

MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES DE ALTURA.
CASO LATINOAMERICA

LUIS CARLOS SUAREZ ORTIZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2019

MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES DE ALTURA.
CASO LATINOAMERICA

LUIS CARLOS SUAREZ ORTIZ

Proyecto de Grado para optar el título Especialista en Estructuras

DIRECTOR

ALVARO VIVIESCAS JAIMES

Doctor en Ingeniería de la Construcción

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA

2019

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS.	14
2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE MONITOREO.....	18
3. SENSORES	20
3.1 ACELEROMETRO.....	20
3.2 ACELEROGRAFOS.....	21
3.3 SISMOMETRO	22
3.4 RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE.....	24
3.5 TERMOGRAFIA.....	24
3.6 EXTENSOMETRIA	25
3.7 ULTRASONIDOS.....	26
3.8 IMPACTO ECO.....	26
4. EXPERIENCIAS DE MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS EN LATINOAMERICA.....	27
4.1 CHILE	28
4.1.1 Cámara Chilena de la Construcción.	28
4.1.2 Torre Central de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.....	30
4.1.3 Titanium la Portada.	33
4.2 PERÚ.....	36
4.2.1 Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC- UNI) (Perú).....	36

4.2.2 Respuesta Sísmica.	38
4.3 MEXICO	40
4.3.1 Torre Central de Telecomunicaciones Telecomm.....	40
4.4 COLOMBIA	48
4.4.1 Edificio de Bogotá, Interacción Suelo-Estructura.	48
 5. NORMATIVIDAD	 54
5.1 CHILE.	54
5.2 PERU	54
5.3 MEXICO.....	55
5.4 COLOMBIA.....	55
 6. RECOMENDACIONES PARA EL DESARROLLO DEL MSE EN EDIFICACIONES DE BUCARAMNGA	 58
 7. CONCLUSIONES	 62
 BIBLIOGRAFIA.....	 64

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variación de la aceleración (o el desplazamiento) en función de la relación de los períodos de oscilación del edificio y del sismo	14
Figura 2. Grietas en un muro analizada mediante termografía.....	24
Figura 3. Galga extensiometrica	25
Figura 5. Ensayo de impulso Eco, aplicación y esquema de funcionamiento	26
Figura 6. Edificio Cámara Chilena de la Construcción vistas y disposición de acelerómetros	28
Figura 7. Registro terremoto (M=8.8) obtenidos en el cielo piso 18.....	29
Figura 8. Variación parámetros dinámicos. Terremoto (M=8.8) del 27 de febrero de 2010.....	29
Figura 9. Edificio torre central Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Vistas y disposición de acelerómetros.....	31
Figura 10. (a) Variación de la frecuencia (periodo) de la estructura en función de la temperatura. (b) Variación del amortiguamiento de la estructura en función de la estructura (estas muestras fueron tomadas el 3 de julio 2009 y el 26 de febrero de 2010).....	32
Figura 11. Variación parámetros dinámicos. Terremoto (M=8.8) del 27 de febrero de 2010. Torre Central.....	32
Figura 12. Titanium la portada. Proceso constructivo.	33
Figura 13. Secuencia constructiva Titanium la portada.	34
Figura 14. Variación de frecuencias (periodo) durante proceso constructivo. Titanium La portada	35
Figura 15. Bloque G de la facultad de ingeniería Civil de la UNI.	36
Figura 16. Red de monitoreo	37
Figura 17. Localización de sensores en FIC-UNI.....	38
Figura 18. Registro de aceleración	40

Figura 19. Vista del edificio Telecomm	41
Figura 20. Ubicación y dirección de los sensores	42
Figura 21. Vista en planta del edificio instrumentado.....	43
Figura 22. Acelerogramas obtenidos durante el sismo del 14 de junio del 2004 (M=5.8)	45
Figura 23. Acelerogramas obtenidos durante el sismo del 18 de agosto del 2004 (M=5.7)	46
Figura 24. Planta tipo de edificio estudio	48
Figura 25. Aceleraciones medidas en la dirección NS sobre el extremo sur-oeste de la edificación	50
Figura 26. Forma modal fundamental dirección NS.....	50
Figura 27. Aceleraciones medidas en la dirección NS sobre el extremo sur-oeste de la edificación	51
Figura 27. Frecuencias principales de vibración detectadas en el suelo	52
Figura 28. Función de transferencia entre la base y el techo del edificio (EW)	53
Figura 29. Modelo de 2 grados de libertad Estructura-Suelo.....	53
Figura 30. Niveles de inspección en los puentes.	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de ensayos no destructivos según el tipo de energía empleada	23
Tabla 2. Variación de parámetros dinámicos pre y pos terremoto utilizando microvibraciones ambientales.....	30
Tabla 3. Especificaciones del sensor	36
Tabla 4. Lista de los eventos sísmicos más fuertes registrados	38
Tabla 5. Máxima aceleración registrada en la base el edificio	39
Tabla 6. Características de los registradores.....	44
Tabla 7. Ubicación, tipo y dirección de los sensores	44
Tabla 8. Resumen de las aceleraciones obtenidas en el edificio Telecomm	47

RESUMEN

TITULO: MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES DE ALTURA. CASO LATINOAMERICANO.*

AUTOR: LUIS CARLOS SUAREZ ORTIZ**

PALABRAS CLAVES: Monitoreo de edificaciones, Comportamiento dinámico, Red de instrumentación.

DESCRIPCIÓN:

Actualmente, en Colombia específicamente en Bucaramanga hay un crecimiento en la construcción de edificios de gran altura, el monitoreo de la salud estructural hoy en día, con las nuevas tecnologías permite controlar la veracidad de las hipótesis realizadas en la construcción de una estructura, conocer su comportamiento y poder hacer retroalimentación basándose en los resultados obtenidos para así tomar las medidas pertinentes y decisiones más precisas.

En esta investigación se presenta la experiencia Latinoamericana en la implementación de sistemas de instrumentación para el monitoreo de la salud estructural en edificios, de países expuestos a amenazas sísmicas que requieren de información permanente y confiable sobre de los posibles efectos que estos movimientos naturales causan en las edificaciones. El estudio se inicia con el funcionamiento del MSE, las diferentes tecnologías utilizadas, la caracterización de edificaciones en Chile, México, Perú y Colombia y el análisis de las normas y/o reglamentos de los procesos de monitoreo estructural en cada país. Así mismo, se describen algunos de los dispositivos más usados para el control de respuesta sísmica, instrumentos que permiten a los ingenieros estructurales tener información real del comportamiento de las estructuras, analizar su ciclo de vida, detectar cambio causados por posibles daños y establecer planes de mantenimiento.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras. Director: Alvaro Viviescas Jaimes. Doctor en Ingeniería de la Construcción.

ABSTRACT

TITLE: STRUCTURAL HEALTH MONITORING IN HEIGHT BUILDINGS. LATIN AMERICAN CASE.*

AUTHOR: LUIS CARLOS SUAREZ ORTIZ**

KEYWORDS: Building Monitoring, Dynamic behavior, Instrumentation Network.

DESCRIPCIÓN:

Currently, in Colombia specifically in Bucaramanga, there is a growth in the construction of high-rise buildings. Nowadays, Structural Health Monitoring with new technologies allows to control the hypotheses' veracity made in the construction of a structure, to know its behavior and be able to have feedback based on the results obtained in order to take the pertinent measures and more precise decisions.

This research presents the Latin American experience in the implementation of instrumentation systems for Structural Health Monitoring in buildings on countries that are exposed to seismic threats that require permanent and reliable information about the possible effects that these natural movements cause in the buildings. The study begins with the operation of the MSE, several technologies used, building characterization in Chile, Mexico, Peru and Colombia, and the analysis of norms and / or regulations of structural monitoring processes in each country. In addition, some of the most used devices for seismic response control are described, instruments that allow structural engineers to have real information on the structures' behavior, to analyze their life cycle, to detect changes caused by possible damage and to establish plans for maintenance.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras. Director: Alvaro Viviescas Jaimes. Doctor en Ingeniería de la Construcción.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la salud estructural no es una prioridad para los países en vía desarrollo donde las comodidades básicas de supervivencia son más importantes. Sin embargo, el monitoreo de la salud estructural ha tenido gran desarrollo para los países en desarrollo, especialmente aquellos donde las amenazas naturales como los sismos tienen gran incidencia en ciudades como Singapur, Mumbai y Hong Kong, donde cualquier falla de infraestructura podría ser devastadora para su sociedad y economía¹⁻².

Esto refiere que las obras de construcción, por ejemplo, edificios, puentes, carreteras, túneles, entre otras, son elementos importantes para el desarrollo competitivo de las ciudades. Las obras civiles mencionadas generan elementos estratégicos en la seguridad de las personas, el comercio, la prestación de servicios públicos, las redes de transporte, etc. Las estructuras son sometidas a deterioro a lo largo de la vida útil por diferentes aspectos como el paso del tiempo, el incremento de las cargas, además, la influencia de los cambios en el entorno, las condiciones climáticas y los fenómenos naturales como, socavación, sismos, agentes ambientales, contaminación influyen en su vida útil; causan en situaciones extremas colapsos y errores que pueden tener consecuencias nefastas. Adicionalmente, fallas en el diseño que también generan inadecuados resultados³.

En los últimos años, consecuencia de la escasez de terreno urbanizable y el crecimiento poblacional, se ha presentado un incremento en las construcciones verticales a gran altura (edificaciones) en Bucaramanga y su área metropolitana,

¹ MAHESHWARI, Muneesh, et al. Combined Fiber Bragg Grating and Fiber Optic Polarimetric Sensors on a Single Fiber for Structural Health Monitoring of Two-Dimensional Structures. *Structural Health Monitoring*, 2016, vol. 15, no. 5, pp. 599–609, doi:10.1177/1475921716654132.

² SOHN, H., et al. A Review of Structural Health Monitoring Literature form 1996-2001. *Los Alamos National Laboratory report LA-13976-MS*, 2004.

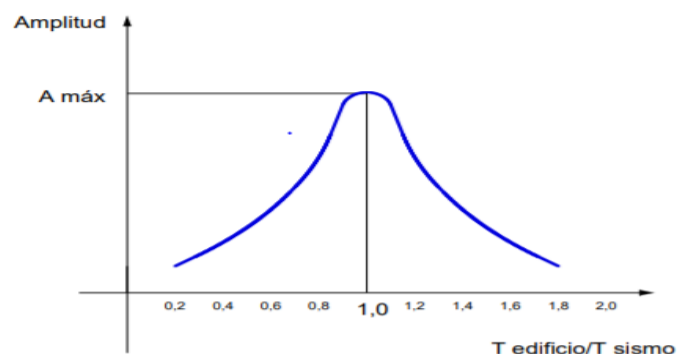
³ UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. *Concepto técnico en relación a las causas más probables del colapso del edificio Space*. Medellín, Colombia: Alcaldía de Medellín, 2014.

región caracterizada por alta amenaza sísmica. Este tipo de construcciones son de gran importancia debido a la relevante función que desempeñan en la sociedad, surge la necesidad de monitorear su constitución estructural, estudiar su comportamiento a través de su vida útil, identificar los posibles daños y planificar un mantenimiento adecuado. Este monitoreo se puede realizar a través de la caracterización de las propiedades dinámicas de la estructura. Por tal razón, este es un problema importante y seguimiento a desarrollar en el presente documento.

1. MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS.

Las alteraciones o cambios en las propiedades físicas de las estructuras provocan modificaciones en las propiedades dinámicas, es decir, cuando se tiene incidencias dinámicas sobre estructuras, los elementos que forman el sistema resistente en las edificaciones como los cimientos, columnas, muros portantes, vigas y entrepisos, pueden sufrir fallas que afectan su funcionalidad. Además, la respuesta dinámica de una edificación durante un sismo depende de la relación entre el período de vibración de las ondas sísmicas y su propio periodo de vibración. En la medida en que los dos períodos igualen sus valores, la edificación entra en resonancia, aumentando significativamente las deformaciones y aceleraciones, en consecuencia, los esfuerzos en sus elementos estructurales⁴⁻⁵. (Ver figura 1).

Figura 1. Variación de la aceleración (o el desplazamiento) en función de la relación de los períodos de oscilación del edificio y del sismo⁶.



En respuesta al anterior problema, surge una tendencia innovadora que es el monitoreo de la salud estructural. El monitoreo consiste en la medición de las cargas externas e internas y las reacciones que estas producen en la estructura, a

⁴ MAHESHWARI, Muneesh, et al., Óp. Cit.

⁵ DOMÍNGUEZ-CAICEDO, Mauricio. Períodos de vibración de las edificaciones. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 1-13.

⁶ Ibíd.

través del procesamiento de la información y análisis de los resultados que establece el comportamiento real de la estructura; esta técnica permite acciones destinadas a proporcionar mantenimiento, reparación, reemplazo de los elementos de una estructura para reducir la incertidumbre, lo cual fomenta el desarrollo de construcciones confiable, seguras y durables⁷.

La monitorización de salud estructural se ha desarrollado desde finales del siglo XIX, cuando los operarios de las vías terrestres escuchaban las emisiones acústicas de la misma a fin de detectar fallas o grietas⁸⁻⁹. Estos métodos de reconocimiento visual o auditivo, son las alternativas más utilizadas cuando se carece de la tecnología para realizar un estudio adecuado. Debido al avance tecnológico de los últimos 30 años, se han desarrollado varias técnicas basadas en principios físicos y análisis más profundos¹⁰.

A inicios del siglo XX se utilizaron muchos dispositivos para medir magnitudes físicas como por ejemplo la temperatura, la presión, la humedad del aire, presión sonora, el caudal o la luz; durante la segunda guerra mundial los Estados Unidos, Gran Bretaña y Alemania desarrollaron transductores en la región del infrarrojo, estos dispositivos iniciales permitieron el desarrollo de modernos scanner ópticos-mecánicos, radiómetros y espectrómetros, los cuales eran capaces de medir variables que no podían detectar los seres humanos, como diversas partes no visibles del espectro electromagnético y la radiación infrarroja¹¹.

A mediados de la década de los 40 era un desafío pensar en una construcción dotada con sensores que permitieran conocer su comportamiento estructural, no

⁷ KRAKHMAL'NY, S.I. EVTUSHENKO, M.P. KRAKHMAL'NAYA. *New System of Monitoring of a Condition of Cracks of Small Reinforced Concrete Bridge Constructions*. Platov, Russian: International Conference on Industrial Engineering, ICIE, 2016.

⁸ ABE, M., et al. *Monitoring of a Long Span Suspension Bridge by Ambient Vibration Measurement*. Palo Alto, California: Structural Health Monitoring, Stanford University, 2000.

⁹ AGNENI, A.; CREMA, L.B.; and MASTRODDI, F. *Damage Detection from Truncated Frequency Response Functions*. Madrid, Spain: European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, 2000.

¹⁰ [SOHN, H., et al. *Op. Cit.*

¹¹ JEREZ, C. A. R. Metodología de monitoreo de daño estructural para puentes simplemente apoyados: implementación numérica. *Medellín: Revista Facultad de Ingeniería*, 2007, no. 39.

solo por el elevado precio de estos mecanismos, sino más bien por la falta de sistemas de adquisición de datos que fueran compatibles con los mismos y la capacidad de las computadoras para manipular, almacenar y procesar información. No obstante, en los laboratorios se hacían los avances más representativos al tratar de conocer con mayor exactitud, las propiedades mecánicas de algunos materiales tales como el concreto y el acero, los cuales se emplean en la construcción, así como también, la fabricación de herramientas y maquinarias.

A lo largo de la década de 1970, Japón, Estados Unidos y la Unión Soviética ocuparon los primeros puestos entre las naciones industriales , el crecimiento económico revivió industria como el acero, la construcción e impulso la industria de las telecomunicaciones, las computadores se volvieron cada vez más vitales , la información se convirtió en un importante recurso y producto para la riqueza y el poder, surge entonces una economía basada en la información, la cual desde ese entonces ha estado liderada por importantes investigaciones en tecnología altamente sofisticada¹².

Junto a esta expansión económica y tecnológica , estos países, principalmente Japón, sufre los desastres naturales más catastróficos por la actividad sísmica en sus territorios, como respuesta de mitigación a estos fenómenos naturales, surge la necesidad de desarrollar dispositivos que busquen proteger las estructuras y es a partir de estas circunstancias, que en los años 90 se da inicio al desarrollo de las primeras aplicaciones del monitoreo de la salud estructural y el impulso a los primeros sistemas de monitoreo para puentes en países como Japón, China y Corea¹³.

En los últimos años, las estructuras civiles se han visto obligadas a tener un sistema

¹² JEREZ, C. A. R., Óp. Cit.

¹³ WANG, B.; ZHANG, Z.; HE, C.; y ZHENG, H. Implementation of a long-term monitoring approach for the operational safety of highway tunnel structures in a severely seismic area of China. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, vol. 24, no. 11, pp. 1-18.

de monitoreo de la salud estructural para calcular el estado y definir rápidamente un nivel de seguridad. Los sistemas de monitoreo tradicionales están compuestos por redes de sensores distribuidos a lo largo de la estructura a ser monitoreada y conectada a una unidad central de adquisición y procesamiento¹⁴.

Las estructuras de ingeniería en este caso, las edificaciones presentan dos tipos de daño, el daño repentino y el daño acumulativo. El primero de los daños mencionados es causado por accidentes; de modo que su evaluación debe ser inmediata para mejorar la situación. Por otro lado, el daño acumulativo ocurre gradualmente y se da producto de la naturaleza, en cierta medida estos, afectan a la seguridad y el uso de la estructura¹⁵.

El hecho de monitorear la estructura ayuda a tomar decisiones oportunas, precisas y preventivas con el objetivo de evitar otros accidentes y costos adicionales en el mantenimiento. El daño acumulativo ocasiona fallas a largo plazo, dando la opción de actuar y tomar medidas según correspondan. Por lo cual, es importante establecer un seguimiento estructural de la edificación.

En referencia a lo anterior, se hace necesario describir el funcionamiento del sistema de monitoreo de la salud estructural.

¹⁴ FEDERICI, Fabio, et al. *Design of Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring applications*. Italia: Euro Sensors, the XXVIII edition of the conference series, 2014.

¹⁵ XIAODAN, F. Design and implementation of remote health monitoring system for 3D visual Bridge. *China: Procedia Engineering*, no. 174, 2017.

2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE MONITOREO

El monitoreo de la salud estructural contribuye a detectar la presencia de fallas o daños en la estructura a partir de la identificación de variación de los parámetros de referencia respecto a una línea de base, a través de métodos de modelación analítica y de interpretación de datos. El monitoreo de la salud de una estructura se basa en la comparación de sus propiedades en diferentes estados de su ciclo de vida¹⁶. Además, proporciona información sobre el comportamiento de las estructuras, que puede ser comparada con la modelación del análisis estructural de elementos finitos. De otro lado, los métodos basados en el cambio de frecuencias naturales y modos de vibración, de especial relevancia en zonas de alta amenaza sísmica, sirven para detectar tanto daños locales como globales.

La escala de daño en estructuras puede ser categorizadas en cuatro niveles¹⁷:

Nivel 1: Identificación la presencia del daño

Nivel 2: Ubicación del daño

Nivel 3: Magnitud y cuantificación del daño

Nivel 4: Predicción de la vida útil de la estructura

El primer paso se tiene la ubicación óptima de los sensores utilizando el concepto de matriz de información de Fisher, en el segundo y tercer paso se utilizan fuentes de excitación ambiental para la identificación del sistema y el último paso emplea el enfoque probabilístico bayesiano para detectar sitios de daño estructural. Se han hecho muchos intentos para implementar el sistema, pero todavía es difícil lograr los cuatro niveles propuestos por Rytter¹⁸.

¹⁶ VIVIESCAS, A.; CARRILLO, J.; y VARGAS, L. Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental. *INGE CUC*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 52-65.

¹⁷ RYTTER, A. *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Denmark: Dissertation, Aalborg University, Department of Building Technology and Structural Engineering, 1993.

¹⁸ Ibid.

En la actualidad, el avance de las técnicas para detectar, localizar y cuantificar el daño en las estructuras se basa en observar y comparar su conducta antes y después de ser sometidas a pruebas de vibración ambiental (PVA) que se producen por el uso de la estructura, empujes de viento y micro vibraciones. Otra prueba es la vibración forzada (PVF) la cual la estructura es excitada por vibraciones constantes que tiene un control de velocidad preciso. Otro ensayo denominado prueba con registros sísmicos (PRS), consiste en registrar por medio de acelerógrafos los movimientos provocados por los sismos. Las anteriores técnicas simplifican los procedimientos de inspección de daños, ya que permiten al ingeniero hacer la cuantificación sin inspección visual o directa de la estructura¹⁹⁻²⁰.

¹⁹ MURIÁ, David y GONZÁLEZ, Ricardo. Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. *México: Revista de Ingeniería Sísmica*, 1995, no. 51, pp. 25-45.

²⁰ TRIFUNAC, Mihailo. Comparisons between ambient and forced vibration experiments. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1972, vol. 1, pp. 133-150.

3. SENSORES

El equipo empleado en el MSE son transductores o sensores, acondicionadores de señal, dispositivos para adquisición de datos y soportes físico y lógico (hardware y software) para la interpretación. Los transductores más usados son: acelerómetros (uniaxiales, biaxiales o triaxiales), termocuplas, extensómetro, detectores de resistencia/temperatura, transformadores lineales de voltaje/desplazamiento y detectores de corrosión. Frecuentemente se instalan los sensores en la estructura y se transmiten las señales por radio, microondas, línea telefónica o fibra óptica hasta una central donde se realiza la interpretación de los datos²¹.

3.1 ACELEROMETRO

Los acelerómetros son dispositivos electromecánicos que detectan las fuerzas de aceleración, ya sea estática o dinámica. Las fuerzas estáticas incluyen la gravedad, mientras que las fuerzas dinámicas pueden incluir vibraciones y movimiento.

Los acelerómetros pueden medir la aceleración en uno, dos o tres ejes²².

A continuación, se describe las características de los acelerómetros:

- Resistencia al impacto
- Resistencia al ruido
- Rango dinámico
- Sincronización del tiempo en medición de múltiples nodos
- Interfaz (Análoga, Digital o Modulación de ancho de pulso PWM)
- Detección (golpe, vibración y caída libre)

²¹ PÉREZ-CARDOZO, Miguel. Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 349 Sanfandila, Qro., 2012.

²² BERNARD, A. y TOUBOUL, P. The Gradio Accelerometer: Design and Development Status. ESA SP-329, 1991, pp. 61-67.

Los acelerómetros se utilizan para monitorear el estado de estructuras (tales como edificios, estructuras de calzadas, puentes, túneles y torres de acero), como así también para detectar terremotos, medir vibraciones ambientales, monitorear equipos industriales y vehículos no tripulados (por ejemplo, vehículos terrestres y sondas submarinas). Además, resulta útil para medir la vibración y el recorrido de vehículos y equipos industriales.

