcional.

Debido a que Guatemala es un país en el que el concreto es el material primario para la construcción, es necesario que la investigación de este material y la teoría acerca del cuidado de este se mantengan actualizados. Algunos países, como Estados Unidos de América, Chile, entre otros, han avanzado en el estudio del concreto y su cuidado, se recopilaron conocimientos obtenidos por estos países y se efectúan análisis de las necesidades actuales del país, con el objetivo de ampliar, mejorar y optimizar los procedimientos para el estudio de estructuras que se han sometido al paso del tiempo y el deterioro causado por las condiciones climáticas.

El presente informe presenta la propuesta de ensayos no destructivos para elementos estructurales y puentes. Se inicia estudiando las características geográficas del territorio nacional, dando un enfoque de cómo las fuerzas de la

naturaleza causan el deterioro constante de las estructuras, y como consecuencia las fallas y defectos en los elementos estructurales.

Se continua con la presentación de COGUANOR; detallando las funciones y la importancia de la normalización en el territorio nacional de la presente propuesta. Luego se procederá a detallar toda la información de los ensayos no destructivos, desde los criterios para escoger el procedimiento adecuado, hasta los resultados que estos puedan proporcionar, finalizando con la redacción de la norma que se propone para la utilización en ensayos no destructivos dentro del territorio nacional.

OBJETIVOS

General

Proponer una normativa para los ensayos no destructivos (END) que se deben realizar en elementos de concreto y puentes de concreto.

Específicos

1. Detallar el procedimiento a seguir para proponer una norma a la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR).
2. Detallar los distintos procedimientos y documentos que se deberán realizar para los ensayos no destructivos.
3. Analizar los resultados obtenidos de los ensayos reproducidos en el puente Motagua ubicado en El Rancho km. 82 de la CA 9 norte

INTRODUCCIÓN

En Guatemala las estructuras de concreto son muy comunes, en la actualidad casi el 85 % de las estructuras en el territorio nacional están hechas de concreto. El concreto es un material que funciona a compresión, este puede llegar a soportar grandes cargas sin problema alguno, lo que hace que este material sea ideal para edificaciones masivas o verticales. También es un material que ha demostrado ser muy útil al momento de construir puentes. A pesar de ser un material poco flexible, este ha logrado trabajar en vigas de puentes de grandes luces, empleando diferentes metodologías o combinándolo con distintos materiales para reforzarlo, y así poder darle la resistencia necesaria.

Como todo material el concreto se deteriora y esto podría darse por varias razones; las más comunes que pueden mencionarse son: el tiempo, los efectos climáticos y las exposiciones a cargas cíclicas. Este deterioro es delicado, si este llega a dar de una manera descontrolada o acelerada podría presentar daños significativos a la estructura.

En la rama de la Ingeniería Civil eso debe considerarse como un peligro y es sumamente delicado debido a que, si una estructura se daña, esta podría colapsar. El colapso de una estructura significaría riesgos y daños para los usuarios de esta, por lo que no se puede omitir y dejar de prestar atención técnica y profesional a estos fenómenos que se presentan en los elementos estructurales y puentes.

Debido a que las estructuras tienen una vida útil, que se ha dimensionado en varias décadas, se debe estar siempre atento para detectar la presencia de estas fallas estructurales para intervenir, prevenir y corregir.

El deterioro que los elementos estructurales y puentes, sufren es grande, están expuestos a la naturaleza y sus fenómenos, así como a sus constantes cambios; sin mencionar que las condiciones y circunstancias de cálculo originales para su uso cambia en el tiempo. En el caso de los puentes, la carga que estos soportan cambia casi a diario; el tráfico vehicular es distinto, en capacidad y en cantidad, y este puede aumentar significativamente sin razón alguna o como efecto del crecimiento demográfico de una ciudad o un país.

Para poder detectar alguna falla o monitorear el deterioro de una estructura de concreto o puente es necesario realizar ensayos no destructivos (END). Este tipo de procedimientos permite monitorear el deterioro de las estructuras de concreto sin tener que dañar o extraer una muestra de estas.

1. ANTECEDENTES DEL MANTENIMIENTO Y CUIDADO DE LOS PUENTES EN GUATEMALA

1.1. Características geográficas de Guatemala

La geografía de Guatemala es diversa y amplia; el territorio guatemalteco es marcadamente montañoso, el sesenta por ciento (60 %) del territorio nacional está conformado de cadenas montañosas de las cuales la una gran parte de ella son de origen volcánico. La razón de que Guatemala tenga una geografía así es que debajo del territorio nacional está la unión de 3 placas tectónicas.

1.1.1. Geografía de Guatemala

Guatemala es un país que se ubica en la región centroamericana, colinda al norte con México, al este con Belice, Honduras y El Salvador y al sur con el Océano Pacífico. El territorio guatemalteco cuenta con 108,889 km².

Guatemala se caracteriza por ser un país montañoso, con la excepción del área de la costa sur y el departamento de Peten. Estas cadenas montañosas son las que separan el territorio guatemalteco en tres regiones: las tierras altas; la costa pacífica; y la región de Peten. Además de las cadenas montañosas Guatemala tiene registrados 324 estructuras volcánicas, pero únicamente 34 de estas son consideradas como volcanes. La razón por la que Guatemala posee tantas montañas y volcanes es debido a que se encuentra en la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe.

Figura 1. **Mapa de Guatemala**

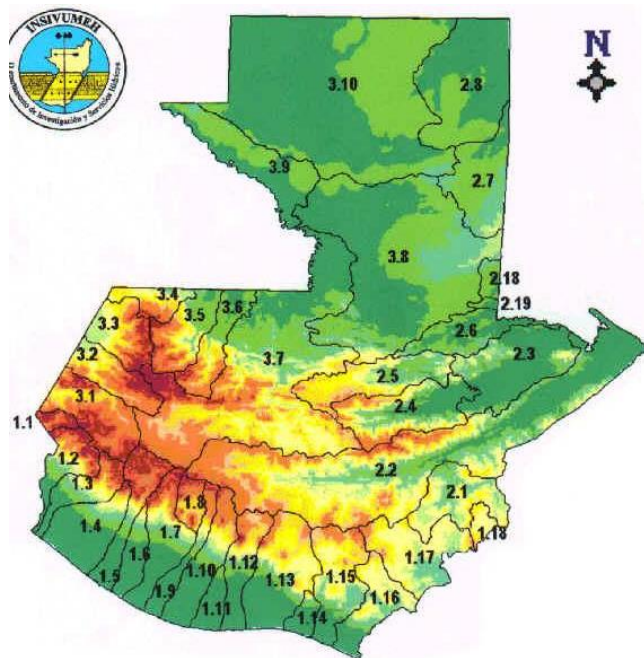


Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Tiempo actual*. insivumeh.gob.gt. Consulta: enero de 2020.

Debido a la ubicación geográfica de Guatemala, la topografía del territorio y los paisajes; el clima varía drásticamente entre tropical, cálido y húmedo. La característica de ser llamado el país de la eterna primavera es básicamente debido a sus paisajes y la calidez que la personas perciben al visitar el país. Regularmente el clima tropical y cálido prevalece a lo largo del año, sin embargo, el invierno tiene gran impacto y duración considerable en el territorio guatemalteco.

La hidrografía de Guatemala también es una de las características más importantes del país. Esto se puede demostrar debido a que el territorio guatemalteco se puede separar en tres grandes vertientes, viéndolo desde un punto de vista hidrológico. Dichas vertientes son vertiente del Pacífico; vertiente del Atlántico; y la vertiente del Golfo de México. Estas vertientes tienen características propias y pueden afectar el comportamiento y características de los ríos que están incluidos en ellas. Estas vertientes son el punto de nacimiento o punto de desembocadura para todos los ríos de Guatemala.

Figura 2. **Mapa de cuencas y vertientes de la República de Guatemala**



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Programa de Hidrología*. insivumeh.gob.gt/hidrologia/rios_de_guatemala.htm. Consulta: enero de 2020.

En la tabla I se identifican las treinta y ocho (38) cuencas y vertientes, estas también se enumeran para que puedan ser identificadas en el mapa de la figura 2.

Tabla I. **Cuencas y vertientes de la República de Guatemala**

Vertiente del Pacífico (1)		Vertiente del Atlántico (2)	Vertiente del Golfo de México (3)
Coatán (1.1)	Acamé (1.11)	Grande de Zacapa (2.1)	Cuilco (3.1)
Suchiate (1.2)	Achiguate (1.12)	Motagua (2.2)	Selegua (3.2)
Naranjo (1.3)	María Linda (1.13)	Izabal – Río Dulce (2.3)	Nenton (3.3)
Ocosito (1.4)	Paso Hondo (1.14)	Polochic (2.4)	Pojom (3.4)
Samalá (1.5)	Los Esclavos (1.15)	Cahabon (2.5)	Ixcán (3.5)
Sis-Icán (1.6)	Paz (1.16)	Sarstún (2.6)	Xaclbal (3.6)
Nahualate (1.7)	Ostúa – Guija (1.17)	Mopán-Belice (2.7)	Salinas (3.7)
Atitlán (1.8)	Olopa (1.18)	Hondo (2.8)	Pasión (3.8)
Madre Vieja (1.9)		Moho (2.18)	Usumacinta (3.9)
Coyolate (1.10)		Temans (2.19)	San Pedro (3.10)

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Programa de hidrología*. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/rios_de_guatemala.htm. Consulta: enero de 2020.

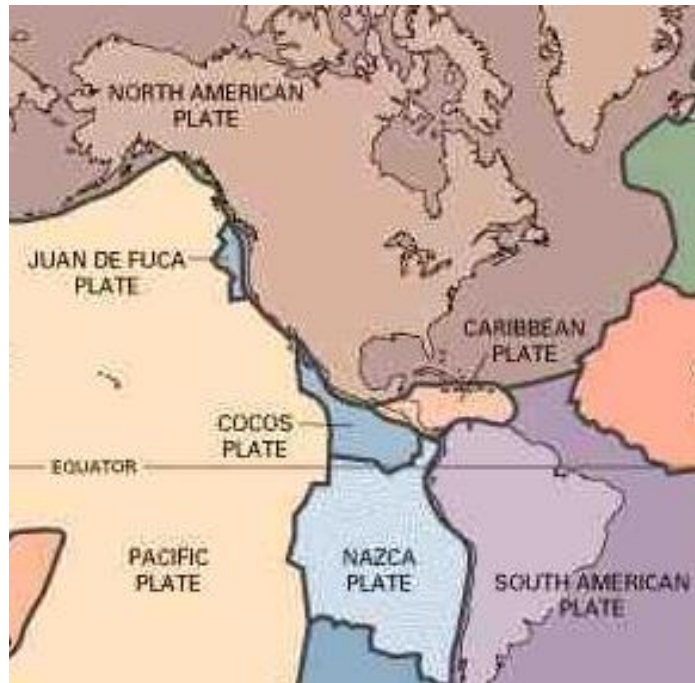
1.1.2. Mapa de fallas tectónicas

Guatemala debe sus rasgos topográficos y la distribución de volcanes y terremotos a la posición global en la que se encuentra. Todo esto es debido a que Guatemala se encuentra sobre tres placas tectónicas: Norteamérica; Caribe; y Cocos.

La placa de Cocos y del Caribe tienen un borde de tipo convergente. Un borde convergente ocurre cuando una placa se hunde o se desliza por debajo de la otra. En este caso la Placa de Cocos se hunde o se mueve por debajo de la Placa del Caribe; lo cual también se le conoce como un fenómeno de subducción en el estudio de la sismología. Es debido a este borde convergente que dentro del territorio nacional se da una gran cantidad de actividad sísmica y formación de volcanes. El contacto entre estas placas se ubica aproximadamente a 50 km. frente a las costas del Océano Pacífico.

Este borde de subducción también afecta a la Placa del Caribe. El efecto que tiene este borde sobre la placa se le conoce como fallamientos secundarios. Estos fallamientos secundarios son los que coloquialmente se les conoce como barrancos o asentamientos, y se pueden observar por todo el territorio nacional. Pero los que son producidos por el borde de subducción entre las Placas del Caribe y de Cocos son: Jalpatagua; Santa Catarina Pinula y Mixco.

Figura 3. **Mapa tectónico de la República de Guatemala**



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Estructura interna de la tierra*. <http://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/indice%20sismo.htm>. Consulta: enero de 2020.

1.1.3. Consecuencias de ser un país con actividad sísmica frecuente

Como se ha detallado en los capítulos previos, los sismos son eventos cotidianos en La República de Guatemala. La mayoría de los sismos que se registran son de una leve magnitud; estos sismos no pueden ser percibidos por el ser humano, únicamente los acelerógrafos pueden detectar estos sismos. Estos sismos son producto del movimiento constante que hay entre las placas tectónicas, y el hecho de que la República de Guatemala se encuentra dentro del punto de convergencia de tres placas tiene como consecuencia actividad sísmica frecuente.

Estos sismos de magnitud leve mantienen en movimiento el suelo y todo lo que está por encima de él. Los elementos naturales y no naturales son afectados por la actividad sísmica; los elementos naturales no se ven afectados por la actividad sísmica. Algunos, de estos elementos, son el producto de esta actividad, tales como las montañas y volcanes. En la naturaleza los movimientos sísmicos son incluso beneficiosos para el desarrollo y formación de nuevos hábitats; debido a que el movimiento del suelo y las deformaciones que este sufre ayuda a la flora y fauna a obtener y depositar nutrientes en el suelo.

Los elementos no naturales son aquellos que no son producidos por la naturaleza, sino por el humano, como lo son: casas, edificios, calles, entre otros. Estos elementos están diseñados para soportar grandes cargas cíclicas. Aunque las cargas para las cuales se diseñan estas estructuras son verticales. Con el avance del tiempo y la evolución de las necesidades humanas los diseños se han vuelto más flexibles y resistentes a movimientos laterales. Lo que actualmente se le denomina diseños sismorresistentes.

La ciencia encargada de estudiar los terremotos y la propagación de las ondas sísmicas es la sismología. La sismología es una rama de la geofísica y sus principales objetivos son:

- Estudiar como las ondas sísmicas se propagan en el interior de la Tierra con el propósito de conocer la estructura interna de la misma.
- Estudiar y determinar el origen y la causa de los movimientos sísmicos.
- Las consecuencias de los movimientos sísmicos y las medidas preventivas para estos.
- Creación de planes de concientización y alerta para las diferentes regiones, dependiendo de la frecuencia y magnitud de sismos que puedan llegar a ocurrir.

El estudio de los movimientos sísmicos y de los terremotos puede que sea tan antiguo como la humanidad misma. Se han encontrado códigos mayas que hablan y relatan estos fenómenos naturales. Esto es evidencia que desde tiempos antiguos existía la necesidad de entender los movimientos sísmicos.

Gracias a la sismología se han podido anticipar y prever algunos sismos. La sismología no puede determinar con exactitud cuándo ocurrirá un sismo o la magnitud de este. La sismología puede proporcionar un dato aproximado del tiempo en que ocurrirá uno y en base a la actividad tectónica del territorio puede estimar la magnitud con la cual ocurrirá.

Algunos eventos sísmicos que afectaron la República de Guatemala fueron:

- Terremoto de 1902, este evento cobro la vida de 200 personas en el departamento de Quetzaltenango.
- Los terremotos de 1917 y 1918, estos no son considerados como dos sismos separados, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), considera estos eventos como una serie o enjambre. Se reportaron 250 muertos.
- Terremoto de 1942, este evento se reparta como el de mayor magnitud dentro de La República de Guatemala, la magnitud reportada fue de 8.3.
- Terremoto de 1976, este evento es considerado como más devastador en la historia de Guatemala, en el registro se tiene 25 000 muertos y 75 000 heridos, a esto hay que agregar los 1 250 000 000 de dólares estadounidenses que se reportaron en daños a la infraestructura.

Los datos de la cantidad de heridos, fatalidades, magnitudes de los eventos sísmicos y el costo de los daños fueron tomados de documentos publicados por INSIVUMEH.

Estos eventos son los más relevantes y dañinos a través de la historia en Guatemala; quedando demostrado que estos eventos son relativamente frecuentes y que causan daños significativos cuando ocurren.

Debido a esto y a la necesidad de prevenir y reducir las consecuencias de los sismos y terremotos, se forma la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES).

La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), se fundó en el año 1994. Este proyecto fue iniciado e impulsado por diecinueve profesionales del sector privado junto con profesores universitarios. Debido a los fines y objetivos que se buscaban La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), logro tener personalidad jurídica en el año 1996.

Uno de los logros y actividades principales de La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica fue redactar las normas estructurales de diseño y construcción. En estas se presentaban parámetros para el diseño de estructuras para que estas tuvieran características sismorresistentes. A estas normas se les trato de proporcionarles carácter oficial con el apoyo del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), sin éxito alguno.

Debido a los intentos fallidos de publicar dichas normas la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica opto por un camino diferente. Por medio de un consenso técnico entre sus asociados y en una Asamblea se decidió darles una vigencia a dichas normas y darlas a conocer como Normas Recomendadas. En el año 2007, el Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, emitió el Acuerdo Ministerial 1686-2007.

Este acuerdo adopta dichas normas, y deberán actualizarse cada 5 años. Esto fue motivo para que el nombre de Normas Recomendadas fuese remplazado por Normas de Seguridad Estructural.

1.2. Fallas estructurales

Una falla estructural es un colapso en el que una estructura deja de cumplir su propósito y colapsa. No todas las fallas estructurales son un colapso total de la estructura, el termino también se utiliza para condiciones que no son tan drásticas, pero que pueden tener consecuencias de mismas magnitudes.

1.2.1. Causas de las fallas estructurales

Existen varios agentes naturales y no naturales que pueden deterior o dañar una estructura. las fallas estructurales pueden ser causados por agentes biológicos que dañan o alteran las características físicas de los elementos estructurales. La mayor causa de las fallas estructurales es la acción de fuerzas externas sobre los elementos, y puede ser mayor a la resistencia para la que fue diseñado el elemento.

1.2.1.1. Deformación plástica

Todas las estructuras están constituidas con materiales deformables, por lo que es de suma importancia que en el análisis estructural realizado se contemple los cambios en las dimensiones que las cargas aplicadas producen en los elementos. Generalmente los materiales tienen un comportamiento elástico, esto se cumple siempre y cuando las fuerzas actuantes sobre estos sean mínimas.

El comportamiento de las deformaciones elásticas se rige por la rigidez del material. Cuando se diseña un elemento se contempla que este regrese a su forma original cuando las fuerzas dejan de actuar en este. Las deformaciones plásticas en si no pueden causar una falla, pero al momento de que el elemento sufra algún tipo de interferencia o entre en contacto con otro elemento o componente, provocará que el sistema no se comporte como se diseñó. Dicho en otras palabras, una falla por deformación plástica solo se puede dar por un mal diseño.