3.2 ACELEROGRAFOS

Los acelerógrafos son instrumentos electromecánicos. diseñados especialmente para registrar las aceleraciones del terreno o estructura, arriba de un nivel prefijado, en tres direcciones ortogonales. La sensibilidad del disparo puede ajustarse en un rango limitado según las características del lugar de operación; típicamente es de 0.01 g, siendo g la aceleración de la gravedad. Un acelerógrafo puede referirse tanto a un sismógrafo de movimientos fuertes como aun acelerómetro de terremotos. Son normalmente construidos en una caja autónoma, y ahora suelen ser conectados de forma directa al internet²³. En el siguiente párrafo, se describe las características de los acelerógrafos:

- Medio de registro
- Velocidad de registro
- Trazas registradas
- Arrancador
- Marcas de tiempo por segundo
- Tiempo adicional de registro
- Intervalo de trabajo
- Frecuencia natural
- Amortiguamiento
- Tipo de amortiguamiento

²³ MORA, Ignacio; MURÍA, Dacid; y FRONTANA, Bernando. *Acelerógrafos a cargo del instituto de ingeniería: Características y algunos resultados*. Guadalajara: Memorias V Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 1979, Jal. 31.

Los acelerógrafos no son usados convencionalmente para la localización de los sismos. Sin embargo, el desarrollo tecnológico presente lo ha permitido y, de hecho, la mayoría de los sistemas de alerta temprana están basados en el uso de este tipo de instrumentos²⁴.

3.3 SISMOMETRO

Un sismómetro es un instrumento usado para medir movimientos de la Tierra y consiste de un sensor que detecta el movimiento telúrico que está conectado a un sistema de registro. Los sismómetros que son usados en estudios de terremotos son diseñados para ser muy sensibles a los movimientos de tierra; por ejemplo, movimientos tan pequeños como 1/10.000.000 de centésima (distancias casi tan pequeñas como espacios atómicos) pueden ser detectados en lugares extremadamente quietos. Los terremotos más grandes, tales como el de las islas Sumatra - Andaman con una magnitud de 9.1 en el 2004, generan movimientos terrestres alrededor del planeta Tierra que pueden tener varios centímetros de crecimiento²⁵.

En la tabla 1 se observa diferentes tipos de sensores con tecnologías sofisticadas que arrojan información cuantitativa de las anomalías detectadas en la estructura.

²⁴ GUPTA, I. D. Using strong-motion accelerograms for estimation of local magnitudes of earthquake in Himalayan region. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 2000, vol. 37, no. 398, pp 1-10.

²⁵ SAUTER, F. *Fundamentos de Ingeniería Sísmica: Introducción a la Sismología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2007.

Tabla 1. Clasificación de ensayos no destructivos según el tipo de energía empleada²⁶.

TIPO DE ENERGIA	CLASE DE ENSAYO	APLICACIONES
Ondas elásticas	Sónico a resonancia	Calidad y resistencia - determinación de E, σ y $\tan \delta$
	Ondas de choque	Determinación de E, σ y $\tan \delta$
	Ultrasónico	Determinación de E, σ y $\tan \delta$
	Vibraciones	Resistencia y uniformidad
Acciones mecánicas	Esclerométrico	Dureza Superficial - Resistencia
	Extensométrico	Deformación puntual
	Transformaciones	Deformación, alargamientos en bases
	Diferenciales	Grandes, radios de curvatura
	Cuerdas vibrantes	Deformaciones, alargamientos en bases grandes, radios de curvatura
	Pequeños desplazamientos	Pequeños desplazamientos o deformaciones dinámicas superficiales
Fuerzas capilares	Penetrantes	Determinación de fisuras - tintas magnéticas, Fluorescentes o radiactivas
Eléctrica y electromagnética	Resistencia ohmica	Humedad
	Dieléctrico	Proceso de fraguado
	Corrientes parásitas	Estudio de metales
Magnética	Inductivo	Localización de defectos en alambres de acero para pretensado
	Reductancia	Localización de armaduras en el hormigón
	Resonancia magnética	Humedad en pasta de cemento
Ondas Acústicas	Nivel sonoro	Microestructura del hormigón
Luminosa	Observación visual	Estado superficial de los materiales
	Barnices	Fisuración y tensiones - barnices craquelados
	Fotoelasticidad y Fotoelasticimetría	Tensiones y deformaciones en materiales no fotoelásticos
	Ultravioleta	Actividad hidráulica de escorias
Radiaciones nucleares	Absorción de rayos	Densidad de materiales y suelos
	Neutrones	Humedad de materiales
	Gammaografía	Calidad del material
	Neutrones lentos	Radiorografía con neutrones

A modo de ejemplo se revisan con detalle algunos ensayos no destructivos con monitoreo estructural:

²⁶ TOBIO, J. *Ensayos no destructivos, métodos aplicables a la construcción*, citado por MONTEAGUDO, S. *Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos*. [Tesis Máster Estructuras]. Madrid: Univ. Politécnica de Madrid, 2010.

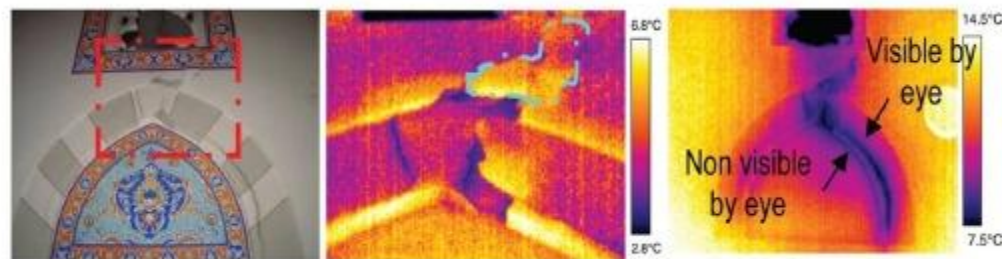
3.4 RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE.

El GPR (Ground Penetrating Radar) es un método basado en impulsos de ondas electromagnéticas, que permiten el reconocimiento y la localización de áreas defectuosas en estructuras. El equipo contiene un sistema de control; una computadora que se conecta a través de antenas que son desplazadas por la superficie de la estructura que se va analizar; proporciona información sobre elementos y materiales de la estructura. Las ondas electromagnéticas son sensibles a interfaces con agua y las ondas acústicas lo son a interfaces con aire²⁷.

3.5 TERMOGRAFIA

Es una prueba electromagnética que utiliza la radiación infrarroja. Estudia materiales a través de temperaturas e imágenes mediante visión térmica que se ilustra en la figura 2. Este ensayo revela las armaduras ocultas (acero de refuerzo) a través de imágenes infrarrojas, además detecta antes de tiempo desprendimientos de revestimiento de muros, vigas y columnas y toma las medidas oportunas para su conservación.

Figura 2. Grietas en un muro analizada mediante termografía²⁸.



²⁷ MONTEAGUDO, S. *Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos*. [Tesis Máster Estructuras]. Madrid: Univ. Politécnica de Madrid, 2010.

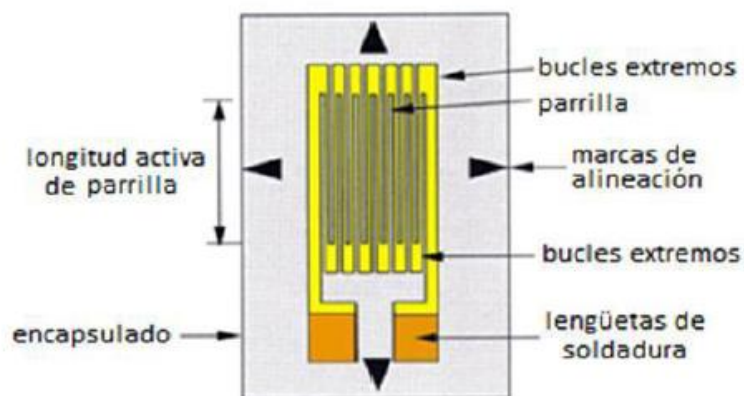
²⁸ TAVUKCUOGLU, A.; AKEVREN, S.; y GRINZATO, E. In situ examination of structural cracks at historic masonry structures by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing. *Journal of Modern Optics*, 2010, vol. 57, no. 18, pp. 1779–1789.

Las inspecciones se realizan en diferentes horarios del día, por ejemplo, un edificio con muros de carga, la prueba se hace en la noche debido a que el espesor aumenta el máximo volumen de almacenamiento de calor para mayor eficacia de la termografía. Lo contrario ocurre en el interior del edificio, la inspección se ejecuta en la mañana porque el edificio está a mayor temperatura que en el exterior y se produce el contraste de temperaturas²⁹.

3.6 EXTENSOMETRIA

Mide la tensión de un elemento y consiste en aplicar una fuerza mecánica sobre un material conductor. Mediante el uso de galgas extensiométricas como se muestra en la figura 3, que son sensores que miden la fuerza ejercida sobre el material al cual son adheridos a partir de la deformación resultante. En este tipo de pruebas la galga se adhiere al elemento cuya deformación se quiere analizar mediante un adhesivo. Según se deforma el elemento se deforma la lámina, ocasionando de esta manera una variación de la resistencia eléctrica que viene dada por su longitud, forma y coeficiente de resistividad³⁰.

Figura 3. Galga extensiométrica³¹.



²⁹ MONTEAGUDO, Óp. Cit.

³⁰ SALAZAR, J. Diseño e implementación de un sensor de fuerza de 6 grados de libertad. [Tesis Magister]. Barcelona: Automática & Robótica, Univ. Politécnica de Catalunya, 2011.

³¹ Ibid.

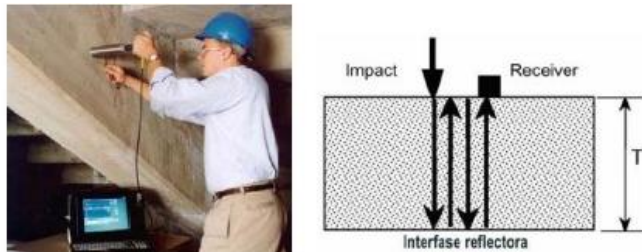
3.7 ULTRASONIDOS

Se fundamenta en el fenómeno físico de la propagación de ondas acústicas de alta frecuencia (frecuencias superiores a 20 kHz) en un medio material, se utiliza para determinar la homogeneidad de algún elemento, su espesor, su módulo elástico, presencia de vacíos, de grietas u otras imperfecciones. La ventaja de este método radica, en que con una única medida se puede obtener un valor representativo, a pesar de que no permite evaluar la resistencia del concreto directamente, pero con curvas de convergencia permite dar una estimación de la resistencia con una precisión de más o menos del 20%³².

3.8 IMPACTO ECO.

El Impacto-eco es una prueba para la evaluación del concreto que envía ondas de tensión a través del elemento ensayado. El impacto hace que la muestra vibre en un modo de flexión y un transductor de velocidad (geófono), generalmente su uso es para mediciones del espesor en losas y vigas; determinación de la ubicación y magnitud de fallas como grietas y fallas de curado en estructuras de concreto reforzado y pretensadas³³. En la figura 4, se observa un claro ejemplo de aplicación del ensayo y modelo del funcionamiento del mismo.

Figura 5. Ensayo de impulso Eco, aplicación y esquema de funcionamiento³⁴.