1.2.1.2. Deformación inelástica

Todo material tiene su módulo de elasticidad, siempre que se le aplique una fuerza externa a cualquier material este sufrirá una deformación. Si la fuerza que se le aplica a dicho material no sobrepasa el límite de elasticidad, el material regresara a su forma original sin ningún problema.

Es todo lo contrario cuando se habla de una deformación inelástica. Requiere que al momento de aplicar la fuerza al material se sobrepase su límite elástico, por lo que el material no podrá regresar a su forma original; dejando en el material deformaciones permanentes e irreversibles. En los elementos estructurales se busca nunca llegar a este punto, pero este es un escenario que se da en las áreas de mayor concentración de esfuerzos.

Es correcto decir que no todas las deformaciones inelásticas conducen a una fractura o falla del elemento, pero estas zonas se vuelven deficientes y vulnerables. Donde ocurra una deformación inelástica esa zona se vuelve débil, y la concentración de esfuerzos en esta zona puede causar agrietamiento y consecuentemente estos agrietamientos se vuelven fracturas.

1.2.1.3. Pandeo

El pandeo es una falla común en las vigas y en aquellas placas que son sometidas a cargas de compresión y columnas. El pandeo es una de las fallas más peligrosas dentro de las estructuras, cuando esta se presente es señal de que hay un peligro inminente. Lo que hace al pandeo tan peligroso es por lo que este implica, cuando se produce el pandeo significa que existe una inestabilidad estructural.

Esta inestabilidad se produce cuando las cargas de compresión a las cuales está sometido el elemento estructural generan deflexiones laterales. Estas deflexiones implican un momento de flexión que lo único que provoca son deformaciones más pronunciadas.

1.2.1.4. Fatiga

Las estructuras están sometidas a cargas cíclicas en todo momento. Estas hacen que la estructura se deteriore. Aun si las cargas son pequeñas, estas suelen generar grietas y fallas graves. El proceso de deterioro inicia con la actuación de las fuerzas cíclicas en la estructura, estas producen microgrietas que son las que actúan como zonas de concentración de los esfuerzos. Ante las cargas cíclicas, la deformación que es producida por estas energías actúa en las zonas de concentración de esfuerzos y estas se liberan o manifiestan como una ruptura en los materiales.

1.2.1.5. Fluencia

La fluencia es un estado o fenómeno que se da a través del tiempo, esta es producida por cargas estáticas en los elementos por periodos prolongados de tiempo. El escenario esperado e idóneo es que el material se recupere de sus deformaciones elásticas, aunque los cambios en la forma y dimensiones de los elementos pueden llegar a ser permanentes y en algunos casos se pueden recuperar de una forma lenta, proceso al cual se le denomina relajamientos. La capacidad de los elementos y materiales para recuperarse depende de cuánto tiempo estuvieron bajo los efectos de las cargas y a la magnitud de estas, en la mayoría de los casos.

Es necesario tomar en cuenta que, en el caso de la fluencia, aun si las cargas a las cuales son sometidos los elementos o materiales no sobrepasan los límites elásticos de los mismos pueden presentar deformaciones permanentes. Este fenómeno ocurre debido a los procesos de dislocación y difusión, los cuales dependen de la temperatura y el tiempo. Estas características se pueden observar con mayor facilidad en metales cuando trabajan en temperaturas altas y tiempos prolongados. Mientras que los polímeros demuestran este comportamiento incluso en temperaturas ambiente.

1.2.1.6. Corrosión

La corrosión se define como el deterioro de un material debido a un ataque químico, que se presenta en diversas formas, estas son:

- Galvánicas, esta se da por el contacto entre dos metales
- Picaduras
- Exfoliación

- Ataque intergranular
- Combinación con la concentración de esfuerzos

El proceso de corrosión depende mucho de las características del material y del medio ambiente en el que este trabaja. La corrosión afecta rápidamente en ambientes húmedos y de altas temperaturas. En la mayoría de los casos la corrosión se manifiesta como la pérdida de espesor o de sección eficaz del material, aunque cuando esta se combina con esfuerzos de tensión, se producen grietas que si no son tratadas pueden seguir el proceso de deterioro, hasta convertirse en grietas graves y sumamente peligrosas.

1.2.1.7. Fractura

Una fractura es el peor escenario que se puede presentar en una estructura cuando esta se deteriora o falla. La ruptura de uno o varios elementos en una estructura es lo que se le denomina fractura. Las fracturas son la consecuencia típica de sobrecargas. Las fracturas se pueden visualizar y anticipar gracias a las deformaciones en los materiales. Los materiales o elementos presentan un comportamiento dúctil en la cual se liberan cantidades grandes de energía en forma de deformaciones permanentes.

Las fracturas también pueden ser repentinas. Esto sucede cuando el elemento o material tiene un comportamiento dúctil, este se caracteriza por no tener capacidad elevadas de deformarse. Para poder medir la resistencia de los materiales a las fracturas se utiliza el factor de tenacidad a la fractura, esta es una medida de capacidad de un material que tiene una grieta que resiste las cargas que se le aplican sin que llegue a la fractura.

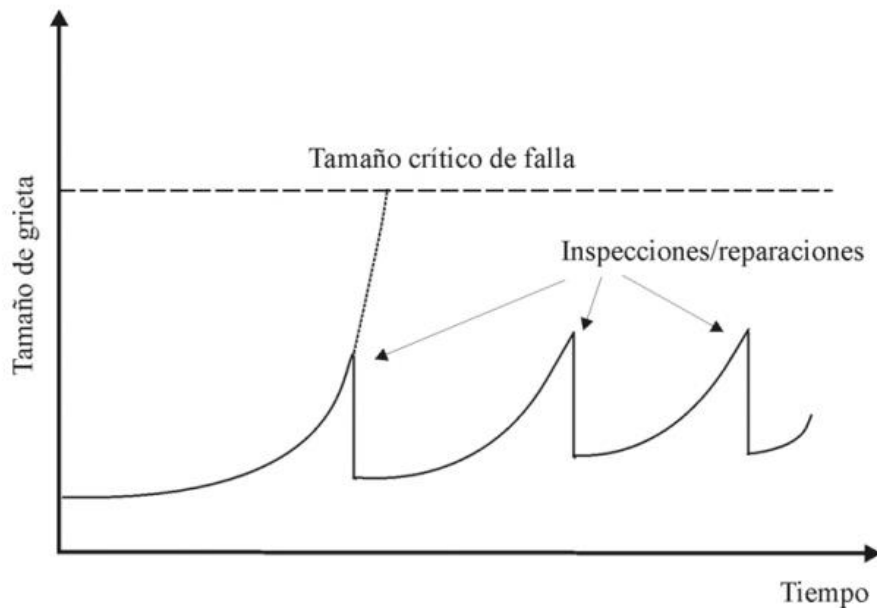
1.3. Causas para retirar o remplazar un elemento

Antes de tomar la decisión de retirar un elemento estructural es necesario la evaluación no destructiva y analizar el crecimiento de las grietas. Debido a estas técnicas es posible que se pueda realizar un plan o una estrategia para retirar un elemento estructural o mecánico. Lo cual en teoría debe de realizarse cuando este ha cumplido con un largo periodo de servicio. La vida útil o tiempo de servicio de un elemento puede alargarse si a este se le aplican inspecciones no destructivas periódicas y procedimientos de mantenimiento y reparación.

La decisión para realizar inspecciones o reparaciones no se dejan a criterio de nadie. Los tiempos en los que se deben realizar inspecciones deben ser calculados basándose en el tamaño más grande de las grietas que pudieran dejar de ser detectadas y un factor de seguridad. Los servicios de mantenimiento y reparaciones pueden ser efectuados la cantidad de veces que sean necesarias. Cuando la inspección y reparación tienen un costo mayor al de remplazar el elemento, estas deben obviarse y cambiar el elemento de manera inmediata.

El criterio al que se hace referencia al inicio de la sección es de carácter técnico-económico y uno de los pilares fundamentales para que este funcione es la confiabilidad de la inspección no destructiva; la cual arrojará datos y toda la información pertinente para conocer el tamaño de la grieta más grande, aun si esta no fuera detectada y con esa información calcular la vida útil que al material le queda. En la figura 4 se puede apreciar la relación del crecimiento de la grieta conforme el tiempo y procesos cíclicos de inspección y/o reparación.

Figura 4. **Crecimiento de grietas con procesos cíclicos de inspección / reparación para alargar la vida de un componente estructural**



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes.* p. 12.

1.4. Normativa utilizada en Guatemala

Guatemala es un país donde no se le ha dado el lugar que corresponde a las normativas o a los estudios que son necesarios para su creación de estas. Muchos de los procedimientos que se utilizan actualmente son conocimientos adquiridos a través de los años basándose en un proceso de prueba y error. Los estudios que se han utilizado para mejorar o crear procesos constructivos han sido muy pocos, sin mencionar que algunos de estos no han sido estudiados a profundidad directamente por ingenieros guatemaltecos.

Además, Guatemala ha optado por la utilización de normas extranjeras. En la República de Guatemala se utilizan y estudian varios códigos y normas extranjeras para la supervisión de procesos constructivos, fabricación, entre otros. Tal es el caso del ACI 318. Guatemala siempre ha sido un país donde el concreto es el principal material para la construcción, aunque en lugar de organizar y realizar los estudios acerca del comportamiento y características del concreto, se ha optado por el estudio, adaptación y utilización de esta norma originaria de los Estados Unidos de América.

En Guatemala se ha optado por la utilización y adaptación de las normas AASHTO LRFD, estas son estadounidenses que regulan la construcción de puentes. Estas normas son el resultado de estudios científicos, en los cuales se involucraron varias ciencias no solo la ingeniería. A pesar de que nadie duda de los resultados de estas, no se puede olvidar que estas fueron creadas para una geografía distinta a la de la República de Guatemala.

En el campo de la ingeniería civil y estructural se hizo el intento de crear una normativa de métodos constructivos con el objetivo de disminuir los errores de construcción y tener edificaciones duraderas, seguras y que cumplieran con parámetros con altos estándares de seguridad. Este trabajo estaba siendo llevado a cabo por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), pero a pesar de todo el trabajo, esfuerzo y publicaciones no lograron formalizar o hacer de carácter obligatorio esta normativa. Estas llamadas normas son de carácter opcional al momento de diseñar estructuras. Por esa razón son consideradas como sugerencias y no como una normativa.

A pesar de esto en la República de Guatemala se cuenta con la presencia de la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). Esta es la entidad responsable del estudio de los procesos de calidad no solo en procesos constructivos, también supervisa y rige algunos procesos de producción. Siempre buscando la creación de normas para procesos nuevos o la actualización y optimización de procesos ya establecidos. Aunque, existe una carencia de normas en el ámbito constructivo directamente.

2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA MEDIR EL DETERIORO EN PUENTES

2.1. Evaluación no destructiva

La evaluación no destructiva: se define como el conjunto de todos aquellos procedimientos que buscan determinar el estado de un elemento estructural después de un periodo en el cual soportó cargas externas y el efecto de agentes nocivos externos.

2.1.1. Ventajas de la evaluación no destructiva

En base a la definición anterior se puede determinar que los elementos estructurales se deterioran con el paso del tiempo, y en el peor de los casos estos sufren daños significativos. Estos daños en las estructuras y puentes regularmente se presentan como fisuras o grietas. Los ensayos no destructivos tienen como finalidad detectar las fisuras o grietas que puedan tener cualquier elemento estructural o puente.

Al referirse a ensayos no destructivos, no solo se habla de la detección de fisuras o grietas, porque estos buscan profundizar más en el tema. Los ensayos no destructivos también buscan orientar a los profesionales de la ingeniería en el entendimiento de cómo se está comportando la estructura, logrando que se pueda hacer un análisis estructural veraz, objetivo y científico de la misma. Por lo que es necesario tomar en consideración lo siguiente:

- Las características respectivas y propias de la fisura o grieta (ubicación y tamaño).
- Las cargas a las que el elemento estructural o puente está siendo sometido, así como, sus respectivas condiciones.

Una vez tomado en cuenta lo anterior y habiendo realizado los análisis estructurales se puede combinar con las evaluaciones de los ensayos no destructivos para iniciar el diseño y planificación de programas de mantenimiento o corrección de los elementos estructurales o puente bajo análisis; siempre buscando un resultado eficiente, óptimo y que reduzca los tiempos y costos de operación.

Otro punto importante es hacer la aclaración que la evaluación no destructiva (END) y la inspección no destructiva (IND) no son lo mismo. Estas trabajan de manera similar pero sus funciones son diferentes. La inspección no destructiva no es más que la primera etapa de los ensayos no destructivos; se puede tomar como la primera etapa en este tipo de procedimiento. En esta etapa el profesional de la ingeniería se forma un criterio, con el que se guiará para escoger el ensayo no destructivo correcto. En esta etapa no se puede determinar la cantidad de trabajo que se deberá realizar.

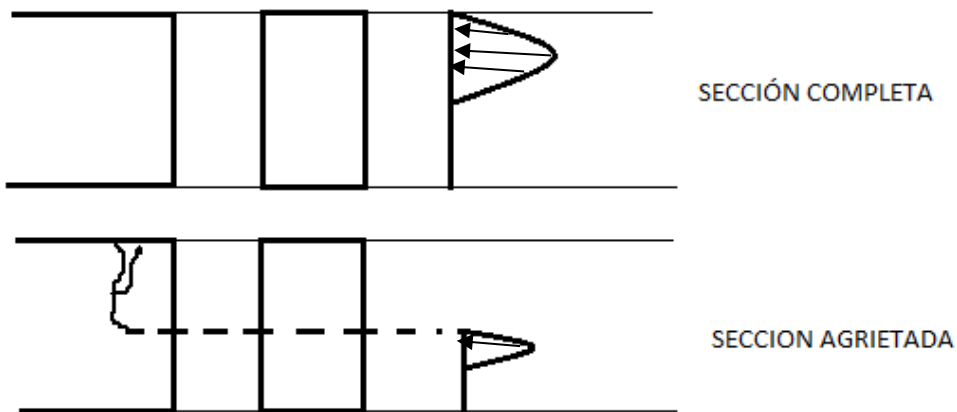
La segunda etapa corresponde a la evaluación no destructiva. En esta etapa ya se realiza el procedimiento adecuado de acuerdo con el análisis de la inspección no destructiva (IND). Para realizar ensayos no destructivos no existen condiciones ideales o predeterminadas, porque, estos se pueden efectuar en cualquier momento, debido a que la integridad de los elementos estructurales no es afectada durante el proceso.

Una vez finalizado el procedimiento y recaudada la información, se procede a realizar el respectivo análisis con el cual se determina si se necesitan medidas correctivas en el elemento estudiado. Se debe recalcar la importancia del análisis estructural, porque de no ser veraz este solo aumentara el precio del mantenimiento y/o reparación del elemento estructural o puente en cuestión.

2.1.2. Aspectos por considerar

Los ensayos no destructivos permiten, a los profesionales de la ingeniería, detectar todo tipo de grieta que se puede generar en un elemento estructural, sin importar el tamaño. Se debe de tener claridad que el éxito no está en base al tamaño de la grieta, sino en identificar y someter a estudio cada una de estas. Esto quiere decir que no se debe buscar la grieta más pequeña que pueda generarse en el elemento estructural, sino que, detectar todas las grietas sin obviar ninguna con las respectivas consecuencias que cada una de estas pueda ocasionar.

Figura 5. Diagramas en secciones transversales de vigas



Fuente: elaboración propia, empleando Clip Studio Paint 2018.

Todo esto dependerá de la técnica o el tipo de inspección utilizada. Siguiendo esta línea de pensamiento se estará creando una metodología de trabajo que permita evitar errores. Entonces se puede decir que el éxito radica en escoger la técnica correcta. Pero surge la siguiente pregunta, ¿cómo se puede determinar cuál es la técnica correcta para cada caso? Es donde el profesional de la ingeniería deberá ser analítico y considerar distintos factores. Estos factores se dividen en cuatro.

2.1.2.1. Factores geométricos

Estos factores, como lo explica el mismo nombre, son aquellos que se basan o dependen de la forma geométrica que tenga el elemento estructural, y también el tamaño de este, y se debe considerar la ubicación de cualquier falla.

La ubicación de la grieta es un aspecto fundamental, porque dependiendo de esta se puede seleccionar la técnica correcta. Por ejemplo, la inspección no destructiva podría ser muy efectiva si la grieta fuera superficial.

2.1.2.2. Factores humanos

Siempre se debe estar conscientes, y aceptar, que los operarios o aquellas personas que realicen el ensayo o inspección tendrán un grado de inexactitud. A este factor se le llama factor humano, y no se puede evitar, siempre estará presente en cualquier procedimiento que se realice en cualquier obra civil, pero se puede reducir a tal punto que este no impacte de manera significativa los resultados.

Esto se puede lograr garantizando un estado mental idóneo en el inspector, técnico u operario. Se debe poder garantizar que la persona a cargo de realizar el ensayo tenga una actitud y aptitud mental idónea. Por idónea se refiere a que el estado de ánimo de esta persona no esté siendo afectado por nada, que no presente síntomas de cansancio o fatiga y que su salud no esté siendo afectada por ningún tipo de enfermedad.

La capacitación y la experiencia son factores que ayudan al éxito de la inspección; debido a que en ocasiones pueden llegar a formular teorías o expectativas de lo que pueden encontrar, creando una tendencia ya sea positiva o negativa para el trabajo.

Mediante estudios estadísticos se ha podido determinar que la continua aplicación y realización de un método en específico afecta el criterio del inspector. Debido a que este crea una especie de rutina, y hace que este se enfoque en un tipo de grieta específica; ignorando los demás tipos de grieta que se podrán producir en un elemento estructural. Esto se debe a que la rutina produce aburrimiento en el inspector a cargo del ensayo (END), y en consecuencia la atención de este disminuye cuando este realice el procedimiento.

2.1.2.3. Factores ambientales

En la ingeniería civil las condiciones climáticas y el medio ambiente siempre son factores y variables que deben ser considerados. Estos factores y variables son: las lluvias, el viento, la humedad, sonidos altos (ruido), accesibilidad y la temperatura ambiente. El estudio de estos factores es amplio y conocido, debido a que afectan a toda obra civil. Por esa razón es que estos factores siempre deben ser considerados de manera fundamental. Estos afectan no solo a los elementos estructurales y puentes, sino también, afectan al inspector y a su equipo. Por lo que en la realización de ensayos no destructivos deberán ser tomados en cuenta de manera especial por la importancia que tienen en este tipo de estudios técnicos-científicos.

2.1.2.4. Factores técnicos

Estos factores son todos aquellos que la responsabilidad es directamente del inspector. Los factores técnicos comprenden lo relacionado con la selección adecuada de la técnica a utilizar, el equipo necesario (estado, mantenimiento y calibración), y que la técnica seleccionada se realice de la manera correcta.