³² HENRY, J. *Optimización del control de la resistencia del hormigón de la obra de la depuradora del Besós mediante ultrasonidos*. [Tesis Pregrado]. Barcelona: Univ. Politécnica de Catalunya, departamento de la construcción, 2003.

³³ LOMBILLO, I.; et al. Evaluación no destructiva del patrimonio construido. *Revista internacional Construlin*, 2008, vol. 6, no. 16, pp. 40-53

³⁴ Ibid.

4. EXPERIENCIAS DE MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS EN LATINOAMERICA

A continuación, se presentan diferentes casos de sistemas de instrumentación en Latinoamérica. Los equipos más utilizados en esta instrumentación son los sensores de aceleración (acelerómetros) que emplean diferentes tipos de señales como vibración ambiental, vibraciones forzadas y temblores de diferentes magnitudes (en el caso monitoreo continuo).

En la revisión de artículos científicos en Latinoamérica, cabe resaltar que en Colombia específicamente hay poca documentación de monitoreo de la salud estructural en edificios. Uno de ellos, de monitoreo estructural continuo es la edificación Hernando Arellano Ángel de la Universidad Javeriana³⁵. En Colombia se ha realizado monitoreo estructural en puentes. En el siguiente apartado se citan casos de instrumentación de monitoreo estructural en Chile, Perú y Mexico.

Los casos mencionados a continuación, son un tipo de monitorio estructural llamado monitoreo continuo que desarrolla mediciones a largo plazo (comportamiento dinámico de la estructura, daño acumulativo) y corto plazo (detección de daño, seguimiento de construcción de edificaciones), donde se registran desde pequeñas vibraciones a eventos sísmicos. Dependiendo de lo que se quiere hacer con este tipo de monitoreo a continuación presentamos algunas aplicaciones del monitoreo de la salud estructural.

³⁵ RUIZ, Daniel. *Referente Nacional en Sistema de instrumentación sísmica*. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería, 2015.

4.1 CHILE

4.1.1 Cámara Chilena de la Construcción. Los sensores que se distribuyeron en la Cámara Chilena de la Construcción, registran aceleraciones ya sea por micro-vibraciones o eventos sísmicos. Este sistema monitoreo registro un terremoto de magnitud de 8,8 el 27 de febrero de 2010, en el cual, la estructura presento variación de las propiedades dinámicas.

El edificio de la Cámara Chilena de la Construcción (ver figura 6.), posee una estructuración en base a muros y marcos de hormigón. Cuenta con 20 pisos y 4 subterráneos, y una altura de 85,5 metros. Desde 1997 tiene una red de 12 sensores que registran aceleraciones en la estructura. El sistema de obtención de datos permite registrar desde micro-vibraciones ambientales a eventos sísmicos de consideración³⁶.

Figura 6. Edificio Cámara Chilena de la Construcción vistas y disposición de acelerómetros³⁷.



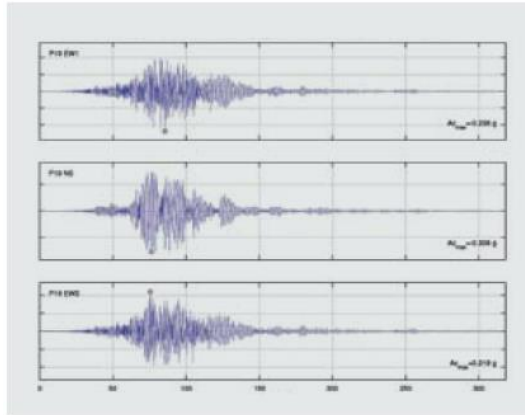
El monitoreo de la salud estructural del edificio registró el Terremoto de magnitud

³⁶ RENADIC – UCH. Edificio de la Cámara chilena de la construcción. [En línea]. Santiago de Chile: Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2010. Disponible en: <http://www.terremotosuchile.cl/anexos/camara2.html>.

³⁷ Ibíd.

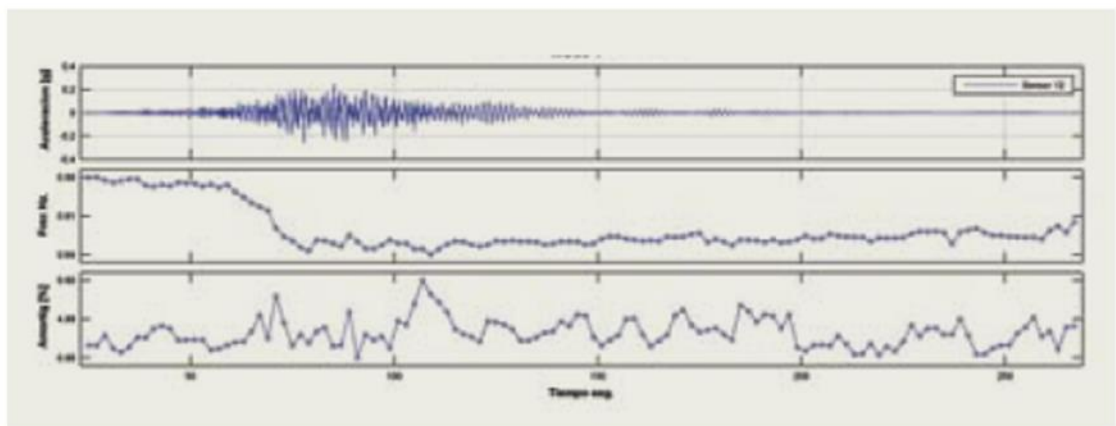
8,8 que afectó recientemente la zona centro sur de Chile en la figura 7, entregando importantes resultados respecto a la variación de las propiedades dinámicas del edificio.

Figura 7. Registro terremoto (M=8.8) obtenidos en el cielo piso 18³⁸.



En la figura 8. Se muestra la variación de la frecuencia natural, el amortiguamiento durante el evento.

Figura 8. Variación parámetros dinámicos. Terremoto (M=8.8) del 27 de febrero de 2010³⁹.



³⁸ BOROSCHEK, Rubén, et al. *Investigación edificios emblemáticos diagnostico e identificación de daño estructural*. Chile, 2010.

³⁹ *Ibíd.*

Se observa que hubo una variación del 27% en la frecuencia de vibrar, y un aumento del amortiguamiento que alcanzó valores puntuales sobre el 9%. Para corroborar el estado post-terremoto del Edificio de la CChC se realizaron análisis de micro-vibraciones en la estructura utilizando la red de monitoreo de salud estructural, y los resultados permitieron comparar sus valores característicos antes y después del terremoto, (ver tabla 2.)⁴⁰.

Tabla 2. Variación de parámetros dinámicos pre y pos terremoto utilizando microvibraciones ambientales⁴¹.

VARIACIÓN DE FRECUENCIAS			
MODO	PERIODO T(s) PRE- TERREMOTO	PERIODO T(s) POST- TERREMOTO	DIFERENCIA %
1	0,99	1,19	20,24
2	0,97	1,16	19,77
3	0,65	0,82	26,23
VARIACIÓN PROMEDIO %			22,08

VARIACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO			
MODO	β (%) PRE- TERREMOTO	β (%) POST- TERREMOTO	DIFERENCIA %
1	0,6	0,6	0
2	0,7	0,6	14,3
3	0,6	0,8	33,3
VARIACIÓN PROMEDIO %			15,9

Los resultados demostraron que los valores de periodo no fueron iguales a los calculados con una diferencia promedio del 22%. Sin embargo, el amortiguamiento recupero sus valores originales⁴². Los resultados del MSE tienen una buena correlación con lo observado. En conclusión, los equipos arrojaron resultados similares a lo observado, en el daño causado por el terremoto, género que el edificio presente daños leves en sus elementos resistentes y no estructurales.

4.1.2 Torre Central de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Este sistema de monitoreo de salud registra continuamente la aceleración, la humedad del suelo y parámetros ambientales, Además, se informa al usuario sobre el comportamiento dinámico y ambiental cada 15 minutos. La finalidad de este tipo de sistema es la variación de las propiedades dinámicas

⁴⁰ CARREÑO, R. *Variación de las propiedades dinámicas del Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción: caso sísmico*. [Tesis pregrado]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Ingeniería Civil, 2009.

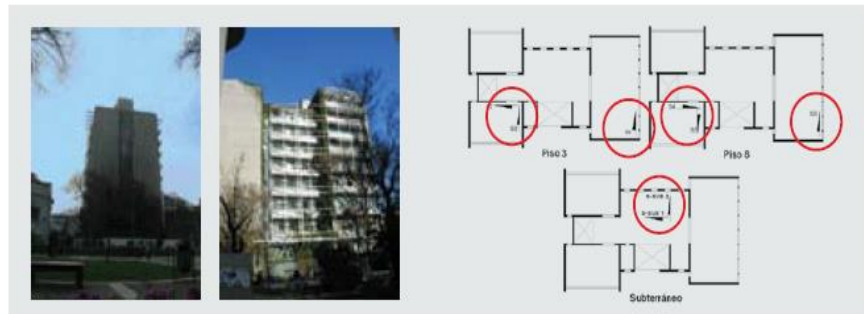
⁴¹ Ibid.

⁴² BOROSCHEK, et al. Óp. Cit.

de la estructura tenga correlación con variables ambientales asociadas a la estructura.

La Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas figura 9. posee una estructura de muros de hormigón para la resistencia a cargas laterales. Cuenta con 9 pisos y 1 subterráneo con una altura de 30 metros. Este edificio se instrumentó con un sistema de monitoreo permanente con el objeto de registrar daños acumulativos, se registra continuamente la aceleración (8 sensores), la humedad del suelo (3 sensores) y parámetros ambientales (humedad, lluvia y viento, entre otros). Ésta información se envía al internet y se informa al usuario sobre los parámetros dinámicos y ambientales cada 15 minutos⁴³.

Figura 9. Edificio torre central Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Vistas y disposición de acelerómetros⁴⁴.



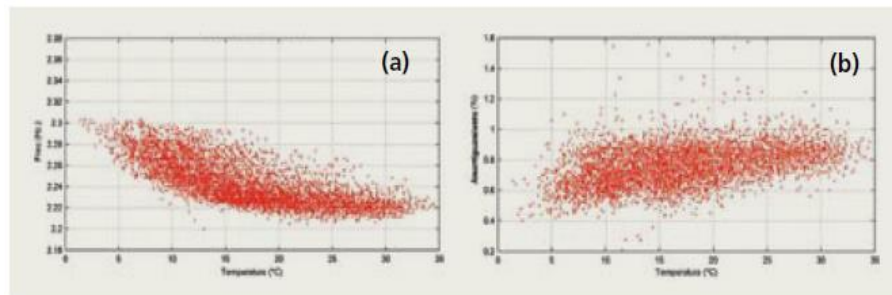
Este tipo de monitoreo se basa en correlacionar variables ambientales con la variación de propiedades dinámicas de la estructura. Por ejemplo, si existe alguna dependencia entre la variación de periodos y los cambios de temperatura, o por lo contrario si existe relación entre la variación de amortiguamiento y el nivel de precipitaciones, o si la humedad del suelo influye en las variaciones de la frecuencia, amortiguamiento o formas modales. Un ejemplo de estas correlaciones

⁴³ GUSTAVO, L. Implementación de un algoritmo de monitoreo de salud estructural basado en objetos simbólicos y clasificación por agrupamiento. [Tesis de magister]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Ingeniería Civil y Magíster en Ingeniería Sísmica, 2017.

⁴⁴ Ibíd.