Para facilitar el entendimiento de estos factores, se decidió que se dividan en dos etapas. La primera etapa comprende la selección de la técnica y la revisión y calibración del equipo necesario; y la segunda etapa es la de la metodología (realizar el procedimiento correctamente).

2.2. Efectividad de la evaluación no destructiva

En la ingeniería civil es indispensable demostrar que todos los procedimientos y cálculos realizados sean correctos, con el fin de darle seguridad y certeza a los clientes. Es importante tener parámetros que permitan medir y demostrar la efectividad de los procedimientos. En el caso de los ensayos no destructivos (END), los parámetros que se utilizan son la sensibilidad y la confiabilidad de la técnica.

La sensibilidad es un parámetro que se basa y enfoca en el tamaño de la fisura o grieta, enfocándose en la grieta más pequeña que el método pueda detectar. Mientras que la confiabilidad de la técnica busca detectar las fisuras o grietas. Este aspecto se enfoca en la certeza del método que permita identificar y localizar todas las fisuras o grietas, sus tamaños y formas.

Las definiciones y descripciones anteriores se definieron de manera lógica y razonable, aunque la ingeniería es una profesión donde se debe de presentar todo lo realizado de forma cuantitativa. Es por eso por lo que se debe de realizar mediciones cuantitativas, con la finalidad de tomar en cuenta todos los factores (todos aquellos que se mencionaron previamente), que si afectan el resultado. Estas mediciones dan respaldo a los parámetros mencionados.

2.3. Técnicas para los ensayos no destructivos

Antes de realizar cualquier obra civil se procede a realizar ensayos en los materiales para determinar su estado y su calidad. Esto también se realiza en las estructuras, es precisamente en ese caso donde se utilizan los ensayos no destructivos.

El objetivo principal de la evaluación no destructiva es identificar todo lo que son defectos, irregularidades, discontinuidades o incluso imperfecciones en su interior y exterior. Dando la ventaja de que estos no alteran en ningún modo las características del elemento analizado. Realizando estos procedimientos se recolecta información que permite realizar un diagnóstico y análisis del elemento y/o estructura.

El avance de la tecnología ha favorecido a todas las ciencias y especialidades, incluyendo por supuesto a la ingeniería civil, permitiendo una variedad de métodos y técnicas que se pueden implementar para la realización de ensayos no destructivos. Por ejemplo, en la actualidad se pueden utilizar los avances tecnológicos en rayos X, ultrasonido, campo magnético, termografía, o bien, emisiones acústicas como métodos de ensayos no destructivos. Debido al amplio catálogo de ensayos que se pueden realizar es necesario fijar metas o algunos parámetros, que faciliten la selección del método más apropiado que se debe utilizar.

2.3.1. Clasificaciones

Existen varias clasificaciones que se pueden implementar, pero se puede reducir la selección a dos grupos; estos grupos son:

- Forma de la fisura o grieta
- Ubicación de la fisura o grieta

Cuando el enfoque se dirige hacia el grupo de la forma de la fisura o grieta se debe tomar en cuenta todos los aspectos de esta. Se debe de analizar las tres dimensiones de la fisura o grieta (largo, alto y ancho). En la tabla II se presenta la clasificación de los métodos de ensayos disponibles en la actualidad.

Tabla II. **Clasificación de los métodos de ensayo disponibles**

Información requerida	Métodos disponibles
Comportamiento en servicio, o hasta casi-rotura de un elemento estructural	<ul style="list-style-type: none"> ● Prueba de carga, con medición de flechas y niveles tensionales del hormigón y armaduras.
Resistencia del hormigón	<ul style="list-style-type: none"> ● Testigos ● Esclerómetro ● Ultrasonidos ● <i>Pull-off</i> y <i>Break-off</i> ● Resistencia a la penetración
Propagación de la fisuración	<ul style="list-style-type: none"> ● Ultrasonidos ● Emisión acústica
Coqueras internas y efectividad del proceso de compactación	<ul style="list-style-type: none"> ● Radiografías ● Testigos ● Ultrasonidos ● Técnicas de impulso-eco
Densidad	<ul style="list-style-type: none"> ● Radiometría
Permeabilidad	<ul style="list-style-type: none"> ● Ensayos de absorción ● Ensayos de flujo ● Ensayos de capilaridad
Contenido de humedad	<ul style="list-style-type: none"> ● Métodos nucleares ● Resistividad eléctrica ● Absorción de microondas
Contenido de cemento	<ul style="list-style-type: none"> ● Análisis químico ● Métodos nucleare
Propiedad de la mezcla y de sus constituyentes	<ul style="list-style-type: none"> ● Análisis químico ● Métodos micrométricos

Continuación de la tabla II.

Detección de armaduras	<ul style="list-style-type: none">● Métodos magnéticos● Radiografías (rayos x)● Radiografías (rayos y)
Grado de deterioro del hormigón	<ul style="list-style-type: none">● Análisis químico● Ultrasonidos● Métodos micrométricos
Resistencia a la abrasión y grado de solidez	<ul style="list-style-type: none">● Esclerómetro● Métodos físicos● Termografía por infrarrojos

Fuente: HOSTALET ALBA, Francisco. *Situación actual de las técnicas de ensayo no destructivo del hormigón*. p. 21.

Los ensayos no destructivos que se pueden utilizar enfocados en la forma de la fisura o grieta son:

- Inspección visual
- Líquidos penetrantes
- Campo magnético
- Ultrasonido
- Radiografía
- Tomografía computarizada por rayos X
- Termografía
- Emisión acústica

Mientras que el enfoque de la ubicación de la grieta enfoca la atención en los defectos superficiales, interiores o globales. Las técnicas que se utilizan para la evaluación superficial e interior buscan evaluar los elementos individuales, por lo general detectando discontinuidades en la superficie o en el interior. Regularmente se utiliza: la inspección visual, líquidos penetrantes y corrientes parásitas.

Las técnicas utilizadas para la ubicación global son un poco más completas, estas estudian la condición del sistema completo. Inicialmente estas técnicas no se utilizaban en estructuras, pero debido a su efectividad se empezaron a utilizar en elementos estructurales y, lo más importante, en puentes. Los ensayos que se utilizan con frecuencia son emisiones acústicas y detección de fugas.

2.3.2. Alcances

Los ensayos no destructivos son utilizados como una herramienta que permite a los profesionales de la ingeniería verificar y estudiar los elementos estructurales, con el fin de asegurar que estén libres de daños y determinar si la vida útil de estos no ha sido afectada.

Estas herramientas no han sido utilizadas únicamente para esto, porque, la aplicación de ensayos no destructivos es basta y muy amplia. Estos ensayos pueden ser utilizados para detectar defectos (por ejemplo, fugas y deterioro), determinar las características de la microestructura, determinación de esfuerzos y evaluar la respuesta dinámica.

2.3.3. Criterios para seleccionar el ensayo no destructivo

Antes de iniciar a tomar decisiones o iniciar labores es necesario determinar que ensayo es el apropiado para la situación que se presenta, y al mismo tiempo el más eficiente, que mantenga los costos de operación lo más bajo posible. Por lo que antes de tomar una decisión el profesional de la ingeniería civil debe conocer y analizar los siguientes factores:

- La ubicación de las posibles fisuras o grietas
- La magnitud de las fisuras o grietas
- La forma y dimensiones de los elementos por ensayar
- Los materiales que conforman el elemento o estructura

En algunas ocasiones es necesario utilizar dos diferentes ensayos, incluso es posible llegar a necesitar y utilizar tres diferentes tipos de ensayos no destructivos. Esto se suele hacer cuando por alguna razón se necesita realizar el proceso de manera ágil, es decir, obtener resultados rápidamente por la presencia de un riesgo inminente. También puede ser cuando se detecten algunas fisuras o fallas que requieran de un método más sensible. Es necesario recalcar que cuando esto sucede no se debe obviar o dar más importancia al resultado de un ensayo, se debe de tomar en cuenta los resultados de todos los ensayos porque estos se complementan.

Tomando en cuenta todo lo anterior se debe enfatizar en la importancia del análisis y planificación que deben de realizar los profesionales de la ingeniería civil, al evaluar los resultados arrojados por los estudios realizados a través de los ensayos no destructivos sobre elementos o cuerpos estructurales; porque en una obra constructiva se deben utilizar los conocimientos que se obtienen de cada uno de los ensayos no destructivos conocidos para crear un criterio que lleve a una solución rápida, eficaz, eficiente y económica.

2.3.4. Capacitación, calificación y certificación

Como todo proceso, en la ingeniería civil, es necesario contar con mano de obra calificada y capaz de desarrollar estos ensayos; técnicos altamente calificados. Y debido a que los conocimientos para formular un análisis estructural, formular soluciones y planificar las acciones que deben aplicarse son responsabilidad del profesional de la ingeniería, los datos de los ensayos deben ser altamente confiables, llevados a cabo por técnicos capacitados y calificados, para evitar errores que después sean imputables al ingeniero civil.

Esta es una razón fundamental para que dichos profesionales, los ingenieros civiles, también tengan la responsabilidad de conocer y capacitarse en las técnicas y procesos científicos para realizar los ensayos no destructivos.

La capacitación continua es importante para la realización de los ensayos no destructivos, por ser procedimientos que se asemejan a procedimientos que se realizan en un laboratorio. Por lo tanto, en el campo de la ingeniería, especialmente la estructural, la realización y actualización de normativas y/o manuales debe de ser una prioridad, porque estos establecen procedimientos, parámetros y algunos criterios que garantizan el éxito de los procedimientos y soluciones estructurales.

Los conceptos de capacitación, certificación y calificación son complementarios entre ellos. No es posible tener mano de obra que este certificada si esta no ha sido capacitada ni calificada. Para que se pueda dar una certificación es necesario seguir el procedimiento de capacitación y calificación. Este procedimiento aumenta el valor económico en los costos, pero nunca se debe de sacrificar la calidad y seguridad por la economía.

Es necesario conocer el procedimiento de la capacitación, calificación y certificación. Entender estos conceptos es importante y permite a los profesionales de la ingeniería seleccionar su mano de obra correctamente. Por lo que se realizará una breve descripción, de estos conceptos, para facilitar el entendimiento de estos.

La capacitación se puede definir como un curso programado y estructurado de tal manera que se imparta la teoría necesaria para que un individuo pueda realizar ciertas actividades. Una capacitación puede ser impartida por personas individuales o academias, el único requisito indispensable es que la personas o grupo de personas que imparten la capacitación conozcan el tema y estén capacitados y certificados por alguna entidad o institución.

La calificación es la culminación de la capacitación. Es en esta etapa en donde la persona o personas capacitadas demuestran que los conocimientos impartidos fueron aprendidos, y que posee las habilidades necesarias para el desarrollo correcto de las actividades, en ese caso ensayos o evaluaciones no destructivas. Regularmente se hace por medio de evaluaciones o exámenes. Es necesario que quienes imparten la capacitación, y los evaluadores, si son diferentes, estén calificados y certificados por una entidad o institución.

La certificación es el documento que se le entrega a la persona que aprobó la calificación. Ampliando un poco el concepto, la certificación es el documento que demuestra y acredita que el individuo fue capacitado y calificado en este caso para realizar ensayos no destructivos. La certificación debe ser extendida por una empresa, entidad o institución que demuestre capacidad y conocimiento en los temas impartidos, pero además que esté debidamente acreditada para el efecto.

3. NORMAS COGUANOR

3.1. ¿Qué es COGUANOR?

COGUANOR de conformidad con lo que se establece en el Artículo 1 del Decreto No. 1523 del Congreso de la República, es el Organismo Nacional de Normalización, el cual está ligado al Ministerio de Economía. COGUANOR es un acrónimo para Comisión Guatemalteca de Normas, y tiene como función desarrollar actividades de normalización que contribuyan a mejorar la competitividad de todas las empresas nacionales, buscando elevar la calidad de los productos, servicios y procesos que estas ofrecen en el mercado nacional e internacional.

3.2. Estructura y funciones

La Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) como toda institución tiene una estructura interna que distribuye las distintas labores a los departamentos correspondientes para que estos puedan desarrollar sus funciones y así poder cumplir con sus responsabilidades y obligaciones. Conocer la estructura y funciones de la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) permitirá familiarizarse con sus procesos, y como estos se desarrollan.

3.2.1. Estructura

La Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR), está integrada por una Secretaria Ejecutiva y una Unidad Técnica. La Comisión Guatemalteca de Normas es dirigida por el Consejo Nacional de Normalización, este consejo se integra por un representante titular y suplente de las entidades siguientes:

- Cámara de Industria de Guatemala
- Cámara de Comercio de Guatemala
- Cámara Guatemalteca de la Construcción
- Cámara del Agro
- Asociación Gremial de Exportadores de Productos no Tradicionales
- Foro de Receptores de las Universidades de Guatemala
- Asamblea de presidentes de los Colegios Profesionales
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social
- Ministerio de Energía y Minas
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

3.2.2. Funciones

En el Decreto 78-2005 del Congreso de la República se pueden encontrar detalladamente todas las funciones de la Comisión Guatemalteca de Normas -COGUANOR-. A continuación, se presentan las más relevantes para los propósitos del presente, estas funciones son:

Elaborar, adoptar y promover la utilización de normas técnicas en el territorio nacional, elaborar y promover la aplicación del programa anual de normalización, acorde a los requerimientos del sector productivo nacional, fomentar la transparencia, armonización y eficacia en la elaboración de las normas, revisar las normas en uso e introducir las modificaciones necesarias a medida que la experiencia, el progreso científico y tecnológico y el mercado nacional e internacional exijan, asegurar que en el proceso de elaboración de los reglamentos técnicos se utilicen las normas técnicas nacionales, regionales o internacionales¹.

3.3. Aspectos generales de la normalización

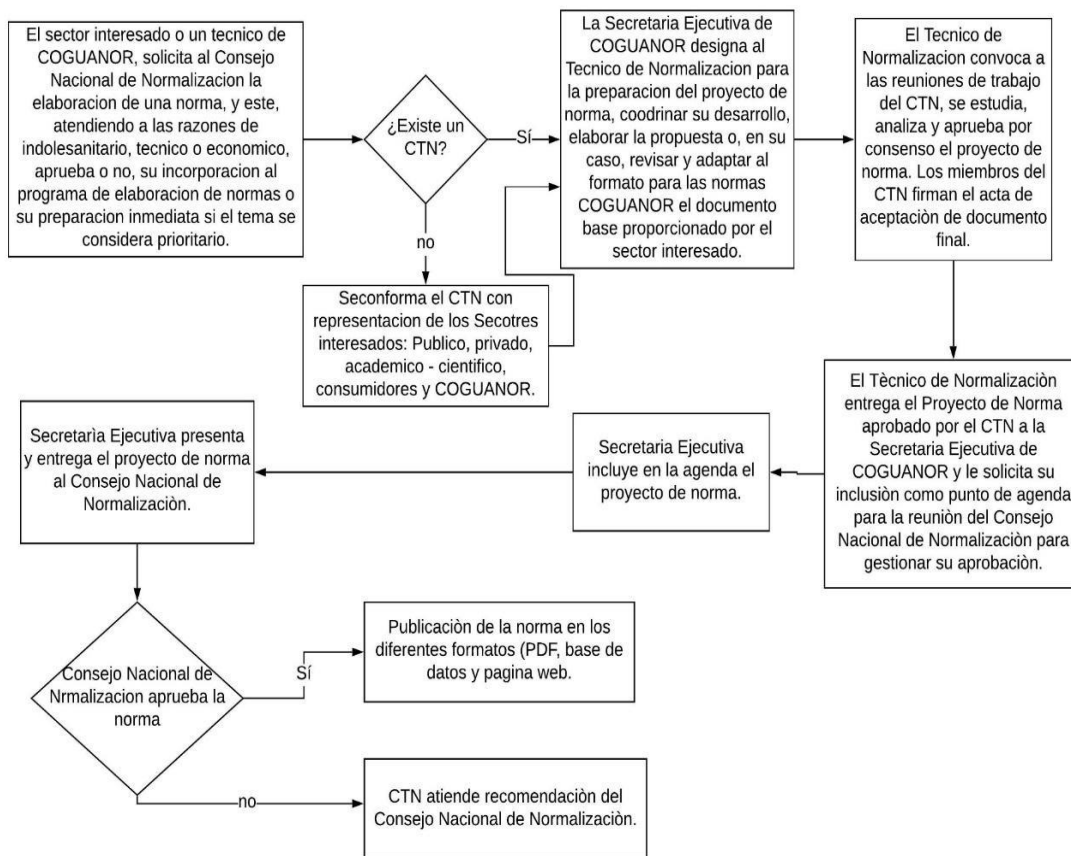
La normalización no es un proceso que se pueda realizar de manera inmediata y sin fundamentos sin un respaldo válido. La Comisión Guatemalteca de Normas -COGUANOR-, tiene establecidos procedimientos, requisitos a cumplir, objetivos y fortalezas. Los aspectos anteriores le dan validez a la normalización y permiten identificar la importancia de la normalización y como esta ayuda en los distintos sectores comerciales.

3.3.1. Proceso de elaboración de Normas Técnicas Guatemaltecas

En la creación, adaptación o validación de una norma se debe de seguir un proceso, y la Comisión de Normas Guatemaltecas estará a cargo. El procedimiento de una iniciativa de norma se describe en el siguiente diagrama.

¹Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). *Funciones de COGUANOR*. www.coguanor.gob.gt/index.php?id=23. Consulta: febrero de 2020

Figura 6. **Proceso para la creación de normas**



Fuente: elaboración propia.

3.3.2. **Requisitos generales de la normalización**

El proceso de normalización es serio y se necesita cumplir con varios requisitos, los cuales garantizan que el proceso de normalización sea transparente. Los requisitos por cumplir en COGUANOR son:

- Es necesario que en la elaboración debe de haber participación de los sectores interesados (productores, consumidores, de control y vigilancia, académico y científico).

- Siempre se debe de buscar el beneficio de la sociedad.
- Es recomendable que la norma sea aprobada por la aprobación mayoritaria de todos los que participen.
- El proceso de normalización debe estar a cargo de Organismos de Normalización que estén reconocidos tanto a nivel regional como a nivel nacional e internacional.

Todos los interesados deben de tener acceso total y libre a las normas que se elaboren.

3.3.3. Objetivos de la normalización

Cuando se busca normalizar un procedimiento o elaboración de un producto se busca adaptar y garantizar tres aspectos esenciales, estos aspectos son competitividad, universalidad y seguridad.

Cuando se habla de competitividad se refiere a establecer parámetros o requisitos mínimos que se deben cumplir para garantizar la calidad o efectividad de estos. Logrando esto no solo se está creando un producto de calidad, sino que se está creando un producto que puede ser utilizado a nivel nacional. Incluso este podría llegar a ser introducido en el mercado internacional.

Debido que en un proceso de producción todos están sujetos a la normativa, es ahí donde entra la universalidad. Para este aspecto la normalización busca recopilar toda la información necesaria y traducirla a un lenguaje que pueda ser entendido e interpretado por todos aquellos involucrados e interesados.