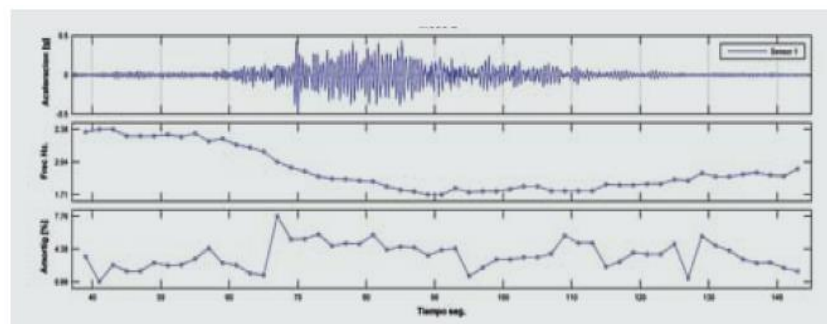
se muestra en la Figura 10, donde se correlaciona frecuencia, Figura 10(a), y amortiguamiento, Figura 10(b), con la temperatura ambiente, respectivamente⁴⁵.

Figura 10. (a) Variación de la frecuencia (periodo) de la estructura en función de la temperatura. (b) Variación del amortiguamiento de la estructura en función de la estructura (estas muestras fueron tomadas el 3 de julio 2009 y el 26 de febrero de 2010)⁴⁶.



Con respecto al terremoto la torre central de la facultad de ciencias físicas y matemáticas. Universidad de Chile registro las mismas características del patrón de variación que el edificio de la cámara chilena de la construcción. La Figura 11 muestra la variación de frecuencia y amortiguamiento durante el terremoto⁴⁷.

Figura 11. Variación parámetros dinámicos. Terremoto (M=8.8) del 27 de febrero de 2010. Torre Central⁴⁸.



⁴⁵ BOROSCHEK, et al., Óp. Cit.

⁴⁶ Ibíd.

⁴⁷ GUSTAVO, Óp. Cit.

⁴⁸ Ibíd.

Este edificio tuvo una variación similar al de la cámara chilena de la construcción, observando un fuerte decrecimiento de la frecuencia y un incremento del amortiguamiento durante el sismo. Las frecuencias naturales de la estructura disminuyeron de forma permanente, en promedio 14,5% y su amortiguamiento mantuvo sus valores originales.

4.1.3 Titanium la Portada. El propósito de este sistema de monitoreo estructural es hacer un seguimiento al proceso constructivo de la edificación mediante una red de acelerómetros para obtener vibraciones ambientales y operacionales por la construcción. De estos resultados se obtuvo el comportamiento dinámico de la estructura y las variaciones fijas debido a la construcción, adicionalmente se utilizaron para actualizar y ajustar los modelos numéricos en diferentes fases constructivas.

Este edificio de Chile tiene 56 pisos, 2 helipuertos, 7 subterráneos, 196 metros de altura y 129.500 metros cuadrados. Se encuentra estructurado en base a un núcleo central de muros de corte, columnas y vigas perimetrales de hormigón armado, y losetas alveolares de hormigón pretensado prefabricado (Figura 12)⁴⁹.

Figura 12. Titanium la portada. Proceso constructivo.



Fuente: Tomás Nuñez A⁵⁰.

⁴⁹ NÚÑEZ, Tomás; y BOROSCHEK, Rubén. *Monitoreo continuo de una estructura en proceso constructivo*. Valdivia-Santiago, Chile: 10 congreso chileno de sismología en ingeniería antisísmica, 2010.

⁵⁰ NÚÑEZ y BOROSCHEK, Óp. Cit.

La torre fue monitoreada por 6 meses, entre agosto de 2008 y enero de 2009, se instaló una red de acelerómetros. Se obtuvieron vibraciones de tipo ambiental y operacional en el proceso constructivo (Figura 13).

Figura 13. Secuencia constructiva Titanium la portada.



Fuente: Tomas Nuñez A⁵¹.

Complementariamente se realizaron mediciones de vibración de ambiental en los niveles 10, 17, 22, 28 y 56. Los resultados se utilizaron para la obtención de propiedades dinámicas y sus variaciones permanentes debido al proceso constructivo. Además, como referente para la actualización de modelos de diseño estructural en diferentes etapas constructivas⁵².

Durante el monitoreo continuo del edificio en el proceso constructivo, se visualizó diversas anomalías debido a vibraciones operacionales de maquinaria tales como montacargas, bombas de hormigón, grúa y otras que originaron diversos efectos transitorios por impactos, cambio continuo de la masa y rigidez de la estructura. Las anomalías no altero la frecuencia natural del edificio. Asimismo, la variación de razones de amortiguamiento depende de la amplitud y el movimiento de la construcción⁵³.

La Figura 14 muestra la variación de frecuencias durante el período de monitoreo

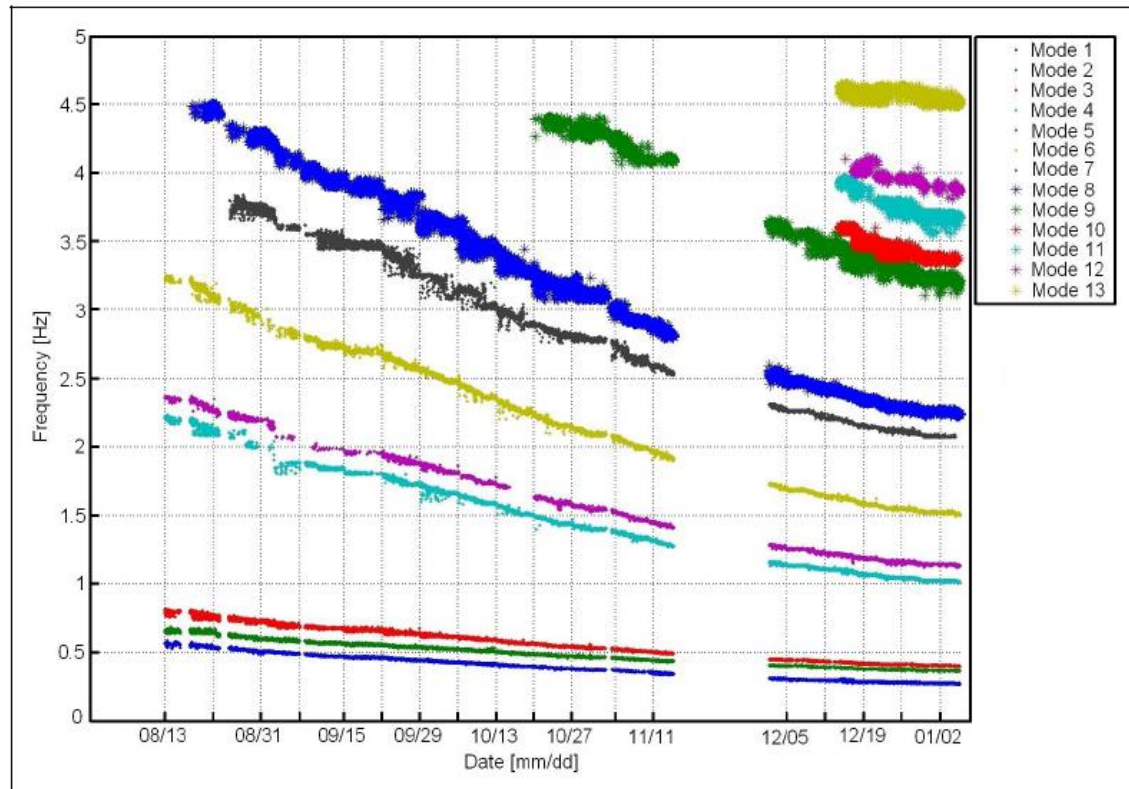
⁵¹ Ibíd.

⁵² BOROSCHEK, et al., Óp. Cit.

⁵³ NÚÑEZ, Tomas. Variación debido a cambios de masa y rigidez de las propiedades dinámicas de una estructura en proceso constructivo. [Tesis de magister]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Ingeniería Civil y Magíster en Ingeniería Sísmica, 2009.

continuo.

Figura 14. Variación de frecuencias (periodo) durante proceso constructivo. Titanium La portada⁵⁴.



Los resultados del sistema de monitoreo estructural que se aplicó en el edificio tuvieron pequeñas variaciones en los parámetros dinámicos permitiendo evidenciar que la estructura obtuvo un buen comportamiento, primordialmente por su calidad de su estructuración, además se complementa con dispositivos de disipación de energía.

⁵⁴ Ibíd.

4.2 PERÚ

4.2.1 Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC-UNI) (Perú). El edificio de la (Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC-UNI)). Se construyó en 1995 (figura 15), tiene un sótano y tres pisos, consiste en una estructura conformada por pórticos de concreto armado con muros de albañilería de relleno⁵⁵.

Figura 15. Bloque G de la facultad de ingeniería Civil de la UNI.



Fuente: Artículo “Implementación del sistema de monitoreo de la salud estructural de edificios en la ciudad de Lima⁵⁶.”

Para el monitoreo de la estructura se utilizó una red de sensores (ltk-002), con las siguientes especificaciones.

Tabla 3. Especificaciones del sensor⁵⁷.

Modelo	ltk-002
Ejes de medición	X, Y, Z (3 ejes)
Capacidad nominal	± 2.5 g

⁵⁵ DÍAZ, Miguel; ZAVAL, Carlos; y ESTACIO, Lucio. *Implementación del sistema de monitoreo de la salud estructural de edificios en la ciudad de Lima en el marco del proyecto SATREPS*. Perú: XIX congreso nacional de ingeniería civil, 2015.

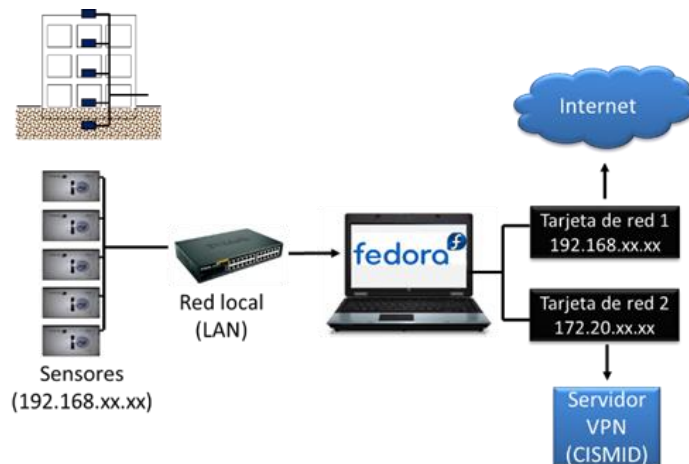
⁵⁶ *Ibíd.*

⁵⁷ SIFUENTES, A. I. *Evaluación de la salud estructural de edificios usando la curva de desempeño sísmico en tiempo real*. [Tesis de Magister]. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2015.

Ruido	< 0.1 g
Voltaje nominal	DC 6V±10%
Angulo de aceptación permisible para el montaje	Dentro de $\pm 3^\circ$
Precisión de marcha muestreo	NTP - dependiente 24 bits, 100 SPS
material de cubierta	Aluminio – Aluminio de moldeado a presión
peso	Approx. 800 g

En la figura 16 se muestra el funcionamiento de la red de monitoreo. El sistema de monitoreo para el edificio consiste en un set de cinco sensores, cada uno con una dirección IP, conectados a una red local, la cual es administrada por un servidor que utiliza un sistema operativo basado en Linux (Fedora). La comunicación entre el servidor y los sensores es por medio de datos UDP (*user datagram protocol*) y TCP (*transmission control protocol*). El servidor posee dos tarjetas de red: la primera está conectada a internet para poder establecer conexiones remotas y enviar los datos a un servidor en Japón, y la segunda está conectada a un servidor con una red privada virtual (VPN) localizada en CISMID⁵⁸.