Por último, se tiene el aspecto más importante que es la seguridad. Esta debe de garantizarse a todos aquellos involucrados, tanto en el proceso de producción como al cliente final. En la ingeniería civil todos los productos y procesos constructivos son realizados para satisfacer las necesidades del cliente, y al regirse por normas se le está asegurando a este, que el proyecto es seguro y que puede ser utilizado sin riesgo alguno.

3.3.4. Fortalezas de la normalización

Al momento de normalizar un proceso se mejora y optimiza los parámetros de eficiencia. Esto permite que se alcance la calidad óptima en periodos más cortos. Las fortalezas pueden considerarse uno de los aspectos más notables que hay en la normalización, pero la Comisión Guatemalteca de Normas busca más que eso.

Cuando se hace un análisis más profundo de la normalización se puede ver que esta crea oportunidades de debate en temas técnicos de todas las áreas, y les da la oportunidad a todos los interesados en participar. Esta no discrimina ningún grupo o clase social, todos aquellos interesados o con conocimientos pueden participar; lo que genera ambientes sanos en los que se pueden compartir experiencias y conocimientos buscando el mejoramiento del área de interés o en discusión.

La actualización es una fortaleza que se debe considerar, porque es necesario hacer revisiones periódicas a las normas o normativos vigentes. Estas se deben de hacer siempre que sea necesario, no puede existir un límite en las revisiones. Debido a que la tecnología y procesos evoluciona constantemente, se entiende que las normas deben evolucionar junto a estos, tratando de mantener un catálogo de métodos lo suficientemente amplio para que el conocimiento se pueda transferir de manera sencilla y mantener a todas las partes interesadas bien atendidas.

3.3.5. Tipos de normas

La Comisión Guatemalteca de Normas no se interesa por una sola rama de la producción al momento de normalizar productos o servicios. Las normas que sean consideradas por la Comisión Guatemalteca de Normas puede pertenecer a cualquier rama de productos o servicios.

Todas las normas son diferentes. Estas pueden ser diferentes en varios aspectos como términos utilizados (nomenclatura o variables que se utilizan), proceso de fabricación y como estos se ponen a prueba o los ensayos que se practican en el producto final. Tomando en cuenta lo anterior, se pueden describir los tipos normas de la siguiente manera:

- Aquellas que proporcionan conceptos o pura información teórica. Estas se les denomina normas conceptuales o de terminología. No mencionan procesos de producción o calidad.
- Aquellas que indican los aspectos que debe de cumplir un producto para garantizar la calidad de este. A estas se les denomina normas de servicio.

- Aquellas que indican cuales son los pasos específicos a seguir, para garantizar el éxito del ensayo o procedimiento. A estas se les denomina normas para métodos de ensayo.

3.4. Importancia de la normalización

Para que Guatemala tenga un crecimiento económico constante es necesario que las empresas compitan no solo en el mercado nacional, sino también en el internacional. Se puede observar que en las negociaciones comerciales o de producción internacionales están normalizadas, esto con el propósito de evitar que se fabriquen productos o se lleven a cabo procedimientos que no garanticen la calidad buscada.

También se busca que todas las empresas compitan bajo las mismas condiciones. Con base en la información anterior se puede establecer, porqué la normalización es importante en todos los niveles.

3.4.1. A nivel general

La normalización da seguridad de que los productos son de alta calidad o que los productos que garantizan un servicio seguro. Esto permite a las empresas competir a nivel internacional; lo que es favorable no solo para las empresas que venden producto o prestan servicios, sino también beneficia a la economía nacional. Al mejorar la economía nacional se podrá favorecer a los mercados nacionales y se reducen los costos por transacciones.

Se puede observar que la normalización puede tener un efecto domino muy positivo, debido a que al usar la normalización para mejorar los productos, servicios o procedimientos se puede ayudar a mejorar la economía guatemalteca. Sin mencionar que la normalización permitiría conocer mejor los mercados y poder estudiar cómo estos cambian y las respectivas tendencias que ocurre en cada uno.

3.4.2. Para el fabricante o proveedor

Para los proveedores de servicios o fabricantes de productos la normalización les da herramientas y conocimientos para proporcionar sus servicios de manera más eficientes, esto debido a que con la normalización los procesos optimizan la materia y reduce los desperdicios que estos puedan generar, sin mencionar que reduce los costos administrativos y aumenta la productividad, esta indica los pasos a seguir en las actividades industriales evitando el famoso prueba y error.

A su vez, la normalización da el beneficio de dar credibilidad y cierto prestigio a los fabricantes o proveedores que se rigen por esta. Dando como consecuencia, una mejor competitividad y abre las puertas de los mercados tanto nacionales como internacionales, y la posibilidad de ampliar su catálogo.

3.4.3. Para el consumidor

La normalización les da a los consumidores regulares la seguridad de que están obteniendo un producto o servicio de calidad e intercambiabilidad. Lo que es importante porque lo que busca la normalización son productos que satisfagan sus necesidades sin afectar su salud o economía.

Esto cambia para los profesionales de la ingeniería que buscan satisfacer las necesidades de su empresa o cumplir con un trabajo dado, sin arriesgar la seguridad de sus empleados o clientes y manteniendo los precios más bajos que les permitan ser competitivos.

3.4.4. Para la investigación y desarrollo

La investigación es una parte importante para el ámbito de la ingeniería. En cualquier rama de la ingeniería la investigación es necesaria para la innovación y optimización de procesos y materiales. La normalización le facilita a la ingeniería a disminuir los costos que la investigación conlleva. Al aplicar la normalización a los procesos de investigación se economizan recursos y tiempo.

La normalización debe de ser promovida y debe de ser solicitada cuando se esté realizando cualquier investigación, porque esta es una herramienta y no un obstáculo, como es comúnmente en Guatemala. La normalización y su utilización deben convertirse y ser una cultura en la aplicación de procesos y de métodos constructivos por parte de los cuadros profesionales guatemaltecos.

La normalización permite compartir resultados de ensayos y facilita la innovación y evolución de procesos porque la normalización se adapta y actualiza al mismo tiempo que lo hacen los métodos investigación.

3.4.5. Para la seguridad

Los riesgos y accidentes son fenómenos que se dan en el que hacer de la ingeniería civil, estos se producen en todas las actividades y/o proyectos que realiza un ingeniero civil. Como un beneficio adicional, la normalización ayuda a reducir la cantidad de accidentes y disminuir el riesgo presente y los tiempos muertos en él trabajo.

A su vez, la normalización, también tiene como finalidad crear una relación de confianza entre clientes y proveedores; porque todo producto que asegure que su proceso de producción o trabajo cumple con la normalización tendrá o será sujeto a su respectiva certificación; esta podrá demostrar a los clientes y que estos observen la calidad del producto o servicio ofrecido.

3.5. Comités técnicos

En el territorio guatemalteco se define comité técnico como el conjunto interdisciplinario integrado por representantes de los sectores organizados público, privado, académico-científico y consumidor. Decreto 1523, del Congreso de la República, Ley de Creación de la Comisión Guatemalteca de Normas, 15 de mayo del 1962. Esta definición es la que debe ser utilizada, en todas las entidades e instituciones, en todo el territorio nacional.

El comité técnico es la cimentación de toda normativa, porque este es el encargo de la creación, actualización o supresión de las normativas. Esto debido que las normas, como se ha especificado con anterioridad, son dinámicas y necesitan ser de carácter técnico-científico lo cual solo se logra cuando es sometida a revisión de todos sectores interesados. Un comité técnico es formado con carácter ad-honorem (meramente honorífico), esto quiere decir que los integrantes que lo conforman lo hacen sin retribución alguna.

La estructura de un comité técnico es sencilla, es necesario que cada sector de los previamente mencionados asigne a un representante titular y a un auxiliar o suplente. El Comité Técnico tendrá la obligación de estudiar y analizar todas las propuestas de normas que se le presente.

Pero sus obligaciones no terminan en el estudio y análisis, el comité técnico tiene la obligación de traducir documentos técnicos que sirvan para la revisión o creación de normas; de ser posible, deberá de aportar o compartir información que facilite el estudio o análisis de normas vigentes o nuevas.

Siempre se debe de tener en cuenta que, como una institución, como COGUANOR, que se dedica a fomentar el desarrollo y avances tecnológicos, parte de sus obligaciones es fomentar la cultura de normas; esto significa que los comités técnicos deben ser agentes de la normalización y velar por su cumplimiento, como fomentar su creación y utilización en aquellos procesos regidos por normas o normativos.

Luego de que una norma o normativo sea propuesto y que este sea estudiado por todos los miembros del comité se procederá a la siguiente etapa que es, la comprobación. Esto se hace mediante experimentación, en esta etapa del proceso el comité asignara a un equipo con experiencia en el campo que pueda replicar lo propuesto en la norma. Con el propósito de que estos puedan dar veracidad de la propuesta. Para terminar el proceso se deberá dar una resolución no importando se es positiva o negativa, lo cual se hace por medio de votación.

4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

4.1. Técnicas de evaluación superficial

Las evaluaciones superficiales en puentes o elementos estructurales siempre serán las primeras a considerar del conjunto de evaluaciones no destructivas. Estas consideraciones se deben a que las fallas estructurales siempre presentan síntomas antes de ocurrir; estos síntomas regularmente pueden ser identificados a simple vista por el ojo humano. También se deben tomar en cuenta algunos aspectos para la toma de decisiones, en relación con que estas evaluaciones sean, en el orden, las que se apliquen como medida primaria para la prevención o corrección de posibles daños causados por fallas en elementos estructurales; estos aspectos son:

- Bajo costo
- Tiempo reducido para ejecución
- Sencillez para su aplicación
- Amplio campo para su aplicación

En muchas ocasiones las técnicas de inspección visual son subestimadas y obviadas debido a la simplicidad de estas y que no se tiene un procedimiento o protocolo establecido que se deba de seguir; sin embargo, estas son fundamentales para todo proceso de inspección debido a que los resultados de estas evaluaciones arrojan datos y resultados, que sirven como justificación para realizar otro tipo de ensayos en fallas localizadas en puentes y otros elementos estructurales.

4.1.1. Evaluación visual

La inspección visual es la técnica más antigua y utilizada en el conjunto de los ensayos no destructivos. Este simplemente es el proceso en el que se evalúan o examinan elementos y sistemas estructurales, utilizando únicamente el sentido de la visión, en estos también se utilizan artefactos que magnifiquen la capacidad de visión del inspector; y este debe de tener conocimiento de las características y propiedades del material que conforma el elemento.

La inspección visual permite a los profesionales de la ingeniería o inspectores detectar hasta el 80 % de las fisuras o grietas; estas evaluaciones se pueden dividir en dos grupos los cuales son: directas e indirectas. Las evaluaciones visuales directas son aquellas que se efectúan en el lugar, utilizando, o no, herramientas como lo son telescopios, microscopios, video en tiempo real, entre otros, mientras que en las evaluaciones visuales indirectas se utilizan imágenes, fotografías o videograbaciones para que se pueda realizar la inspección y el análisis posteriormente.

Como se mencionó anteriormente la evaluación visual es el método más sencillo, económico y acelerado para recabar información que permita analizar el elemento o sistema estructural, sin embargo, si se desea efectuar una evaluación más precisa y recabar la mayor cantidad de información posible, se deben de cumplir estas condiciones:

- Poder observar. Se refiere a que todas las partes del elemento o sistema estructural, debe tener la posibilidad absoluta de ser observado.
- Conocimientos para interpretar. Esto significa que el inspector está capacitado y posee la experiencia necesaria para interpretar lo que ha llegado a observar en la evaluación.

- Saber lo que busca. Esto quiere decir que se debe de conocer el historial de incidentes y el diseño de los elemento o sistemas estructurales con el objetivo de conocer las zonas o áreas de mayor sensibilidad de estos.

Como se mencionó con anterioridad en las evaluaciones visuales se pueden utilizar herramientas o instrumentación que ayuden al inspector a detectar fisuras o grietas. Estas herramientas o instrumentos se pueden clasificar en cuatro conjuntos: sistemas de iluminación y espejos, dispositivos de magnificación, sensores de imagen (equipos de fotografía y videograbación) y endoscopios; actualmente se pueden utilizar drones para inspeccionar aquellas áreas difíciles de alcanzar.

Figura 7. **Dispositivos de magnificación para evaluaciones visuales**



Fuente: VARGAS, Antonio. *Inspección visual*.

<https://www.slideshare.net/AntonioVargas40/inspeccion-visual-74058472>. Consulta: febrero de 2020.

Figura 8. Endoscopio



Fuente: MESUREX. *Endoscopio*. <https://www.mesurex.com/productos/endoscopios>. Consulta: febrero de 2020.

4.1.2. Líquidos penetrantes

Este tipo de evaluación superficial es igual se sencillo y practico que las evaluaciones visuales, puede ser utilizado en elementos y sistemas estructurales de diversos materiales; el principio fundamental de este ensayo es la acción capilar, lo que permite que este penetre por fisuras o grietas imperceptibles para el ojo humano.

Como las demás técnicas de evaluación superficial el procedimiento de los líquidos penetrantes es sencillo de realizar; este procedimiento, que consta de seis pasos, se utiliza un líquido de alta humectación con el cual se resaltan las fisuras o grietas que puedan existir en el elemento. Los seis pasos que se deben seguir para la realización de esta evaluación son:

- Limpieza de la superficie. Este es el paso fundamental para el procedimiento. En este se debe garantizar que la superficie en la que se aplicara el líquido penetrante quede libre de contaminantes que puedan impedir que el líquido penetre en las fisuras o grietas. La limpieza puede ser realizada de forma manual o utilizando equipos mecánicos.
- Aplicación del líquido penetrante. La aplicación del líquido puede ser de forma manual (utilizando una brocha), por medio de un rociador o cualquier método que cubra la superficie en su totalidad con abundante líquido.
- Infiltración. Esta etapa se da tiempo al líquido para que penetre en todas las posibles fisuras o grietas; el tiempo promedio que se le deja el líquido es de cinco minutos, se le puede dar más tiempo dependiendo del criterio del examinador.
- Limpieza del líquido penetrante. Esta se debe realizar de manera superficial; y el líquido que haya penetrado no debe de haber secado, si esto pasara el revelador no actuaría y se deberá reiniciar el procedimiento.
- Aplicación del revelador. Este se realiza igual a la etapa número 1, y para que el revelador actúe se le da el mismo tiempo de espera que el líquido penetrante.
- Magnificación. En esta etapa se observa todas las fisuras o grietas encontradas; se debe de tomar en cuenta que la reacción del penetrante-revelador magnifica las fisuras o grietas. Una vez anotada la ubicación de las fisuras o grietas se debe de limpiar por completo el elemento.

Los líquidos penetrantes son un método sencillo de realizar, pero es necesario conocer los diferentes tipos de líquidos penetrantes; la primera clasificación que se puede considerar por el tipo de líquido. Los tipos de líquidos que hay son:

- Fluorescentes. Para este tipo de líquidos es necesario exponerlos a luz ultravioleta (también conocida como luz negra), para poder detectar las fisuras o grietas. En su mayoría, estos líquidos producen una luz verde fluorescente que pueden ser de ultra baja, baja, media, alta y ultra alta sensibilidad.
- No fluorescentes. También conocidos como líquidos visibles, estos permiten detectar las fisuras o grietas con luz blanca y son de color rojo; estos líquidos regularmente son de baja sensibilidad.

Otra forma en la que se pueden clasificar los líquidos penetrantes es en base al método por el cual se remueve o limpia el excedente. En esta clasificación hay cuatro categorías, las cuales son:

- Solubles en agua. Estos líquidos se pueden lavar únicamente con el enjuague de agua; con estos se debe tener cuidado porque en la etapa número cuatro se puede lavar todo el líquido y se pueden obtener resultados poco confiables.
- Líquidos a base de aceite. Para la remoción de estos es necesario usar una emulsión a base de aceite, y actúa únicamente en el excedente que se tiene de líquido penetrante; logrando que este excedente sea soluble en agua facilitando la limpieza y protegiendo el líquido penetrado en las fisuras o grietas.

- Penetrante con base solvente. Este método es similar al método de líquidos solubles en agua, exceptuando que se combina el líquido penetrante con un solvente. Este método se utiliza únicamente para áreas pequeñas o cuando se debe inspeccionar en sitio de operación, debido a que su preparación es tardada y conlleva mucho trabajo.
- Emulsión a base de agua. Este método es similar al método de líquidos a base de aceite, con la excepción de que de que la emulsión se aplica al exceso de líquido que es soluble en agua.

La versatilidad de este método hace que sea de los más utilizados; aunque, la versatilidad no es la única ventaja de este método. Las ventajas que este método proporciona son:

- La capacitación del inspector es rápida
- Son portátiles y versátiles
- Cubren grandes áreas en poco tiempo
- Pueden ser utilizados en gran variedad de materiales
- Son de bajo costo

Este método no se puede considerar perfecto, también tiene ciertas limitaciones que se deben de conocer. Estas limitaciones son:

- En superficies porosas o rugosas se pueden obtener mediciones inciertas o falsas.
- Únicamente pueden detectar fallas superficiales.
- En algunos casos los esfuerzos residuales cierran las grietas evitando la penetración del líquido.
- Se debe de tener un área de trabajo bien ventilada.
- Los factores humanos afectan directamente los resultados.

Figura 9. **Inspección en la base de un puente por medio de líquidos penetrantes**



Fuente: JAMSA Panamá. *Proyectos*. <http://jamsandt.com/proyectos.html>. Consulta: febrero de 2020.

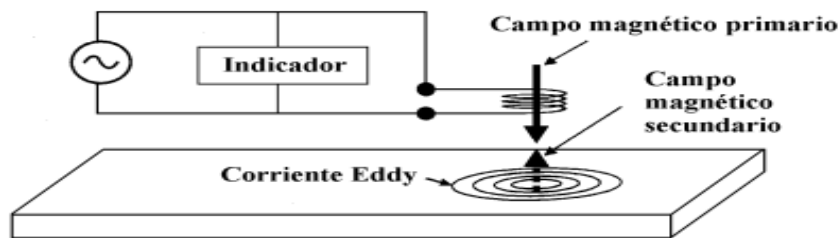
4.1.3. Corrientes parásitas

Este método también recibe el nombre de corrientes inducidas o corrientes de Eddy, y es una técnica de evaluación no destructiva que funciona bajo el principio de la inducción electromagnética; el principio fundamental de este método es la generación de un campo magnético en el elemento, que permita la detección de fisuras o grietas a nivel superficial.

Las corrientes parásitas consisten en la utilización de una bobina externa por la cual pasa una corriente eléctrica alterna, y esta corriente genera un campo magnético. Esta bobina se coloca sobre el elemento estructural (este se

encontrará en dirección perpendicular a la corriente), generando corrientes eléctricas circulares que recorren por la superficie del elemento; estas corrientes crearán un campo magnético que se opondrá al campo generado por la bobina.

Figura 10. **Representación del método de corrientes parásitas**



Fuente: LÓPEZ URRESTA, Darío Rolando. *Diseño y construcción de un instrumento (prototipo) para la medición de parámetros físicos, basado en el principio de corrientes inducidas; para el laboratorio de ensayos no destructivos.* p. 11.

Cualquier fisura o grieta que exista en la superficie del elemento estructural, interrumpirán el paso de las corrientes parásitas, lo que dará como resultado una alteración en el campo magnético de estas corrientes.

Este será el parámetro que se estará midiendo, en la actualidad para medir esto se utiliza el equipo Hocking Phasec 2200; este equipo es la combinación de una bobina con un computador que indica los cambios en el campo magnético de las corrientes parásitas.

Figura 11. **Equipo Hocking Phasec 2200**



Fuente: GP Technical Equipment. *Equipo Hocking Phasec 2200*. <https://gp-technical.com/product/hocking-phasec-2200-eddy-current-flaw-detector/>. Consulta: febrero de 2020.

Este método de evaluación no destructiva tiene las siguientes ventajas:

- No se necesita tener contacto con el elemento para realizar el ensayo
- Proporciona resultados instantáneos
- El equipo es portátil
- No es necesario preparar la superficie del elemento para realizar la evaluación.

En su contraparte se tienen algunas limitaciones que se deben de considerar para este tipo de ensayo, estas son:

- Únicamente se puede realizar en elementos conformados de materiales conductores.
- Se detectan fisuras o grietas con profundidades de hasta 0.5 cm.

- Se debe de tener acceso a la superficie completa del elemento que se desea inspeccionar.
- Se necesita mucho tiempo para evaluar superficies grandes.

4.2. Técnicas de evaluación volumétricas

En el capítulo anterior se demostró la importancia y función de los métodos de evaluación superficial; las cuales ubican y resaltan las fisuras o grietas que se encuentran en la superficie de los elementos estructurales o puentes. En este capítulo se detallará la contraparte de estas, siendo estas las técnicas de evaluación volumétricas; estas técnicas de evaluación tienen como objetivo ubicar y resaltar los defectos que pueda tener el elemento estructural o puente en su interior.

Las técnicas de evaluación volumétricas logran detectar estos defectos internos de manera indirecta; esto se logra cuando se hace fluir energía a través del elemento estructural o puente y midiendo el espectro de respuesta que se denomina energía-defecto. El tipo de energía que se utiliza para estos procedimientos puede ser acústica (ultrasonido), electromagnética (radiografías), mecánica, entre otros. Las técnicas de evaluación más utilizadas en la actualidad son el ultrasonido, la radiografía industrial y acústicas.

4.2.1. Evaluación por ultrasonido

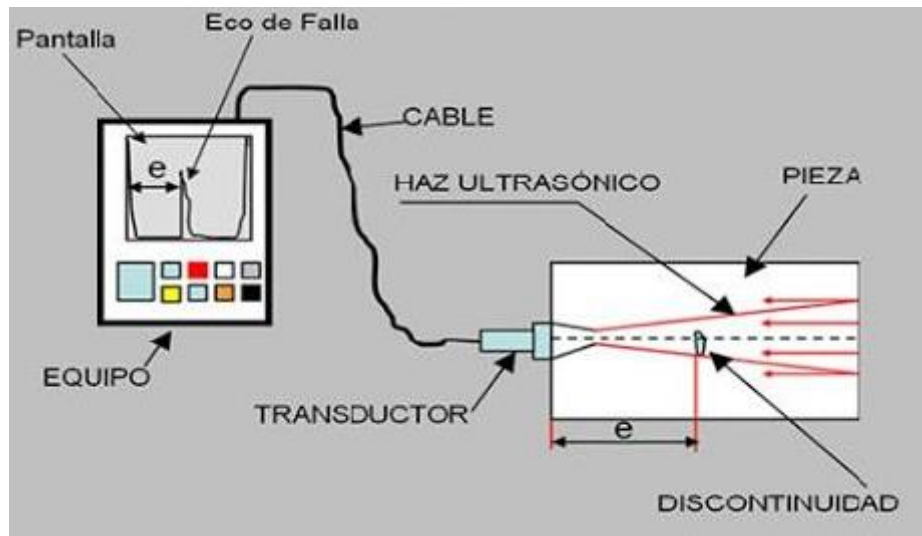
Este tipo de evaluación es considerada la más poderosa de todas en la actualidad, esto debido a que este tipo de evaluación logra proporcionar los valores tanto del tamaño de la falla, como la ubicación exacta de esta.

Otro de los factores que benefician a esta técnica es su procedimiento sencillo y libre de riesgos tanto para el inspector como para el material en el que se está realizando dicho ensayo. Otro motivo por el que este ensayo es uno de los más utilizados, es debido a que las ondas sonoras pueden viajar a través de la mayoría de los materiales que se utilizan en la construcción.

Como el nombre lo dice, este tipo de evaluación usa ondas de ultrasonido para detectar las fisuras o grietas en elementos estructurales o puentes; este ensayo también puede ser utilizado para la detección de fallas en losas de concreto y pavimentos. El principio de este ensayo es la emisión de ondas de ultrasonido de alta frecuencia, el rango de frecuencia que se utiliza oscila entre los 200 kHz a los 25 MHz, en varios puntos del elemento y lo atraviesan, esto se hace por medio de un transductor que convierte la energía acústica en una señal eléctrica.

Este método es totalmente seguro para los inspectores que realizan el ensayo debido al rango de frecuencias que se utilizan, debido a que estas frecuencias son de alta frecuencia e inaudibles para el ser humano. También se debe reconocer que el equipo para su implementación facilita el procedimiento completo.

Figura 12. **Representación del equipo utilizado y la realización de la evaluación por ultrasonido**



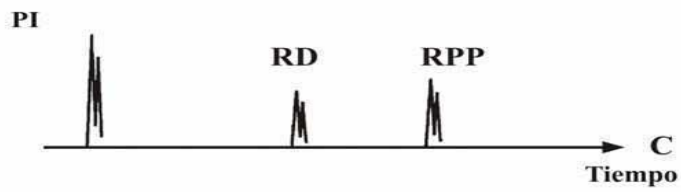
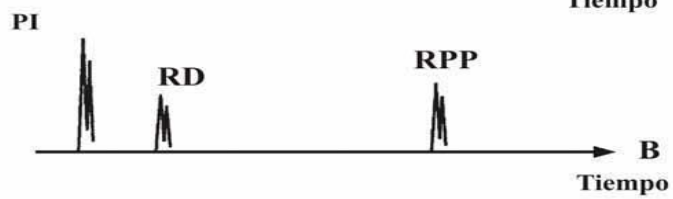
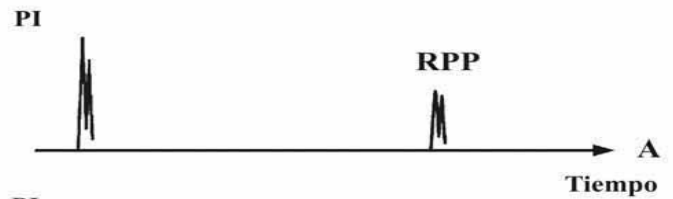
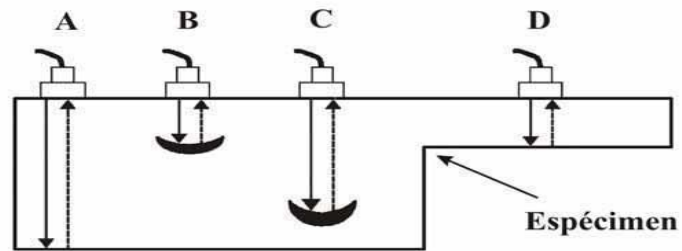
Fuente: REINA, Alexander., SÁNCHEZ, Cristian., RAMÍREZ, José. y HENAO, Natalia. *Ensayos no destructivos IV-UT*. <http://blog.utp.edu.co/metalografia/16-ensayos-no-destructivos-iv-ut/>.

Consulta: marzo de 2020.

En la actualidad los transductores utilizados cuentan con una pantalla en la que se proyecta el espectro de respuesta de las ondas de ultrasonido que se aplican al elemento estructural o puente ensayado; la lectura de este espectro es bastante sencillo, en la pantalla se proyecta la trayectoria de las ondas, la cual es interrumpida por una fisura o grieta; la dirección de la fisura puede identificarse en base al espectro de respuesta, porque una fisura o grieta perpendicular a la dirección de las ondas retronara afectará mayormente a las ondas.

En la figura 13 se demuestra los espectros de respuesta en base a la dirección de la fisura o grieta, con el objetivo de facilitar el entendimiento del tema. Siendo A el ensayo sin ninguna falla encontrada, B el ensayo encontrando una falla paralela a las ondas y C el ensayo encontrando una falla perpendicular a las ondas.

Figura 13. Representación de los espectros de respuesta en base a la dirección de la fisura o grieta encontrada

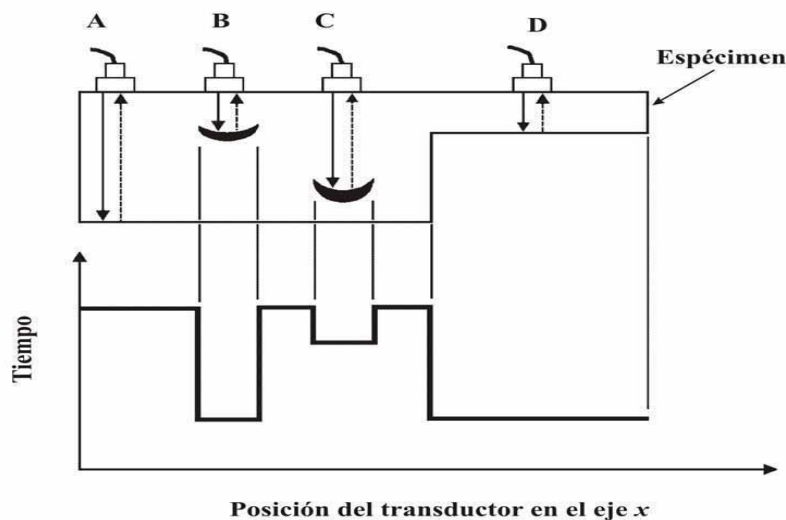


PI = pulso inicial
RD = reflejo por el defecto
RPP = reflejo en parte posterior

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes*. p. 125.

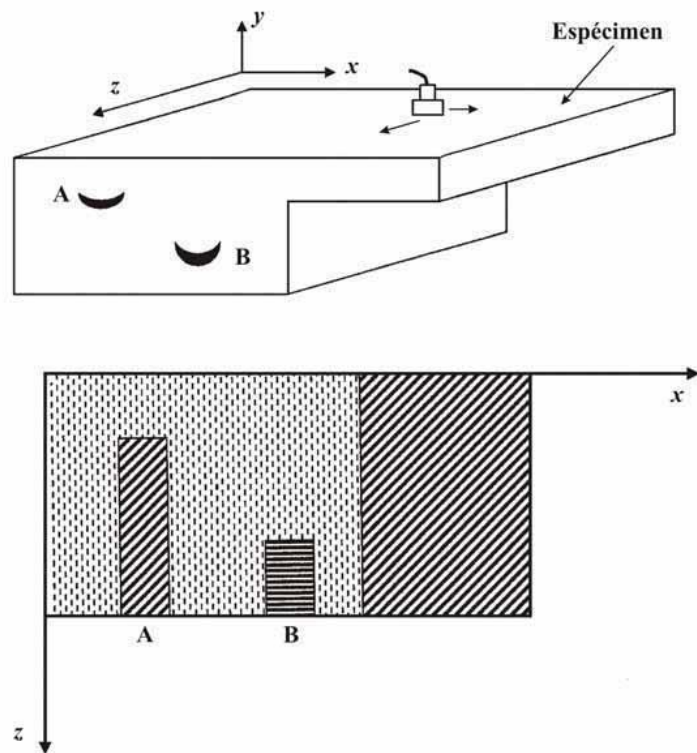
Debido a que las ondas de ultrasonido se realizan en varias partes del elemento o puente es necesario que la documentación teórica y grafica puedan ser fácilmente interpretadas por todas aquellas personas con conocimientos o conocimientos reducidos en las ciencias especialmente las de ingeniería. A continuación, se presentan los tres gráficos o formas más utilizadas para la representación de resultados de la evaluación por ultrasonidos separándolos en método A en función del tiempo (este es ilustrado en la figura 13), B en función de la coordenada espacial y C que demuestra la respuesta del transductor en dos dimensiones.

Figura 14. **Representación en función de la coordenada espacial del espectro de respuesta (Método “B”)**



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes*. p. 126.

Figura 15. **Representación en dos dimensiones del espectro de respuesta (Método "C")**



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *la evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes*. p. 127.

A continuación, se presentan las ventajas del método de evaluación por ultrasonido, respaldando porque este método de evaluación es uno de los más sencillos, seguros y efectuados en la actualidad; las ventajas de este método son:

- Se puede obtener información de la ubicación y tamaño de las fisuras o grietas.

- Se puede detectar los defectos superficiales e internos sin importar el tamaño del elemento estructural.
- Se puede utilizar este método en casi todos los materiales utilizados en la construcción.
- Es portátil, versátil y no necesita preparación previa para su realización.
- Son ensayos de bajo costo.

A pesar de todas las ventajas y beneficios que este método de ensayo proporciona no es un método perfecto; algunas desventajas de este método de ensayo son:

- Se debe de tener acceso al menos a una superficie del elemento estructural que se desea ensayar.
- Se obtienen resultados poco confiables al realizar este ensayo en elementos de superficies rugosas.
- El inspector debe de haber recibido un entrenamiento y capacitación de alto nivel que le permita manejar el equipo.
- Los elementos con geometrías complejas pueden hacer este ensayo impráctico o imposible de realizar.
- Las fisuras o grietas que se encuentran muy cerradas pueden llegar a ser obviadas por este método.

Este tipo de ensayo tiene un alto nivel de sensibilidad a la dirección del haz de ultrasonido con la orientación del defecto.

4.2.2. Radiografía industrial

La radiación es uno de los descubrimientos más importantes en la historia, esta ha permitido avances en varias ramas de la ciencia, la medicina es la más conocida, aunque la radiación se utiliza en diferentes campos como lo es la ingeniería. Esto debido a que la radiografía no solo abarca los rayos X, dentro del conjunto de la radiografía industrial también entra lo que son las partículas alfa, neutrones y la radiación gamma.

Este tipo de evaluación no destructiva se adoptó rápidamente y su utilización fue creciendo de manera rápida debido su bajo margen de incertidumbre. El principio de la radiografía industrial es bastante simple; lo que se realiza es emisión de ondas de radiación que pasan a través del material, y serán absorbidas por el mismo, dependiendo la densidad de este.

La onda de radiación emitida viaja a través del elemento detectando variaciones en el interior de este, como lo puede ser la porosidad interna o la existencia de vacíos (huecos), incluso puede detectar variaciones geométricas o de espesor; también se pueden detectar distintos materiales en un solo elemento, así como sus distintas características de estos como la densidad. Todas estas características se miden de manera indirecta por medio de una placa fotosensible.

Los rayos X son el método por radiación industrial más utilizado para la inspección de elementos estructurales y puentes, se recomienda realizar el procedimiento en el siguiente orden para garantizar lecturas correctas, el procedimiento recomendado es:

- Exponer a la radiación el elemento o la sección que debe ser analizada
- Procesar la evaluación efectuada, para obtener una imagen
- Analizar la imagen obtenida por segmentos
- Realizar un informe con todos los detalles encontrados

Para realizar este tipo de ensayos es necesario contar con una fuente de radiación; estas fuentes pueden ser rayos X las cuales son producidas por tubos de rayos catódicos, rayos gamma los cuales son el producto del decaimiento de cualquier material radioactivo, y las partículas subatómicas que también son producto del decaimiento de materiales nucleares o de reacciones nucleares. Otro elemento fundamental para este tipo de ensayos es un sistema de registro, los cuales pueden ser dispositivos electrónicos sensibles a la radiación, pantallas fluorescentes o películas fotográficas; estos sistemas de registros se categorizan de la siguiente manera:

- Papel radiográfico, se registra la información en una película similar a la de las fotografías que necesitan ser reveladas para obtener la imagen.
- Radioscopia (radiografías en tiempo real), estas son registradas en una pantalla y la imagen se guarda conforme el equipo avanza por el elemento.
- Tomografía computarizada, son imágenes computarizadas obtenidas por exposición del objeto en diferentes ángulos y cortes.

Gracias al avance tecnológico se ha facilitado la realización de este tipo de ensayos, esto debido a que el equipo utilizado ya no necesita que se realicen cálculos como la longitud de onda necesaria para penetrar el elemento, absorción y dispersión, entre otros. En la actualidad los equipos utilizados solo necesitan ser calibrados e incluso cuentan con un monitor que permite observar el interior del elemento estructural en tiempo real.

En la figura 16 se ilustra los distintos equipos utilizados para la realización de estos ensayos, siendo el equipo portátil de radiografía digital el más utilizado en la actualidad por los profesionales de la ingeniería.

Figura 16. **Equipos de radiografía industrial**



Fuente: Foro de la Industria Nuclear Española. *Aplicaciones de la radiación ionizante*.
http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/b_aplicaciones_industriales.html. Consulta:
marzo de 2020.

Debido a que durante todo el procedimiento se maneja radiación y esta es altamente dañina para el ser humano el tema de bioseguridad y capacitación es fundamental para estos ensayos; este aspecto es lo que eleva el precio de estos procedimientos debido al cumplimiento con estas normas y requisitos que se deben de cumplir.

En Guatemala la responsabilidad de controlar el uso, desecho y manejo de todo material radioactivo reside en el Ministerio de Energía y Minas.

Este ente rector debe de regular el uso de material radioactivo sin importar cuál sea su uso; para esto fue creada una biblioteca de reglamentos los cuales indican los procedimientos a seguir para el uso y manejo tanto de los materiales radioactivos como de sus desechos.

Dentro de estos reglamentos, con las regulaciones que se deben de cumplir, se tiene el Acuerdo Gubernativo 469-2014, Reglamento de seguridad física de materiales nucleares y radioactivos; esta normativa indica las cantidades de material radioactivo que se debe utilizar para las distintas actividades, como manejar los desechos, entre otros.

Otra de las atribuciones de este ente rector es proporcionar capacitaciones temas de seguridad y protección radiológica.

Una ventaja que se posee en la actualidad es que los fabricantes de los artefactos que se utilizan para los ensayos utilizando la radiología industrial ofrecen capacitación a sus clientes para el manejo del artefacto, y de temas de bioseguridad al momento de manejar material radioactivo; siempre que sus productos cumplan con los leyes y reglamentos de la República de Guatemala.