Figura 16. Red de monitoreo⁵⁹

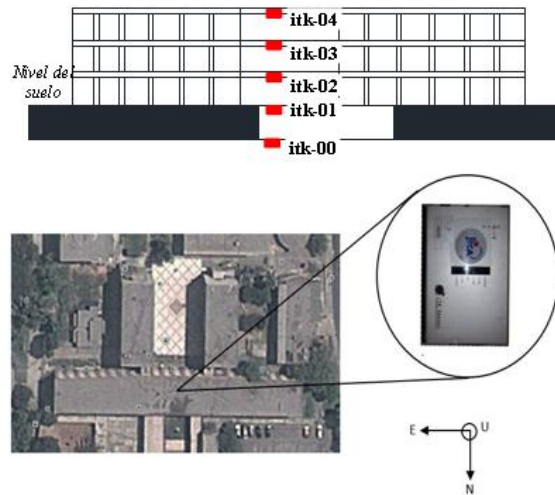


Los sensores se localizan en el suelo y en todos los niveles del edificio, de sótano a techo, como se muestra en la figura 17.

⁵⁸ SIFUENTES, Óp. Cit.

⁵⁹ Ibíd.

Figura 17. Localización de sensores en FIC-UNI⁶⁰.



La orientación de los acelerómetros está en dirección este-oeste (EW) que es paralela a la dirección longitudinal de la edificación, y también en la dirección norte-sur (NS) que es paralelo a la dirección transversal del edificio⁶¹.

4.2.2 Respuesta Sísmica. La Tabla 4 muestra los eventos sísmicos más fuertes registrados desde que el sistema de monitoreo fue implementado (2011). En esta tabla se muestra la profundidad y magnitud del terremoto y la distancia desde el epicentro al edificio monitoreado.

Tabla 4. Lista de los eventos sísmicos más fuertes registrados⁶².

Date	Depth (Km)	Magnitude (ML)	Distance (Km)
3/11/2012	110,0	4,7	112
28/12/2012	96,0	4,3	75
18/10/2013	11,0	4,2	64
25/11/2013	59,0	5,8	104
20/02/2014	38,0	4,1	90
22/02/2014	40,0	4	22
26/04/2014	35,0	4	88
3/06/2014	38,0	5,4	72

⁶⁰ SIFUENTES, Óp. Cit.

⁶¹ Ibíd.

⁶² Ibíd.

Las aceleraciones registradas por los sensores permitieron obtener las propiedades dinámicas del edificio que se muestran en la Tabla 4. En esta tabla se observan la máxima aceleración en la base del edificio monitoreado. El evento sísmico más fuerte registrado según este trabajo ocurrió el 03/06/2014, como se observa en la Tabla 5⁶³.

Tabla 5. Máxima aceleración registrada en la base el edificio⁶⁴.

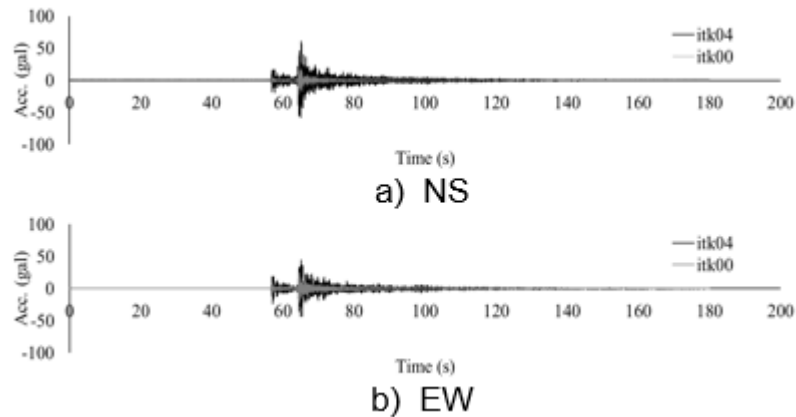
Date	FIC-UNI	
	NS	EW
3/11/2012	-	-
28/12/2012	2,57	3,45
18/10/2013	-5,92	6,39
25/11/2013	-13,02	18,66
20/02/2014	1,57	-1,3
22/02/2014	8,44	11,58
26/04/2014	4,99	6,65
3/06/2014	26,13	24,01

La siguiente figura 18 por medio del sistema de monitoreo se observa las aceleraciones del evento más fuerte. La máxima aceleración es 26.13 gal (cm/s^2) y 24.01 gal (cm/s^2) en la dirección NS y EW, respectivamente. La máxima amplificación de la aceleración es de 2.3 y 1.9 para la dirección NS y EW, respectivamente.

⁶³ MOYA, L. y ZAVALA, C. *Structural Evaluation of Block G2 of the Faculty of Civil Engineering – UNI*. Preliminary Report for Satreps- JST-JICA Project, 2012.

⁶⁴ Ibíd.

Figura 18. Registro de aceleración⁶⁵



El valor promedio del periodo predominante es 0.17 s y 0.18 s para la dirección NS y EW, respectivamente. Este valor no es de importancia, ya que los eventos registrados son minimos, como se muestra en la Tabla 5.

El factor de amortiguamiento varía del 2% al 3% usando los registros de los eventos listados en la Tabla 4⁶⁶.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, este monitoreo se realizó para registrar vibraciones ambientales o terremotos en la edificación. Las propiedades dinámicas de la estructura obtenidas por las microvibraciones y de las aceleraciones arrojadas por MSE son similares por ser vibraciones de baja amplitud, porque no se han registrado eventos sísmicos fuertes.

4.3 MEXICO

4.3.1 Torre Central de Telecomunicaciones Telecomm. El sistema del monitoreo estructural está compuesto por 3 acelerógrafos y 29 sensores uniaxiales, de los cuales 23 están en la estructura, 3 en el subsuelo y 3 en campo libre. El propósito

⁶⁵ MOYA y ZAVALA, Óp. Cit.

⁶⁶ Ibíd.

de esta instrumentación sísmica es estudiar, ante el suceso de sismos, la relación entre el suelo y la estructura, comportamiento dinámico, flexión y torsión.

La Torre Central de Telecomunicaciones es una estructura de concreto reforzado construida a mediados de los sesentas en la zona de lago pre-consolidado del valle de México (figura 19). Tiene 90 metros de altura, base en forma de “H” de 46 m de frente por 35 m de ancho (figura 20) y está resuelta a base de marcos y muros de concreto. Está integrada por 18 niveles distribuidos de la siguiente forma: sótano, planta baja, 16 niveles de oficinas y un apéndice formado por los niveles 17 y 18 en donde se localizan las antenas de transmisión. Además, cuenta con cubos de escalera y elevadores que van de sótano a azotea. La cimentación está constituida por un cajón reticular, a base de muros y contratraveses, apoyado sobre pilotes⁶⁷.

Figura 19. Vista del edificio Telecomm⁶⁸.

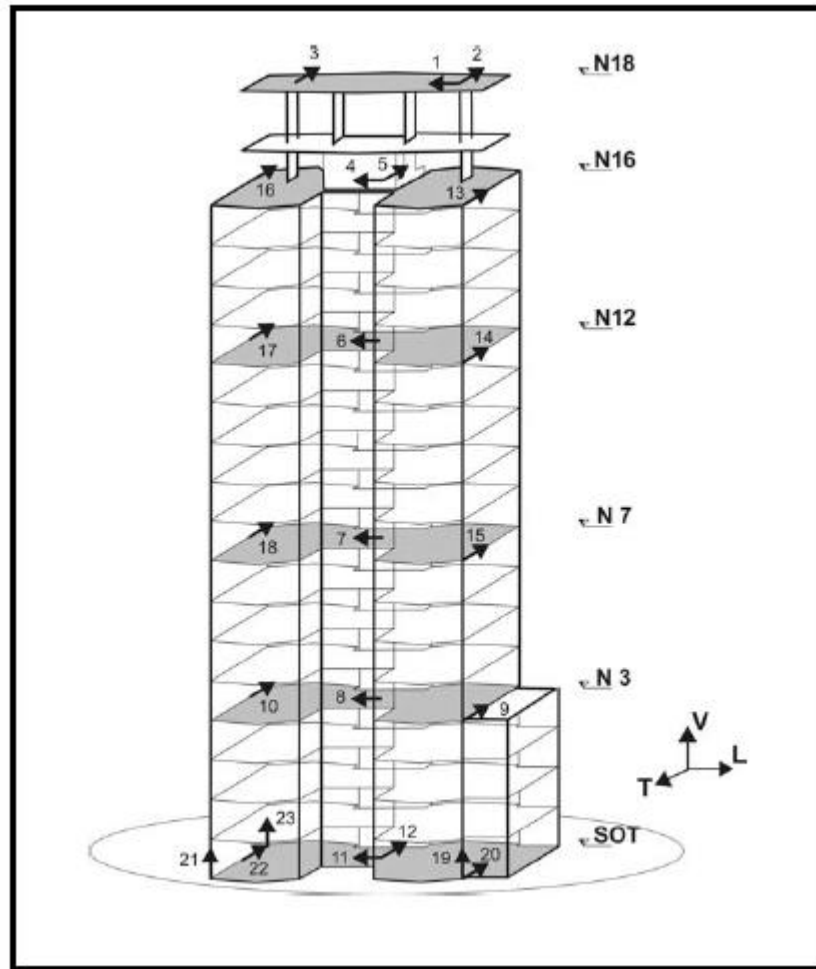


⁶⁷ TENA, A. *El macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995*. Universidad de Colima, Gobierno del Estado de Colima y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C., 1997, pp. 197-232.

⁶⁸ *Ibíd.*

El sistema de conexión entre los sensores y los 3 registradores se diseñó para que se pudiera evaluar la relación entre el suelo y la estructura, así como el comportamiento dinámico de la base, flexión y torsión. las figuras 20 y 21 muestran el detalle de la instrumentación, se asignaron los números del 1 al 23 a cada sensor y la dirección positiva del mismo.

Figura 20. Ubicación y dirección de los sensores⁶⁹.