A continuación, se presentan las ventajas de los métodos de evaluación que utilizan la radiografía industrial, respaldando el porqué de que estos métodos de evaluación son los más efectivos; las ventajas de este método son:

- Estos pueden detectar defectos internos y externos en los elementos
- Se pueden encontrar defectos de forma más específica, y con estos métodos se pueden encontrar discontinuidades, defectos en el armado de acero o daño por cargas de servicio (en el caso de los rayos X incluso se pueden detectar defectos volumétricos como los es la porosidad).
- Proporciona imágenes en tiempo real.
- No requiere de mucho tiempo para su preparación.
- Los equipos utilizados son portátiles y no requieren de ninguna fuente externa de energía para su funcionamiento.
- Puede ser utilizada en gran variedad de materiales de construcción.

A pesar de todas estas ventajas de los ensayos por medio de radiografía industrial, estos métodos también tienen algunas desventajas que deben ser tomadas en cuenta antes de utilizar estos ensayos; estas desventajas son:

- Es necesario que el inspector esté capacitado para el uso del equipo, así como también en el tema de seguridad radioactiva.
- El equipo es delicado y necesita de cuidados y mantenimientos exigentes.
- Debido a estos cuidados y a la capacitación necesario los costos de estos son elevados.
- Es necesario tener acceso a todos los lados del elemento, para realizar estos ensayos.
- Las lecturas son muy sensibles con respecto a la orientación en la que se realiza el ensayo.
- Es sumamente difícil detectar defectos laminares.

- Estas no se pueden realizar en ambientes calurosos.

Debido a que el material radioactivo no se puede apagar, hay que esperar a que la intensidad de este decaiga con el tiempo, por lo que el tema de seguridad debe de ser manejado de manera estrictica y continua.

4.2.3. Emisiones acústicas

Las emisiones acústicas son el resultado de la liberación de energía elástica que se encuentra almacenada dentro de un material o artefacto que este siendo sometido a esfuerzo y generada por la rápida liberación de energía por microfracturas de dicho material o artefacto.

El principio fundamental de estas emisiones es que la mayoría de los materiales de construcción tienen la capacidad de emitir pulsos sonoros cuando son sometidos a cargas o esfuerzos.

Este tipo de ensayos busca escuchar el sonido emitido dentro del material para ubicar la fuente de este.

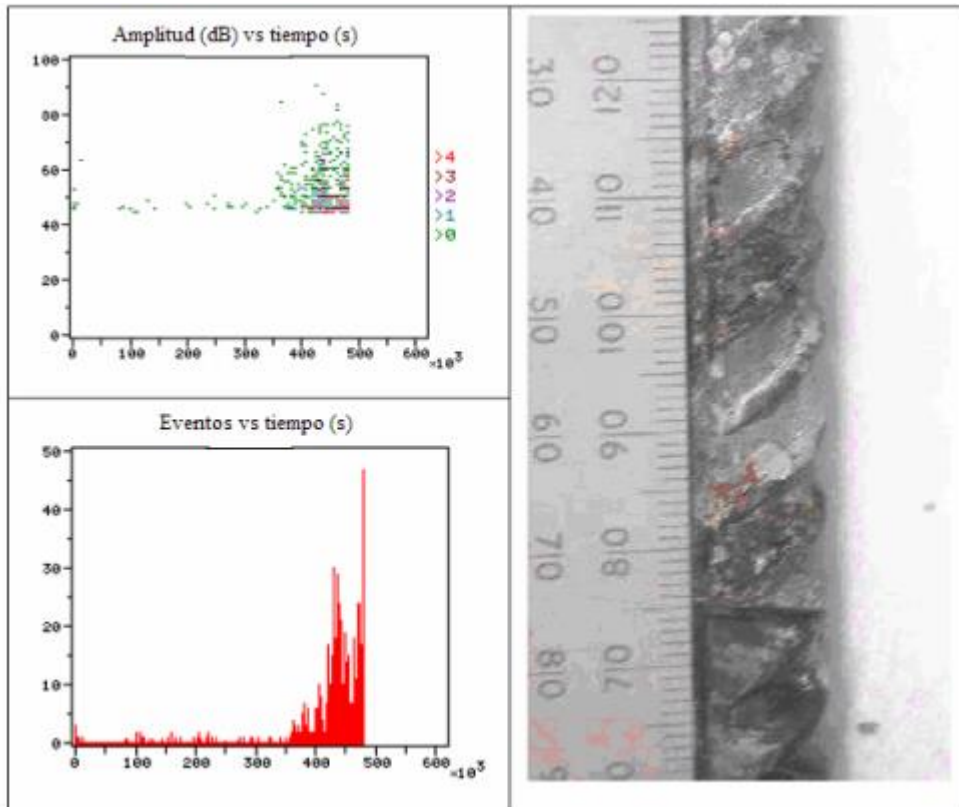
Es necesario aclarar que con estas técnicas no se detectan ni forma ni el tamaño de las fallas, este tipo de ensayos permite ubicar con facilidad en que parte del elemento existen daños o defectos; en conclusión, estos ensayos, por si mismos, no arrojan los resultados técnicos necesarios para la toma de decisiones por lo que es necesario utilizar técnicas adicionales para concluir en resultado más certeros que permitan realizar el plan de acción adecuado para el elemento o puente.

Con la definición anterior se entiende que para llevar a cabo este tipo de ensayos es necesario que se aplique una carga al elemento estructural o puente para generar las emisiones acústicas, así como, un artefacto que permita al inspector escuchar estas emisiones para su análisis; en la actualidad se utilizan sensores y sistemas de análisis que recibe la información de dichos sensores e identifica la fuente de las emisiones.

Las principales fuentes productoras de emisiones acústicas son:

- Fisuras o grietas
- Efecto Barkhausen (crecimiento de dominios magnéticos)
- Fracturas de fibras
- Sismos
- Daños químicos (corrosión)

Figura 17. **Gráfica de inicio de propagación de efectos de corrosión**



Fuente: SINDOROVA, Anna. *Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de estructuras de hormigón.*

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12327/Capitulo3_Emision%20acustica.pdf.

Consulta: 29 de julio de 2020.

Los ensayos por emisiones acústicas en la actualidad se utilizan en varias aplicaciones, estos ensayos son utilizados en laboratorios para determinar la resistencia y calidad del concreto (por medio de testigos o vigas); así como, también son utilizados para la inspección de estructuras de concreto (reforzado, preesforzado y postensado), y puentes in situ.

Gracias a los avances en la tecnología en la actualidad existe un amplio catálogo de sensores capaces de reconocer y registrar las emisiones acústicas que atraviesan el material del elemento estructural o puente. Los sensores más utilizados en la actualidad son:

- Acelerómetros de masa, son los más utilizados y tienen un rango máximo de 100 kHz.
- Transductores piezométricos, estos pueden trabajar con varios rangos de frecuencias lo que los hace los más comunes y confiables.
- Transductores capacitivos, estos son los menos utilizados debido a su respuesta constante (no importa la frecuencia), a pesar de que estos son capaces de monitorear los desplazamientos superficiales que puedan existir.
- Transductores ópticos/láser, son los más completos en la actualidad porque poseen un amplio rango de respuesta en frecuencia y estos no necesitan estar en contacto con el elemento o puente que está siendo inspeccionado, sin mencionar que estos pueden integrar la señal sobre toda el área del elemento o puente.
- Transductores magneto-restrictivos, estos están restringidos a una frecuencia máxima de 1MHz, sin embargo, son la mejor opción cuando se debe trabajar en altas temperaturas o en sitios con radiación nuclear.

Se debe de tener en cuenta algunos aspectos cuando se utilizan ensayos por emisiones acústicas. Uno de estos aspectos es el tipo de sensor, se debe de seleccionar un sensor que logre registrar las frecuencias utilizadas por encima del sonido del ambiente en que se encuentra el elemento o puente. Es necesario considerar que las fisuras o grietas se magnifican por lo que generan sonidos distintos y estos sonidos tienen una frecuencia distinta, por lo que no se puede descartar ninguna frecuencia.

Es necesario escoger la correcta distribución y tipos de sensores, utilizando y basándose en la geometría del elemento o puente. Es necesario que la distribución que se utilizara cubra todo el volumen del elemento o pieza que se estará inspeccionando para que al momento de triangular la señal se pueda identificar y localizar los defectos o fallas que puedan existir; una manera para simplificar este procedimiento es aumentando el número de sensores en el ensayo, siempre considerando que entre más compleja sea la geometría del elemento se deberá tener mayor cantidad de sensores.

Las distribuciones que se utilizan pueden ser triangulares, las cuales son útiles para cubrir superficies de gran tamaño; también se pueden utilizar distribuciones lineales las cuales son útiles para el monitoreo y control de defectos o daños existentes en el elemento o puente.

A continuación, se presentan las ventajas de los métodos de evaluación que utilizan las emisiones acústicas, estas ventajas son:

- Los elementos que se utilizan son de bajo costo y fáciles de utilizar
- Se puede ensayar un sistema estructural o estructural completa en una sola prueba.
- Estos ensayos son capaces de detectar fisuras y grietas y como estas se propagan.
- Son adecuadas para realizar en ambientes hostiles.
- Se pueden realizar en forma remota o continua.

En su contraparte este método posee algunas desventajas que es necesario tomar en cuenta, estas desventajas son:

- Para su aplicación es necesario aplicar una carga
- No se pueden detectar algunos defectos debido a que no todos producen señales acústicas.
- Estos no detectan el tamaño del defecto o daños, para esto se debe utilizar otra técnica de evaluación.
- Los ensayos se complican en estructuras complejas.

No existen una normalización para la interpretación de los datos obtenidos.

4.3. Técnicas para la evaluación de puentes

Un puente es aquella estructura que permite atravesar un obstáculo como algún accidente geográfico, un río, un valle y otra carretera; estos también pueden ser utilizados para acortar las distancias entre dos puntos. Debido a la función que tienen los puentes y la importancia que estos tienen dentro de la sociedad estos son considerados como estructuras esenciales; las estructuras esenciales son aquellas que no pueden sufrir daños al momento de un sismo severo, por lo que tanto el diseño y el mantenimiento de estos debe ser minucioso y estricto.

En el capítulo primero se detalló la geografía de la República de Guatemala, y como esta tiene características muy particulares porque su relieve es bastante variado y accidentado; los puentes se convierten en estructuras necesarias para la continuidad de los proyectos carreteros, porque permiten salvar esos accidentes geográficos que se encuentran de manera continua en la mayor parte del territorio guatemalteco.

En la actualidad, hasta el año 2019, según la Dirección General de Caminos hay 1276 puentes en toda la República de Guatemala registrados; siendo 1044 de concreto, 49 de madera y 183 de metal. Este es un número relativamente alto para un país que posee una extensión territorial no tan extensa.

A pesar de que las técnicas descritas anteriormente pueden ser utilizadas en puentes el desarrollo de los procedimientos pueden complicarse a la hora de aplicarse en puentes, estas complicaciones son:

- Detección de fisuras o grietas generadas por fatiga en las barras de acero.
- Inspección rápida y eficiente en la losa (ya que no se puede detener el tránsito vehicular por completo).
- Inspección de la estructura completa cuando la geografía es accidentada.
- En caso de concreto presforzado con mucho detalle cuidar deflexiones.

Derivado de lo anterior se desarrollaron evaluaciones no destructivas especiales para puentes, los cuales se presentan a continuación.

4.3.1. Radar de penetración

El principio fundamental de este ensayo es la emisión de ondas electromagnéticas, y como estas atraviesan o rebotan en ciertos materiales; por lo que para este ensayo se utiliza una antena que emita ondas electromagnéticas dentro del rango de 500MHz a 6GHz. La condición del concreto y del acero se puede determinar interpretando las ondas generadas por la antena.

La capacidad de la onda de penetrar el material depende precisamente del tipo de material, pueden ser metálicos y dieléctricos (concreto y asfalto), los materiales metálicos son buenos conductores lo que hace que las ondas al entrar

en contacto con estos tipos de materiales reboten, a diferencia de los materiales dieléctricos los cuales absorben la onda y esta recorre todo el material hasta atravesarlo por completo. En el concreto reforzado las ondas atravesaran y se propagaran por todo el concreto hasta que este entre en contacto con las barras de acero donde una parte de la onda se reflejará y la otra seguirá atravesando el concreto.

Este método de evaluación no destructiva tiene un costo elevado, por lo que es obviado o descartado por los profesionales de la ingeniería; además de tener un precio elevado es un método de evaluación no destructiva complejo cuyo análisis no puede ser interpretado por un operario que no esté debidamente capacitado y certificado en el método, y es aún más complejo explicar los resultados a aquellos que no sean profesionales de la ingeniería. Este método tiene gran capacidad para detectar daños en los puentes y carreteras, incluyendo los daños por corrosión.

El procedimiento de radar por penetración es delicado y debe ser ejecutado de manera estricta con el objetivo de obtener resultados más certeros y confiables, el procedimiento de la evaluación por radar de penetración es:

- Se debe seleccionar la magnitud y amplitud de las ondas electromagnéticas que se generaran para examinar el puente o la sección de este.
- Se debe colocar la antena en la posición cercana en los puntos de interés, de tal forma que esta quede en dirección transversal a la losa del puente, siempre procurando que el ángulo y separación entre antena y losa sean constantes.
- De ser necesario se debe colocar la antena receptadora en posición transversal a la losa del puente, no es necesario el uso de otra antena

porque la antena que emite las ondas electromagnéticas puede ser la antena receptora al mismo tiempo.

- Una vez las antenas estén en posición y las ondas electromagnéticas hayan sido generadas se debe procesar las señales, esto debe hacerse de acuerdo con el tipo de equipo y al software que este utilice.
- Por último, se debe realizar la interpretación de señales y la generación del análisis respectivo, estas señales siempre deben ser correlacionadas con datos obtenidos de otros métodos de ensayo como lo que es la inspección visual, la correlación de estos datos permite generar un análisis del estado del puente más certero.

En base al principio teórico del ensayo por radar de penetración se han desarrollado dos metodologías para la realización de este ensayo y con eso obtener resultados más certeros.

4.3.1.1. Metodología de Hermes

Esta metodología utiliza 64 antenas las cuales usan canales independientes con los que se pueden generar una imagen, ya sea, en 2 o 3 dimensiones, los datos se alinean geoméricamente en base a la posición de las antenas; para que esta alineación tenga un menor grado de incertidumbre es necesario que se realice una calibración del equipo y se ejecuten rondas de prueba. La metodología Hermes para el radar de penetración se enfoca en el estudio de puentes con losas de concreto reforzado convencional.

Esta metodología no es factible en la actualidad en países como Guatemala debido a que el costo de realización de este ensayo no destructivo es bastante elevado; para poder realizar este ensayo se remolca un camión que contiene las antenas tratando de mantener una velocidad constante durante todo el trayecto

analizado, debido a que la velocidad puede tener algún impacto en los resultados del ensayo es necesario realizar varias rondas para determinar el posible efecto de la velocidad.

4.3.1.2. Metodología Peres

Mientras que la metodología Hermes se enfoca en puentes con losas de concreto reforzado convencional, la metodología Peres se enfoca en aquellos puentes con losas prefabricadas; los artefactos utilizados en la metodología Peres son ensayados y calibrados con base en ensayos de laboratorio que simulaban las posibles fallas y defectos que se pueden encontrar en los puentes. Otros parámetros de análisis como la frecuencia del pulso, la altura de la antena, filtros y el intervalo del muestreo deben ser calibrados manualmente, ya que estos cambian en base al puente que se busca ensayar.

Esta metodología es más factible para realizar dentro del territorio de la República de Guatemala porque el costo del equipo es más bajo que el del método Hermes, sin mencionar que la maniobrabilidad del equipo en las calles curvas y estrechas de la República de Guatemala es mucho mayor.

Estos métodos a pesar de que se enfocan en losas distintas se pueden utilizar en cualquier puente, además, el objetivo principal de estas metodologías del radar de penetración es poder identificar delaminaciones y efectos de la corrosión en las barrillas de acero.

Figura 18. **Radar de penetración modelo RD1500**



Fuente: Radiodetection. *Georadar GPR: radar de penetración terrestre.*
<https://www.radiodetection.com/es/products/georadar-gpr-radar-de-penetracion-terrestre/rd1500>. Consulta: julio de 2020.

4.3.2. Sensores magneto-restrictivos

Estos métodos de ensayos no destructivos fueron diseñados con el objetivo de poder detectar y determinar el estado de corrosión que afecta a las varillas de acero o cables de preesfuerzo en los puentes. Los desarrolladores de este ensayo no destructivo son los científicos del Southwestern Research Institute, este se ubica en el estado de Texas, Estados Unidos de América. Para poder determinar el alcance de esta prueba se realizaron varios ensayos y una serie de experimentos que hoy en día permiten determinar el estado de corrosión en los materiales embebidos en concreto, el tiempo de curado de este y poder hacer mediciones de la tensión que sufren las varillas de acero o los cables.

El ensayo es relativamente sencillo y se desarrolla generando ondas elásticas las cuales viajan por el material del puente hasta que estas llegan al sensor magneto-restrictivo; las ondas generadas deben tener un ancho de banda alto para que el sensor pueda detectarlas. La sensibilidad de los sensores magneto-restrictivos es alta, por lo que no es necesario que estos estén en contacto con las varillas de acero o los cables, además de esto las distancias que se pueden cubrir son extensas, estas pueden llegar a ser mayores de 30 metros utilizando únicamente un sensor.

Estos aspectos hacen que este método de evaluación no destructiva sea una de las favoritas y las primeras a considerar por los profesionales de la ingeniería; además de ser sencillo de realizar este es de bajo costo debido a los elementos necesarios para su realización, estos elementos son:

- Dos bobinas (las cuales rodean el material a inspeccionar)
- Dos sensores magneto-restrictivos
- Un generador de pulsos eléctricos (de corta duración de preferencia)

- Un amplificador
- Un acondicionador de señales
- Un sistema para almacenamiento de datos

Este equipo se puede adquirir en partes y armado *in situ*, no necesariamente debe ser adquirido con alguna empresa o proveedor. Realizar este ensayo es sencillo y practico, las etapas de este ensayo son:

- Se genera un pulso eléctrico y se debe amplificar
- El pulso amplificado viajara a través de la bobina y esta aplica un campo magnético al cable.
- El cable generará una onda elástica que se propagará por el cable en ambas direcciones.
- La onda elástica es recibida por el sensor magneto-restrictivo y la inducción magnética del acero cambia.
- los cambios en la inducción generan un voltaje eléctrico, este se amplifica y se procesa.

Los datos obtenidos son procesados en una gráfica frecuencia vs tiempo, la cual se podrá observar una variación en la frecuencia de la onda cuando esta recorra un tramo de las varillas o cable en donde exista algún desperfecto o corrosión. Este método también puede usarse para determinar el tiempo de curado en el concreto y para determinar la tensión en las barrilas de acero o los cables, lo que demuestra que este ensayo puede ser de gran utilidad en varias situaciones y aplicaciones.