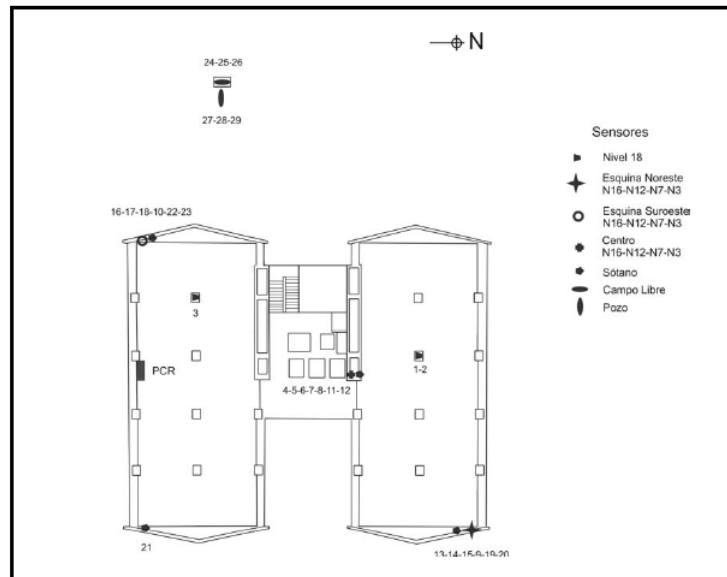


A continuación, se ilustra en planta la ubicación de los sensores (figura 21), el sensor triaxial de pozo está ubicado hacia el oeste del edificio en la zona del

⁶⁹ ALCÁNTARA, Leonardo, et al. *Instrumentación sísmica de un edificio de telecomunicaciones*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 2004.

estacionamiento, y muy cerca se ubica el sensor triaxial en el nivel del terreno. En el sótano del inmueble se colocaron siete sensores uniaxiales, distribuidos en tres esquinas extremas y el centro, en posición horizontal y vertical; de tal forma que en las esquinas noreste y suroeste quedaron un sensor horizontal cuya dirección positiva apunta hacia el oeste y un vertical hacía arriba, en la esquina sureste un vertical y en el centro dos horizontales uno en dirección sur y otro en dirección oeste. En cada uno de los niveles 3, 7 y 12 se colocaron tres acelerómetros el primero en la esquina noreste en dirección oeste, el segundo en la esquina suroeste también en dirección oeste y el tercero en el centro con dirección positiva hacia el sur. En el nivel 16 ó azotea se instalaron 4 sensores uniaxiales en posición horizontal; uno en la esquina noreste en dirección oeste, otro en la esquina suroeste dirección oeste y dos en la parte central de los cuales uno apunta hacia el oeste y el otro al sur. Finalmente, en el nivel 18 se instalaron 3 sensores uniaxiales en posición horizontal, dos en la esquina noreste del apéndice, en dirección oeste y sur, y uno en la esquina suroeste dirección o este⁷⁰.

Figura 21. Vista en planta del edificio instrumentado⁷¹.



⁷⁰ ALCÁNTARA, et al., Óp. Cit.

⁷¹ Ibíd.

En las siguientes tablas (ver tablas 6 y 7) se detallan las características y la ubicación de la instrumentación que se emplearon para el monitoreo estructural.

Tabla 6. Características de los registradores⁷².

Tipo	Digital
Medio de registro	Tarjeta "flash" PCMCIA
Canales (12 ó 6 uniaxiales)	Externos
Escala de registro [G]	1-4 G
Tiempo de registro [minutos]	40 @ 100 mps
Tasa de muestreo [muestras/seg]	100
Longitud de palabra [bits]	19
Recuperación de datos	Local por Lap-Top o vía telefónica
Rango dinámico [dB]	120
Interconexión maestro-esclavo	Activada
Control de tiempo	GPS
Alimentación [Volts CD]	+12

Tabla 7. Ubicación, tipo y dirección de los sensores⁷³.

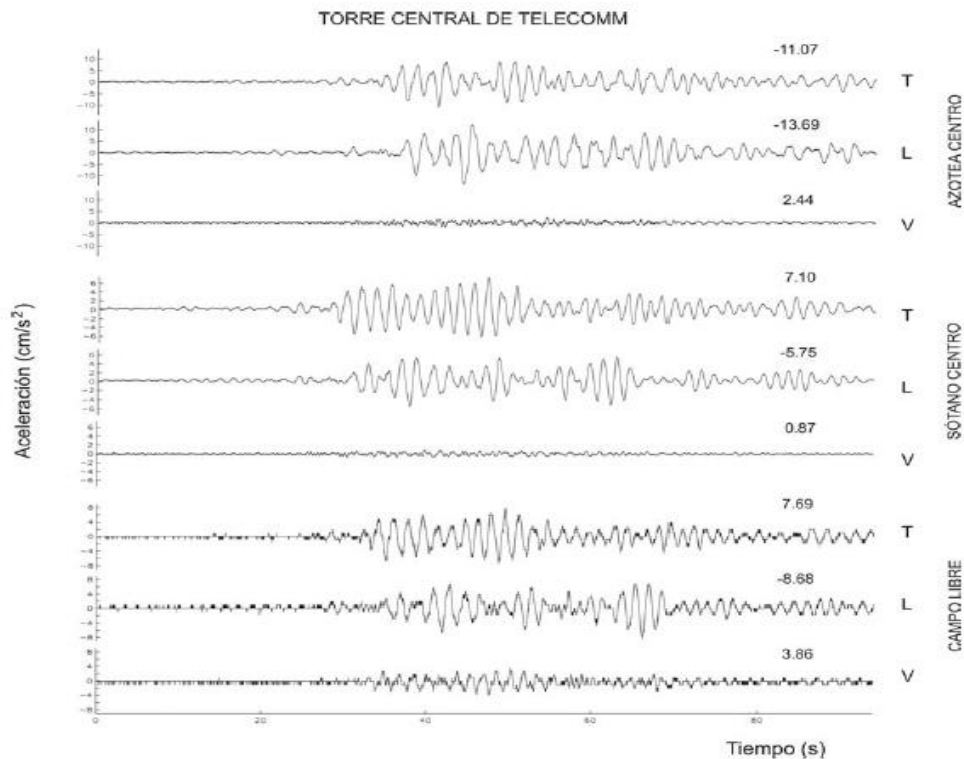
NIVEL	SENSOR	UBICACIÓN	TIPO	ORIENTACIÓN
18	1	Esquina noreste	ES-U	Longitudinal
	2	Esquina noreste	ES-U	Transversal
	3	Esquina suroeste	ES-U	Transversal
16	4	Centro	ES-U	Longitudinal
	5	Centro	ES-U	Transversal
	13	Esquina noreste	ES-U	Transversal
	16	Esquina suroeste	ES-U	Transversal
12	6	Centro	ES-U	Longitudinal
	14	Esquina noreste	ES-U	Transversal
	17	Esquina suroeste	ES-U	Transversal
7	7	Centro	ES-U	Longitudinal
	15	Esquina noreste	ES-U	Transversal
	18	Esquina suroeste	ES-U	Transversal
3	8	Centro	ES-U	Longitudinal
	9	Esquina noreste	ES-U	Transversal
	10	Esquina suroeste	ES-U	Transversal
SÓTANO	11	Centro	ES-U	Longitudinal
	12	Centro	ES-U	Transversal
	19	Esquina noreste	ES-U	Vertical
	20	Esquina noreste	ES-U	Transversal
	21	Esquina sureste	ES-U	Vertical
	22	Esquina suroeste	ES-U	Transversal
	23	Esquina suroeste	ES-U	Vertical
CAMPO LIBRE	24	Estacionamiento suroeste	ES-T	Transversal
	25			Longitudinal
	26			Vertical
POZO	27	Estacionamiento suroeste	SBEPI	Transversal
	28			Longitudinal
	29			Vertical

⁷² ALCÁNTARA, et al., Óp. Cit.

⁷³ Ibíd.

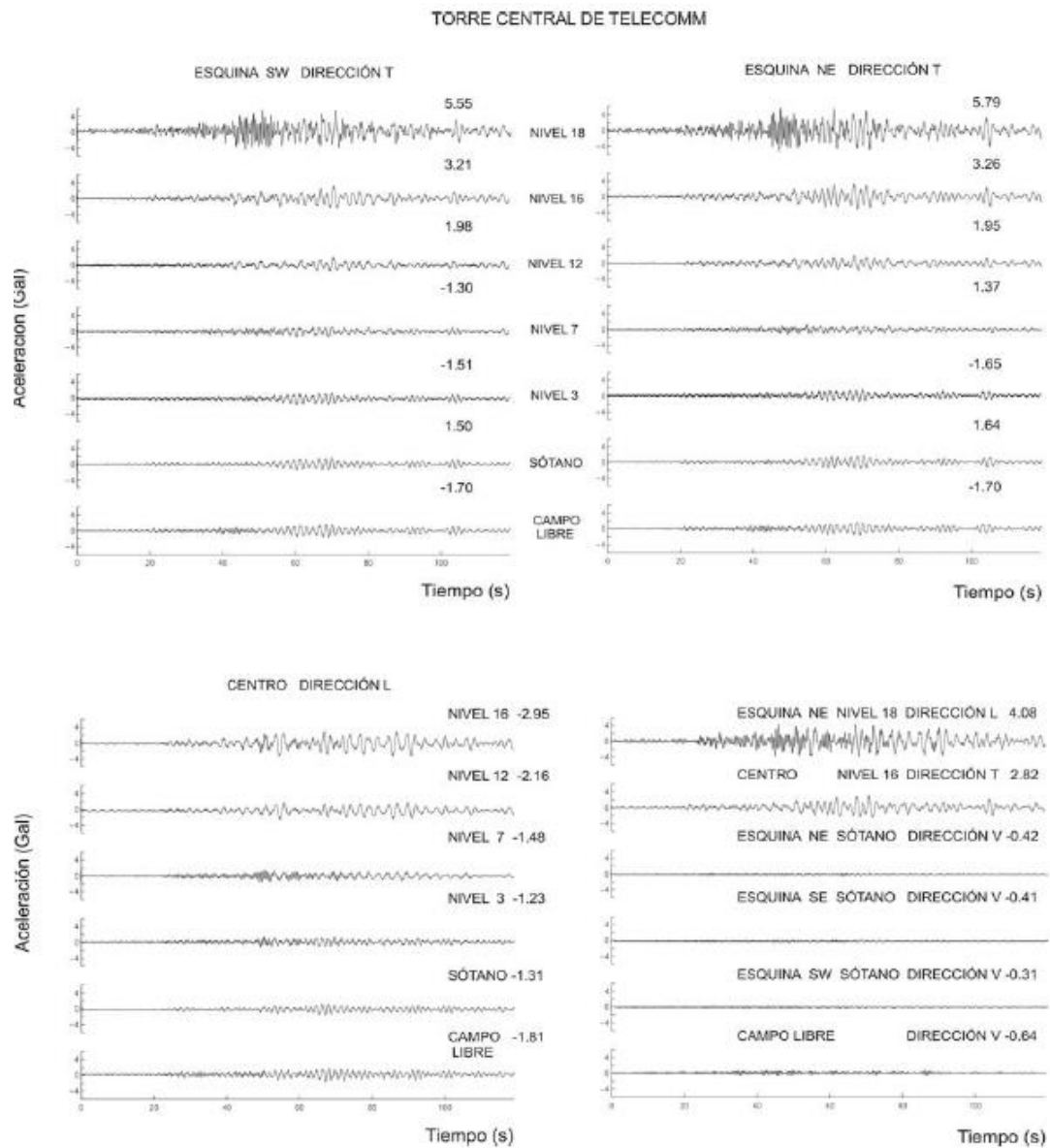
El objetivo de esta instrumentación fue registrar los sismos del 14 de junio del 2004 (M=5.8) y el de 18 de agosto del 2004 (M=5.7). Los tres acelerógrafos triaxiales localizados en la azotea, sótano y campo libre, durante el sismo del 14 de junio registro los parámetros dinámico de la estructura con una aceleración máxima en la azotea de 13.7 cm/s^2 en dirección longitudinal (figura 22). Los resultados obtenidos de la estructura por el sismo del 18 de agosto, con una instrumentación que va desde el nivel 18 hasta el sótano y campo libre, registro una aceleración máxima en la azotea de 3 cm/s^2 en dirección longitudinal (figura 23). La tabla 8 se describe el resumen de los valores máximos generados.

Figura 22. Acelerogramas obtenidos durante el sismo del 14 de junio del 2004 (M=5.8)⁷⁴



⁷⁴ ALCÁNTARA, et al., Óp. Cit.

Figura 23. Acelerogramas obtenidos durante el sismo del 18 de agosto del 2004 (M=5.7)⁷⁵.



⁷⁵ ALCÁNTARA, et al., Óp. Cit.