4.3.3. Sensores de corrosión

Este es uno de los métodos de ensayos no destructivos más sencillos, ya que no requiere de mano de obra o técnicos capacitados ni de procedimientos largos y costosos para su realización. Los sensores de corrosión como lo indica su nombre sirven para monitorear y controlar el estado de las varillas de acero o cables que son embebidos en el concreto y así poder determinar si estos están siendo afectados por la corrosión.

La corrosión es una alteración fisicoquímica que puede ser medida o monitoreada por medio del cambio de potencial en el electrodo de referencia, en base a esto se han desarrollado sensores que pueden ser embebidos en el concreto y de forma continua estos realizan una medición del potencial de corrosión.

Estos sensores son de tamaño reducido con un alcance hasta de 15 metros, lo que permite que se puedan hacer las mediciones a distancia; esta característica es bastante útil para su aplicación en cuerpos estructurales como los puentes ya que permite hacer la revisión de manera segura y cómoda. En la actualidad estos sensores tienen un costo relativamente bajo y compite con los demás métodos de evaluaciones no destructivas, aunque estos solo permiten estudiar y controlar la vida útil del armado de acero mano no del concreto; este método es necesario complementarlo con otros métodos de evaluación no destructiva para obtener resultados completos.

4.3.4. Antena electromagnética

Los avances tecnológicos permiten que los métodos de ensayos no destructivos evolucionen y permitan monitorear el estado de los materiales de maneras más prácticas y efectivas, uno de los ejemplos es la antena electromagnética, que es un método de evaluación no destructiva relativamente nueva; este método al igual que los sensores de corrosión fueron diseñados en el estado de Virginia de los Estados Unidos de América.

En el Instituto Politécnico de Virginia fue diseñada una antena, y consta únicamente de un capacitor (con placa paralela), una antena (encargada de transmitir las ondas electromagnéticas y un cable coaxial (funciona como línea de transmisión); esta antena trabaja en un rango de frecuencias entre los 100kHz a los 10GHz y se utiliza para detectar defectos como fisuras o grietas en el concreto realizando mediciones en la permeabilidad magnética del concreto.

Debido a que este método es relativamente nuevo y no se ha comercializado mucho no se tienen muchos documentos o cursos de capacitación para la realización de este, por lo que, si se decide utilizar este método para el mantenimiento o estudio de un puente es necesario estudiar el concreto y sus propiedades para poder aplicar el principio fundamental de este ensayo y así poder detectar defectos en el puente estudiado.

4.3.5. Martillo esclerométrico

El principio fundamental de este ensayo se basa en la medición de la onda elástica y el rebote que esta provoca cuando se produce un impacto en una superficie dura; el resorte controla el rebote de la punta del martillo y la cantidad de rebotes depende de la dureza de la superficie que este golpea, permitiendo que se obtenga una lectura de la fuerza de compresión del concreto en el elemento estructural. Se puede obtener una lectura de esta fuerza directamente del martillo, ya que este posee graficas en su cuerpo.

Antes de poder realizar el ensayo en cuerpos estructurales como los puentes es necesario que el martillo sea calibrado por medio del yunque de prueba (todo martillo debe incluir este yunque), para obtener resultados confiables y certeros; para calibrar el martillo únicamente se debe utilizar el martillo en el yunque de prueba y verificar que el valor obtenido se encuentre dentro de los parámetros correctos (el proveedor debe proporcionar los valores correctos para esta calibración).

Debido a que el estado del concreto puede verse afectado por varios factores es necesario tomarlos en cuenta, ya que, si el concreto está siendo afectado, por cualquier causa, la capacidad de este también está siendo afectada y consecuentemente su rendimiento. Los factores que deben tomarse en cuenta antes de realizar este ensayo son:

- Cemento que conforma el elemento
- Masa o espesor del elemento a ensayar
- La compactación del elemento
- Tipo de superficie (no funciona en superficies abiertas o no uniformes)
- Edad del elemento

- Humedad de la superficie
- Temperatura ambiente (debe estar entre 10 a 35 grados Celsius)

A pesar de que este ensayo tiene varios factores que pueden tomarse como limitantes es uno de los más utilizados en la actualidad, esto debido a su simplicidad y certeza en sus resultados; la simplicidad de este ensayo no destructivo permite que cualquier persona pueda realizarlo sin ningún tipo de capacitación o certificación, ya que el martillo esclerómetro es un dispositivo sencillo que puede ser utilizado únicamente con las instrucciones proporcionadas por el fabricante. Los resultados deben ser analizados y procesados por un profesional de la ingeniería o por alguien con conocimientos de concreto y sus propiedades.

Los pasos que se deben de seguir para realizar este ensayo no destructivo son los siguientes:

- Se debe de limpiar la superficie donde el martillo dará el golpe
- Con el yunque de calibración se deben de realizar rondas hasta que el martillo este calibrado.
- Se golpea la superficie con el martillo y se toma nota de los resultados obtenidos, dejando un espacio mínimo de 2 centímetros de los bordes del elemento.
- Con los resultados obtenidos se realiza el análisis pertinente.

A continuación, se presentan las ventajas de este método de ensayo no destructivos:

- Su realización y materiales son de bajo costo
- Este puede ser realizado de forma vertical u horizontal

- No altera la resistencia o aspecto del elemento ensayado
- No se necesita de mucho tiempo o espacio para realizarlo

Como todo ensayo no destructivo tiene desventajas, las cuales deben ser tomadas en cuenta; las desventajas de este método son:

- Se debe de tomar en cuenta todos los factores que pueden alterar los resultados.
- La percepción del operario no debe ser alterada durante la realización del ensayo.
- La herramienta siempre debe ser calibrada.
- Es necesario realizar el ensayo en una superficie lisa.
- Solo afecta los primeros 3 centímetros del elemento ensayado.

Figura 19. **Martillo esclerométrico**



Fuente: Testmak. *Martillo para pruebas en roca (Martillo Schmidt) tipo L.*
<http://www.testmak.com/es/Martillo-Para-Pruebas-en-Roca-Martillo-Schmidt-Tipo-L>. Consulta:
 julio de 2020.

5. PROPUESTA DE UNA NORMATIVA QUE REGULE LOS PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS REALIZADOS EN PUENTES

5.1. Objeto y campo de la aplicación

- Esta norma objeto de esta tesis se recomienda utilizarla para determinar el estado de los puentes utilizando métodos de ensayos no destructivos. Los ensayos, anteriormente descritos, en la actualidad son los más utilizados debido a que no elevan los costos y que los resultados que proporcionan son certeros y confiables.
- Estos métodos de ensayos no destructivos aplican para todos los puentes de concreto en sus tres variantes (reforzado, presforzado y postensado).
- Los valores obtenidos deben ser presentados en el Sistema Internacional (SI), pueden ser presentados en el Sistema Ingles dentro de un paréntesis tratando de no mezclar unidades de medida; se debe de considerar que las equivalencias entre estos sistemas no son equivalencias idénticas, por lo que la utilización de ambos sistemas puede generar confusión en los resultados. En los datos y resultados de los valores obtenidos siempre debe prevalecer los presentados en el Sistema Internacional de Medidas (SI).
- Es responsabilidad del usuario seguir y mantener practicas seguras, aunque para ensayos que utilizan material radioactivo es necesario que se consulte y siga los procedimientos establecidos por el Ministerio de Energía y Minas, para el uso y manejo de ese tipo de materiales.

No es responsabilidad del inspector determinar los periodos en los que es necesario realizar estos ensayos en puentes, esto depende de las autoridades; aunque se puede recomendar realizar estos procedimientos en periodos no mayores de 10 años, dependiendo del cambio en las cargas de diseño que pueden variar en base al crecimiento vehicular y poblacional.

5.2. Terminología

Es el conjunto de términos que se implementaran en la normativa propuesta con el fin de ilustrar todos los aspectos necesarios para el entendimiento de esta.

5.2.1. Definiciones

Ensayos no destructivos (END): métodos que al ser aplicados a un elemento estructural o puente no causan ningún tipo de daño a su integridad, permitiendo determinar la condición de este (algunos permiten estimar la resistencia del concreto).

5.3. Resumen del procedimiento

- Se deben de realizar dos métodos de ensayos no destructivos en el puente: el primero debe ser una evaluación superficial de todo el puente utilizando los instrumentos que ayuden a la percepción del inspector; y el segundo puede variar entre una evaluación volumétrica o ensayos especiales para puentes.
- Los ensayos especiales para puentes pueden ser realizadas como un tercer procedimiento; este debe ser considerado en el caso que el inspector determine, que sea necesario, en base a los resultados de los dos ensayos anteriores o cuando el puente demuestre un deterioro severo a simple vista o como resultado de una inspección visual.

5.4. Catálogo de ensayos no destructivos

Se entiende como catalogo al listado de procedimientos sugeridos para la evaluación no destructiva en los elementos estructurales y puentes.

5.4.1. Evaluación superficial

- Inspección visual. Método de evaluación no destructiva que se basa en la percepción del inspector, en esta se pueden utilizar herramientas que mejoren o aumente la percepción del inspector.
- Líquidos penetrantes. Método de evaluación que utiliza líquidos con características especiales los cuales se aplican en la superficie del puente, infiltrándose en las fisuras o grietas y al aplicar un líquido revelador cambian de color permitiendo detectar estos defectos con facilidad.

- Corrientes parásitas. Método de evaluación realizado por medio de una bobina se genera ondas eléctricas creando un campo magnético que viaja a través del material. Los cambios en estas ondas se revisan por medio de una pantalla que regularmente está equipada en la bobina.

5.4.2. Evaluación volumétrica

- Evaluación por ultrasonido. Método de evaluación que se utiliza en la mayoría de las situaciones por su eficacia. En este método se generan ondas de ultrasonido las cuales viajan a través del material, la intensidad de estas ondas está en el rango de 200kHz a 25MHZ y esta manifiesta variaciones si la onda detecta o entra en contacto con una fisura o grieta.
- Radiografía industrial. Método de evaluación por medio de artefactos que permiten la detección de fallas, a través de la generación de radiación que permite obtener imágenes internas del elemento, y se puede observar en un monitor que forma parte del artefacto utilizado.
- Emisiones acústicas. Método de evaluación, para la detección de fallas estructurales, aplicando una carga en el elemento estructural objeto del análisis o estudio, si hay fisuras o grietas al aplicar la carga estas generaran un sonido en reacción, este sonido es detectado por el artefacto.

5.4.3. Evaluaciones para puentes

- Radar de penetración. Método de evaluación, para la detección de fallas estructurales, este consiste en recorrer el puente, o las zonas o áreas sujetas a estudio y análisis, con el artefacto denominado radar de penetración, y emite ondas electromagnéticas que atraviesan el material detectando tanto defectos en el concreto (fisuras o grietas), como daños

al acero (corrosión). El mismo artefacto por medio de una pantalla incorporada demuestra, en tiempo real, los resultados obtenidos.

- Martillo esclerómetro. Método de ensayo que determina el estado del concreto por medio de un martillo que tiene un resorte dentro, una vez calibrado el martillo se golpeará la superficie de concreto y en base a la cantidad de rebotes del resorte se podrán evaluar resultados y sacar conclusiones.

5.5. Equipo

Es necesario el uso de herramientas para la realización de los ensayos no destructivos en estructuras y puentes, por lo que se detallaran las herramientas necesarias para cada tipo de ensayo con sus respectivas características.

5.5.1. Evaluación superficial

La evaluación superficial son aquellos ensayos que por medio del sentido de la vista se detecta el deterioro o fallas en los elementos estructurales o puentes, por lo que es necesario utilizar equipo que permita magnificar dicho sentido.

5.5.1.1. Evaluación visual

- Brazo con espejo. Consiste en un brazo de aluminio extensible hasta 50 cm con un espejo con medidas no menores a 10 X 10 cm.
- Lámpara led. Esta debe iluminar el área de tal manera que genere la claridad necesaria para detectar anomalías en el área examinada.
- Lupa. Este instrumento óptico puede ser convencional o electrónico y permite ampliar la imagen de la superficie y objeto sometido a un análisis de detección de fallas estructurales.
- Drones equipados con cámara de video. Estos se utilizarán cuando la topografía es muy accidentada y dificulte la inspección en algunas partes del puente debido a su dificultad de acceso o posición.

5.5.1.2. Líquidos penetrantes

- Líquido penetrante fluorescente o no fluorescente. Este debe tener alta capilaridad y baja adherencia para que este pueda avanzar a través de las posibles fisuras o grietas.
- Líquido revelador. Este líquido debe tener baja capilaridad y alta adherencia.

5.5.1.3. Corrientes parásitas

- Bobina con la suficiente potencia para generar ondas electromagnéticas que recorran el material (se recomienda usar el Equipo Hocking Phasec 2200).

5.5.2. Evaluación volumétrica

Este tipo de ensayos busca determinar el estado interno de las estructuras o puentes, por lo que es necesario equipo capaz de generar ondas de ultrasonido o radiación para generar una imagen interna de estas.

5.5.2.1. Evaluación por ultrasonido

- Equipo capaz de generar ondas de ultrasonido con monitor incorporado. Estos equipos están disponibles en varias marcas y modelos; por lo que su elección queda a criterio del experto en este tipo de evaluaciones de detección de fallas estructurales y sus características.

5.5.2.2. Radiografía industrial

- Equipo de radiografía que tenga incorporado material radioactivo y monitor incorporado que permita observar los resultados in situ (el modelo del equipo debe de cumplir con las normas de seguridad).

5.5.2.3. Emisiones acústicas

- Sensores de ondas acústicas
- Preamplificador
- Computador con software para que almacene y presente los datos obtenidos.

5.5.3. Evaluaciones para puentes

Los puentes son estructuras masivas que tanto su longitud y altitud puede dificultar la implementación de los ensayos no destructivos convencionales, por lo que existe equipos especiales para la evaluación de dichas estructuras.

5.5.3.1. Radar de penetración

- Radar de penetración, marca y modelo a criterio del inspector y las características del cuerpo estructural en estudio o análisis.

5.5.3.2. Martillo esclerométrico

- Martillo con resorte incorporado y graduación impresa al costado
- Yunque de calibración (este debe ser para el modelo específico del martillo esclerómetro).

5.6. Procedimiento

- Recopilar toda la información del puente necesaria, siendo fundamentales y prioritarios los planos estructurales (si fuera posible).
- Examinar la topografía del área que rodea el puente y analizar las dificultades que esta pueda presentar para examinar los elementos objetos del análisis o estudio.
- Una vez hecho el reconocimiento topográfico se deberá seleccionar la técnica de evaluación superficial más adecuada para cada caso en particular.
- Revisar y preparar los instrumentos que se utilizaran en la evaluación superficial, así como, los protocolos de seguridad necesarios.

- Realizar la evaluación superficial en el puente; el método escogido debe estar dentro del catálogo de ensayo no destructivos de la presente norma.
- Realizar el análisis correspondiente con la información recopilada de la evaluación superficial con el cual se deberá seleccionar una segunda técnica de evaluación volumétrica para complementar el procedimiento.
- Si se considera necesario se deberá seleccionar una técnica de evaluación de puentes en lugar de un método de evaluación volumétrica.
- Recopilar la información obtenida en ambos ensayos y realizar el informe de resultados obtenidos del puente objeto del estudio.

5.7. Informe de resultados

En esta sección se debe de dar a conocer toda aquella información que ayude a dar un trasfondo de la estructura o puente, así como, todos los procedimientos realizados, resultados obtenidos y la interpretación de estos.

5.7.1. Antecedentes del puente

En esta sección se debe colocar toda la información del puente a evaluar que justifique porque está siendo evaluado. La información debe contener el historial, ubicación, geografía local, geografía e historial sísmico del lugar, planos estructurales (si es posible), cargas para las que fue diseñado y crecimiento poblacional del área a la que sirve.

Esta información permite conocer la estructura y visualizar el deterioro que puede presentar, así como, ayuda a contrastar las cargas de servicio que el puente soportaba al inicio y las que soporta al momento de efectuar los ensayos no destructivos.

5.7.2. Métodos de ensayos seleccionados

En esta sección se describe el ensayo de inspección superficial y de inspección volumétrica, si a criterio del inspector es necesario realizar un ensayo no destructivo especial para puentes en esta sección deberá ser descrito la metodología escogida; también se debe describir los criterios y razones que influenciaron a la selección del método.

5.7.3. Procedimientos realizados

En esta sección se debe de colocar los procedimientos realizados por cada ensayo. Se deberá de describir las herramientas utilizadas para la realización del método, la descripción del procedimiento realizado, fotografías de dichos procedimientos (las fotografías deberán incluir cada paso del procedimiento); dejando constancia de la ejecución de una práctica correcta y certera.

5.7.4. Resultados obtenidos

En esta sección se deben colocar los resultados obtenidos de los métodos de evaluación no destructiva que se realizaron en el puente, esto debe ser individual para la evaluación superficial, volumétrica y especial de puentes. Se deberá incluir toda la información pertinente a los resultados, tales como memoria de cálculo y gráficos; es en esta sección donde se debe incluir toda aquella información que ayude a la interpretación de los resultados, todo aquello que el inspector considere necesario para la presentación y entendimiento de los resultados pertenece a esta sección.

CONCLUSIONES

1. La Comisión Guatemalteca de Normalización (COGUANOR) como ente rector de todos aquellos procesos normalizados o en proceso de normalización, debe velar por conseguir toda la información necesaria para que las normas propuestas contengan información correcta y concreta.

El procedimiento que conlleva normalizar un proceso es laborioso, por lo que en muchas ocasiones puede tomar hasta años. Muchos de los procesos y procedimientos utilizados en la actualidad no cuentan con una normativa nacional, lo que da como consecuencia que se utilicen normativas extranjeras que más se adapten a los procedimientos realizados; incluso en muchas ocasiones se utilizan normas que no han sido actualizadas, lo que da como consecuencia que Guatemala deje de ser competitiva a nivel internacional.

En el ámbito de la construcción esto debe de cambiar, porque, siendo Guatemala un país accidentado en su topografía y que utiliza el concreto como su principal material de construcción, es necesario que se fortalezca la investigación y normalización de los procesos de construcción y mantenimiento de estructuras.

Parte de la responsabilidad es de los investigadores y profesionales de la ingeniería, no solo en acatar y estudiar estos procedimientos, si no también, se debe de fortalecerlos, fomentarlos e impulsarlos con el fin de mantener la investigación activa, mantener las normas existentes actualizadas y apoyar a la creación de normas nacionales.

2. El catálogo de ensayos no destructivos es amplio y con el avance de la tecnología este se sigue expandiendo. Las nuevas tecnologías permiten la realización de los procedimientos de manera más rápida segura y con datos más confiables, sin embargo, es necesario seleccionar el método correcto para cada escenario que se pueda presentar; los puentes son estructuras que se utilizan para conectar dos puntos separados por la topografía del lugar o por algún accidente geográfico, haciendo que los escenarios sean distintos en cada ocasión.

El deterioro que pueda existir en la estructura varía dependiendo a los agentes que está expuesta dicha estructura, es por lo que el criterio de profesional de la ingeniería que esté a cargo de inspeccionar la estructura debe ser amplio y conocer qué tipo de ensayo es el más conveniente para cada ocasión. Las técnicas de evaluación superficial son útiles en todos los casos y pueden ser utilizados porque permiten ver el estado a gran escala de la estructura, estas técnicas permiten la evaluación y detección de fallas o grietas únicamente en el concreto.

Las técnicas de evaluación volumétricas aquellas técnicas que se utilizan para el monitoreo del armado de acero en aquellos casos donde la estructura este expuesta a sulfatos del ambiente o donde las cargas de servicio incrementaran más de lo previsto por el diseñador; las técnicas de evaluación de puentes son aquellas técnicas que son producto de la

evolución tecnológica y estos utilizan herramientas que permiten medidas más certeras y realizar procedimientos para seguros y de manera más práctica, estas técnicas de evaluación se diseñaron específicamente para la evaluación en puentes pensando específicamente en las dificultades topográficas del lugar.

El catálogo de ensayos no destructivos sigue creciendo y llegará al punto donde se podrá mantener un constante monitoreo, en la actualidad ya se puede ver esto en lo que son los sensores de corrosión, este tipo de tecnología hará que el cuidado de los puentes sea más eficiente debido a que mantendrá un registro constante del estado tanto del concreto como del armado de acero y la detección de fallas se podrá realizar con anticipación lo que dará como resultado una reducción en trabajos correctivos y aumentara la cifra en trabajos preventivos de los puentes.

3. Se realizaron dos ensayos no destructivos en el puente Motagua ubicado en la CA9 Norte para determinar su estado y la detección de alguna falla o anomalía en este.

Para comenzar se realizó una inspección visual (técnica de evaluación superficial), con el objetivo de detectar daños, grietas fisuras o deterioro en la superficie del puente; esta se realizó en los extremos de la carpeta de rodadura, así como en los soportes del puente sin encontrar ningún daño, grieta o fisura.

Para determinar el estado del concreto se optó por realizar el ensayo de dureza por medio del martillo esclerométrico (martillo Schmidt), también se realizaron medidas en los extremos de la carpeta de rodadura y los soportes del puente.

El promedio de lecturas obtenidas del ensayo de dureza por medio del martillo esclerométrico fue de 4600 psi, además no se encontró ningún tipo de daño, deterioro, fisura o grieta por lo que se establece que el puente está en condiciones óptimas.

RECOMENDACIONES

1. El estudio de las diversas técnicas de ensayos no destructivos debe ser constante para cualquier profesional de la ingeniería civil, tanto durante el transcurso de la licenciatura como al finalizar la misma. Debido a que en Guatemala la mayoría de las estructuras son de concreto y es necesario monitorear el estado de las mismas para así poder tener un historial de la misma y generar un plan de mantenimiento para las mismas, o de ser necesario trabajos preventivos.
2. Los procesos de normalización en Guatemala necesitan ser conocidos y apoyados por aquellos profesionales de la ingeniería que se dedican a la investigación. Es necesario que dichos procesos fomentados y socializados para que todos los procesos realizados que cuenten con normativas sean realizados de forma correcta y que puedan ser supervisados de tal forma.

Para aquellos procesos que no cuenten con una normativa nacional vigente, se ve la necesidad de la creación de una normativa por medio de la investigación; esto permitiendo a Guatemala ser un país más competitivo a nivel internacional.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society of Testing Materials, ASTM C805M – 18. *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. 8ª ed. ASTM. 2018. 4 p.
2. Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 23277, Ensayo no destructivo de uniones soldadas ensayo mediante líquidos penetrantes niveles de aceptación*. 2ª ed. AENOR. 2015. 10 p.
3. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Historia Asociación guatemalteca de ingeniería estructural y sísmica*. [en línea]. <<https://www.agies.org/quien-es-agies/>>. [Consulta: enero de 2020].
4. CARRIÓN, Francisco., LOMELÍ, María., MARTÍNEZ, Miguel. y QUINTANA, Juan. *La evaluación no destructiva en materiales estructurales y puentes*. México: Instituto Mexicano del Transporte, 2003. 202 p.
5. CÉSPEDES, Marco. *Resistencia a la compresión del concreto a partir de la velocidad de pulsos de ultrasonido*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Perú, 2003. 119 p.

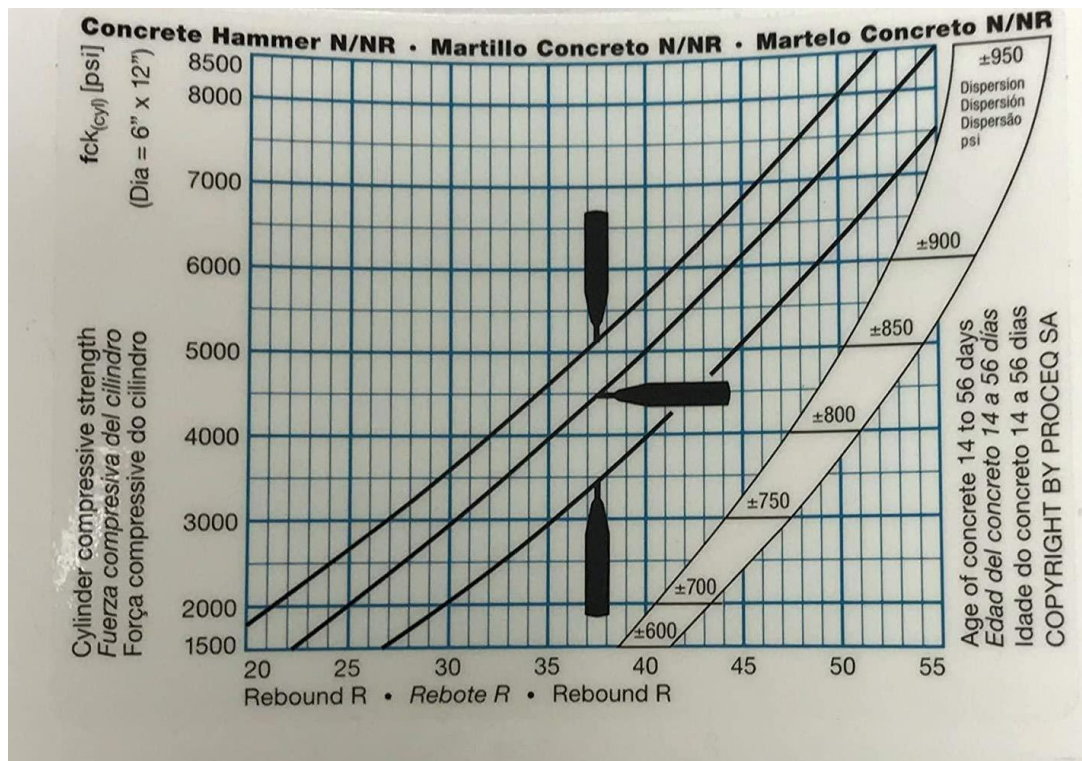
6. CRUZ, Ricardo; ESPINOSA, Elkin; GALÁN, Carlos; QUINTERO, Luz. *Evaluación de técnicas no destructivas en elementos de concreto para puentes*. 2015, volumen 24, p. 83-96.
7. FLORES, Levis., GAUNCA, Dainoriz., GONZALEZ, Osmar., HIGUERA, Jheyssa., MARTÍNEZ, José., Pezón, Yeison. y RODRÍGUEZ, Eglimar. *Ensayos no destructivos*. [en línea]. <<https://chirinossilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/trabajo-de-ensayos-no-destructivos.pdf>>. [Consulta: enero de 2020].
8. Foro de la Industria Nuclear Española. *Aplicaciones de la radiación ionizante*. [en línea]. <http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/b_aplicaciones_industriales.html>. [Consulta: marzo de 2020].
9. GP Technical Equipment. *Equipo Hocking Phasec 2200*. [en línea]. <<https://gp-technical.com/product/hocking-phasec-2200-eddy-current-flaw-detector/>>. [Consulta: febrero de 2020].
10. HOSTALET, Francisco. *Situación actual de las técnicas de ensayo no destructivo del hormigón*. [en línea]. <[researchgate.net](https://www.researchgate.net)>. [Consulta: marzo de 2020].
11. Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala. *Ensayos no destructivos para la evaluación de la resistencia del concreto endurecido*. Guatemala: ICCG, 2018. 5 p.

12. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Sismología en Guatemala*. Guatemala: INSIVUMEH, 2016. 17 p.
13. JAMSA Panamá. *Proyectos*. [en línea]. <<http://jamsandt.com/proyectos.html>>. [Consulta: febrero de 2020].
14. LÓPEZ, Darío. y PILCO, Marco. *Diseño y construcción de un instrumento (prototipo) para la medición de parámetros físicos, basado en el principio de corrientes inducidas, para el laboratorio de ensayos no destructivos, de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional*. Trabajo de graduación de Ing. Electrónica y Telecomunicación. Facultad de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito. 2011. 125 p.
15. MESUREX. *Endoscopio*. [en línea]. <<https://www.mesurex.com/productos/endoscopios>>. [Consulta: febrero de 2020].
16. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Dirección General de Caminos. *Rehabilitación y ampliación de la carretera CA-9 norte tramo III: Sanarate - El Rancho*. [en línea]. <[http://snip.segeplan.gob.gt/share/SCHE\\$\\$INIP/PLANOS_DISENOS/24234-CWKMCMAXKJ.pdf](http://snip.segeplan.gob.gt/share/SCHE$$INIP/PLANOS_DISENOS/24234-CWKMCMAXKJ.pdf)>. [Consulta: agosto de 2020].
17. MOTT, Robert. *Resistencia de materiales aplicada*. 3ª ed. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall, 2013. 634 p.

18. PYTEL, Andrew. y SINGER, Ferdinand. *Resistencia de materiales*. 4ª ed. Oxford: Alfaomega, 2012. 584 p.
19. RADIODETECTION. *Georadar GPR: radar de penetración terrestre*. [en línea]. <<https://www.radiodetection.com/es/products/georadar-gpr-radar-de-penetracion-terrestre/rd1500>>. [Consulta: julio de 2020].
20. REINA, Alexander., SÁNCHEZ, Cristian., RAMÍREZ, José. y HENAO, Natalia. *Ensayos no destructivos IV-UT*. [en línea]. <<http://blog.utp.edu.co/metalografia/16-ensayos-no-destructivos-iv-ut/>>. [Consulta: marzo de 2020].
21. Research Designs and Standards Organization. *Guidelines on non-destructive testing of bridges*. India: Ministerio de Ferrocarriles, 2009. 133 p.
22. SIDROVA, Anna. *Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón*. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. [en línea]. <<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/12327>>. [Consulta: julio de 2020].
23. TESTMAK. *Martillo para pruebas en roca (Martillo Schmidt) tipo L*. [en línea]. <<http://www.testmak.com/es/Martillo-Para-Pruebas-en-Roca-Martillo-Schmidt-Tipo-L>>. [Consulta: julio de 2020].
24. VARGAS, Edson. y MONTENEGRO, Andrés. *Inspección visual*. [en línea]. <<https://www.slideshare.net/AntonioVargas40/inspeccion-visual-74058472>>. [Consulta: febrero de 2020].

APÉNDICES

Apéndice 1. Fotografía de tablas de resistencia del concreto según el número de rebotes del martillo esclerométrico utilizado



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Memoria de cálculo del ensayo de dureza por medio de martillo esclerométrico en el puente Motagua**

Longitud	149,90 m
Ancho	11,10 m
Ensayo de dureza con Martillo Schmidt (martillo esclerométrico)	
Toma de datos	10 medidas por punto

Muro (Eje 4)

Se tomaron medidas en tres puntos (extremos y centro del muro), el martillo se posicionó horizontalmente.

Primer punto (extremo derecho)				
38	38	40	38	40
42	38	37	38	52

Promedio	40
Límite inferior	34
Límite superior	46

Medidas descartadas	1
Promedio nuevo	39

Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene f_c	5 000 psi
Dispersión	800 psi

Segundo punto (centro)				
46	42	40	28	40
40	38	38	40	38

Promedio	39
Límite inferior	33
Límite superior	45

Continuación del apéndice 2.

Medidas descartadas	1
Promedio nuevo	38
Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene fc	4 600 psi
Dispersión	800 psi

Tercer punto (extremo izquierdo)				
42	37	40	38	34
39	40	38	38	47

Promedio	39
Límite inferior	33
Límite superior	45

Medidas descartadas	1
Promedio nuevo	38

Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene fc	4 600 psi
Dispersión	800 psi

Muro (Eje 3)

Se tomaron medidas en tres puntos (extremos y centro del muro), el martillo se posicionó horizontalmente.

Primer punto (extremo derecho)				
46	42	40	28	40
40	38	38	40	38

Promedio	39
Límite inferior	33
Límite superior	45

Medidas descartadas	2
Promedio nuevo	40

Continuación del apéndice 2.

Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene fc	4 500 psi
Dispersión	800 psi

Segundo punto (centro)				
40	42	42	38	40
40	38	38	38	46

Promedio	40
Límite inferior	34
Límite superior	46

Medidas descartadas	0
Promedio nuevo	40

Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene fc	4 500 psi
Dispersión	800 psi

Tercer punto (extremo izquierdo)				
40	42	36	38	38
45	40	39	37	40

Promedio	40
Límite inferior	34
Límite superior	46

Medidas descartadas	0
Promedio nuevo	40

Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene fc	4 500 psi
Dispersión	800 psi

Continuación del apéndice 2.

Losa

Se tomaron medidas en tres puntos (extremos y centro de la longitud total), el martillo se posicionó verticalmente

Primer punto				
32	36	40	36	30
36	38	38	36	22

Promedio	35
Límite inferior	29
Límite superior	41

Medidas descartadas	0
Promedio nuevo	35

Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene f_c	4 600 psi
Dispersión	800 psi

Segundo punto				
38	36	38	36	30
36	32	38	38	30

Promedio	35
Límite inferior	29
Límite superior	41

Medidas descartadas	0
Promedio nuevo	35

Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene f_c	4 600 psi
Dispersión	800 psi

Continuación del apéndice 2.

Tercer punto				
36	32	32	36	30
32	38	39	32	40

Promedio	35
Límite inferior	29
Límite superior	41

Medidas descartadas	0
Promedio nuevo	35

Utilizando la gráfica del martillo (apéndice 1) se obtiene f_c	4 600 psi
Dispersión	800 psi

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Fotografías de la realización de la toma de datos en el puente Motagua**



Continuación del apéndice 3.



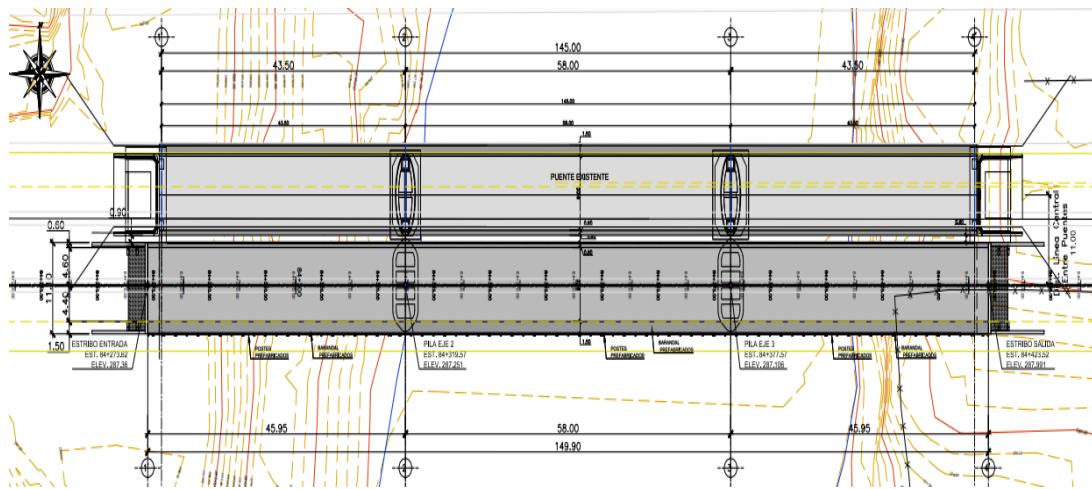
Continuación del apéndice 3.



Fuente: elaboración propia

ANEXOS

Anexo 1. Planta del puente existente y del puente Motagua

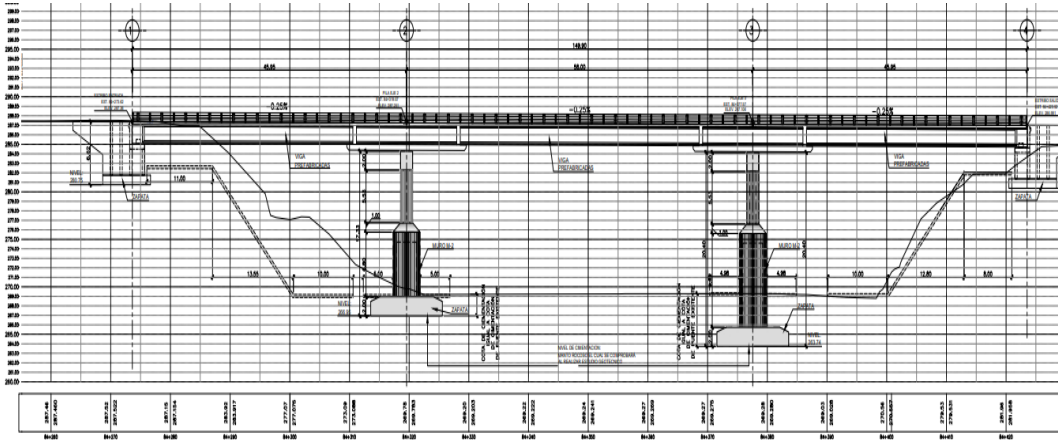


Fuente: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Dirección General de Caminos. *Plano de planta del puente existente y del puente Motagua.*

[http://snip.segeplan.gob.gt/share/SCHE\\$SINIP/PLANOS_DISENOS/24234-CWKMCMAXKJ.pdf](http://snip.segeplan.gob.gt/share/SCHE$SINIP/PLANOS_DISENOS/24234-CWKMCMAXKJ.pdf)

Consulta: agosto de 2020.

Anexo 2. Perfil del puente Motagua



Fuente: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Dirección General de Caminos. *Plano vista perfil del puente Motagua.*

[http://snip.segeplan.gob.gt/share/SCHE\\$SINIP/PLANOS_DISENOS/24234-CWKMCMAXKJ.pdf](http://snip.segeplan.gob.gt/share/SCHE$SINIP/PLANOS_DISENOS/24234-CWKMCMAXKJ.pdf)

Consulta: agosto de 2020.