Tabla 8. Resumen de las aceleraciones obtenidas en el edificio Telecomm⁷⁶.

Sismo del 14 de junio de 2004. Instrumentación Provisional			
NIVEL	SENSOR	COMPONENTE	Amáx (cm/s²)
AZOTEA CENTRO	Triaxial	T	11.07
		L	13.69
		V	2.44
SÓTANO CENTRO	Triaxial	T	7.10
		L	5.75
		V	0.87
CAMPO LIBRE	Triaxial	T	7.69
		L	8.68
		V	3.86
Sismo del 18 de agosto de 2004. Sistema de registro sísmico centralizado			
18	1	L	4.08
	2	T	5.79
	3	T	5.55
16	4	L	2.95
	5	T	2.82
	13	T	3.26
	16	T	3.21
12	6	L	2.16
	14	T	1.95
	17	T	1.98
7	7	L	1.48
	15	T	1.37
	18	T	1.30
3	8	L	1.23
	9	T	1.65
	10	T	1.51
SÓTANO	11	L	1.31
	12	T	1.56
	19	V	0.42
	20	T	1.64
	21	V	0.41
	22	T	1.50
	23	V	0.31
CAMPO LIBRE	24	T	1.70
	25	L	1.81
	26	V	0.64

La finalidad de este sistema de monitoreo estructural es para conocer el comportamiento de la edificación, los efectos de interacción suelo-estructura y movimiento de la base, ante eventos sísmicos que se registraron el 14 de junio y 18 de agosto del 2004. Estos resultados de este sistema fueron totalmente favorables a la edificación para entender de mejor forma las variaciones de las propiedades dinámica de la estructura.

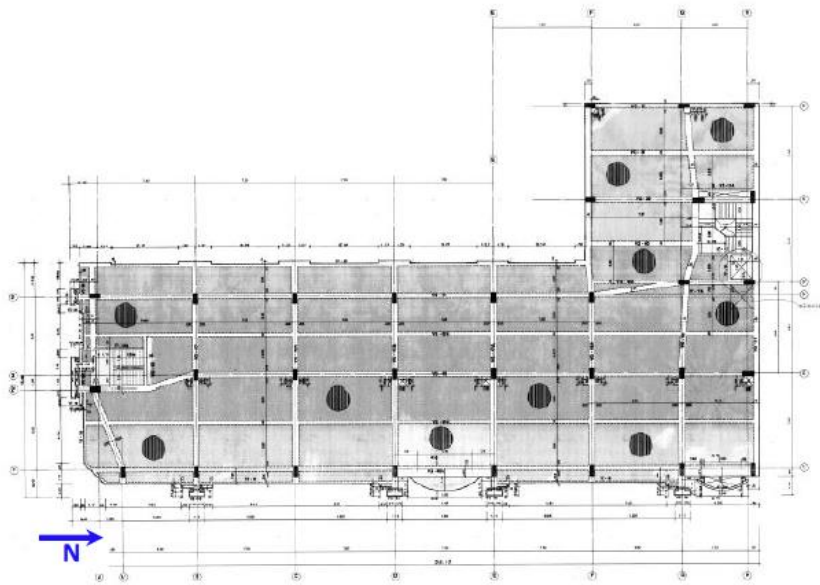
⁷⁶ ALCÁNTARA, et al., Óp. Cit.

4.4 COLOMBIA

4.4.1 Edificio de Bogotá, Interacción Suelo-Estructura. Actualmente en los diseños estructurales, no se tiene en cuenta la contribución del suelo en el cálculo del comportamiento dinámico de la estructura, por la simplificación de los análisis y la falta de una normatividad más completa vigente para elaborar modelos más precisos, este estudio hace enfatizar la importancia que tiene el suelo en la edificación.

En la figura 24 se ilustra la planta de la edificación irregular, está compuesta por cuatro pisos y dos sótanos de parqueaderos. La cimentación consiste en pilotes flotantes de 25 m de longitud sobre un estrato de arcillas blandas⁷⁷.

Figura 24. Planta tipo de edificio estudio⁷⁸.



⁷⁷ OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R.; y BUCK J. Discrete-Time Signal Processing (2d Edition). Pearson Prentice Hall Safak E. 1995. Detection and identification of soil-structure interaction in buildings from vibration recording. *Journal of Structural Engineering*, 2006, vol. 121, no. 5, pp. 889-906.

⁷⁸ CONSUEGRA, Fabián; MARULANDA, Camilo; y PHILLIPS, Camilo. *Interacción suelo-estructura como factor en las vibraciones perceptibles de un edificio en Bogotá*. Bogotá: VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Universidad de los Andes, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2015.

Un sistema de acelerómetros de alta sensibilidad combinado con un sistema de adquisición de datos de alta resolución fue usado para ejecutar un extenso programa de monitoreo dinámico con el fin de conocer el comportamiento dinámico de la edificación. Los sensores fueron instalados en diferentes puntos de la edificación para identificar frecuencias y modos de vibración en las dos direcciones principales de la edificación y establecer la relación entre los movimientos de la estructura y el tráfico vehicular circundante. Las vibraciones del terreno adyacente a la edificación y las vibraciones del edificio en cada uno de los pisos fueron medidas. A continuación, se muestra las aceleraciones simultáneas en la dirección NS medidas en cada uno de los pisos en el extremo suroeste de la edificación en los dominios de tiempo (a, c y e) y frecuencia (b, d y f) (ver figura 24), estas últimas obtenidas mediante un espectro de Fourier⁷⁹. Los espectros de Fourier identifican una frecuencia fundamental de la dirección NS de 2.6Hz aproximadamente. La observación de dicha frecuencia específica en cada uno de los pisos en una ventana de tiempo aproximada de 3s (ver figura 25), permite observar que las magnitudes de los movimientos son mayores en los pisos superiores que los inferiores, propio de la forma modal fundamental⁸⁰.

⁷⁹ OPPENHEIM, SCHAFER y BUCK J., Óp. Cit.

⁸⁰ CONSUEGRA, MARULANDA, y PHILLIPS, Óp. Cit.

Figura 25. Aceleraciones medidas en la dirección NS sobre el extremo sur-oeste de la edificación⁸¹.

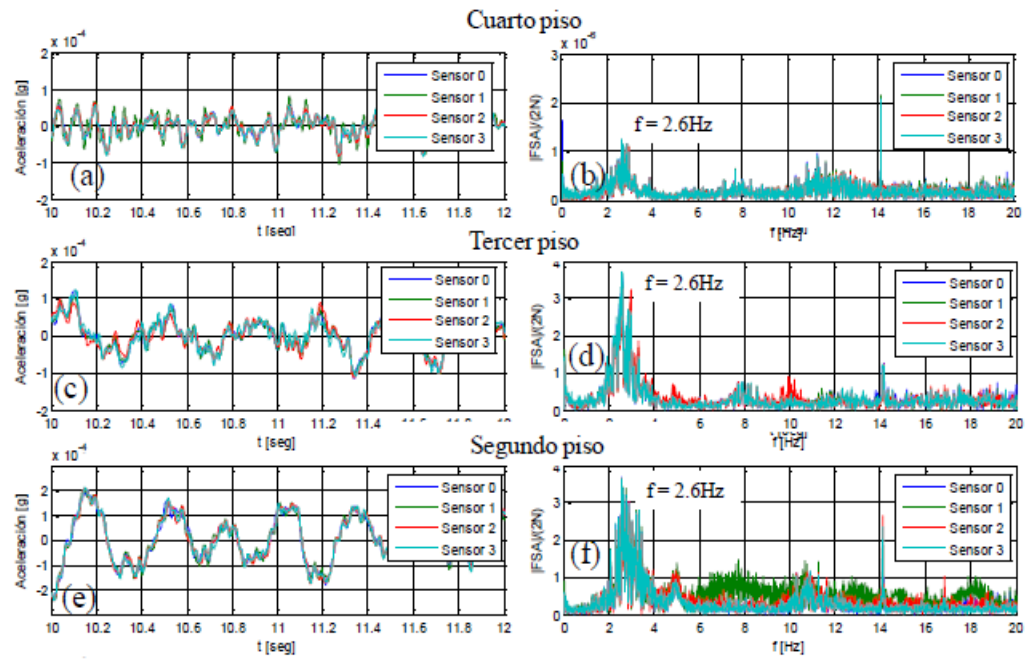
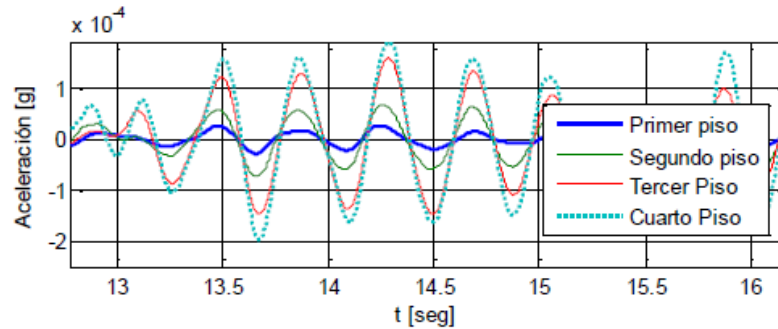


Figura 26. Forma modal fundamental dirección NS⁸².



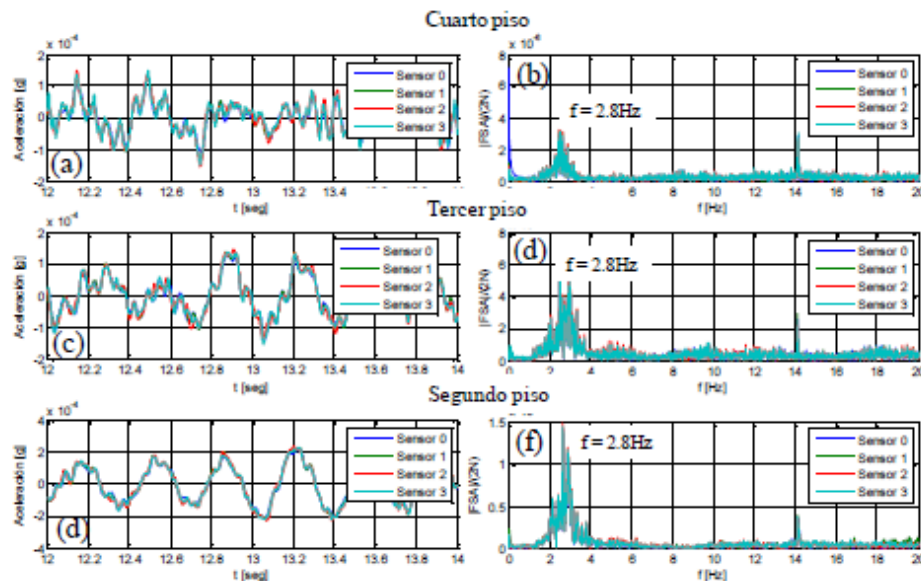
Un análisis similar al de la Figura 24 fue realizado para la dirección EW de la edificación con el que se identificó una frecuencia fundamental de la dirección EW de 2.8Hz aproximadamente. Es importante notar que tanto en la Figura 24 como en

⁸¹ CONSUEGRA, MARULANDA, y PHILLIPS, Óp. Cit.

⁸² Ibíd.

la Figura 26 existen varios picos en el espectro del Fourier en la vecindad del pico máximo, lo cual está asociado a diferentes frecuencias de vibración de un sistema con comportamiento no-lineal causado por el cambio de rigidez del sistema con la amplitud de vibración⁸³. Esto puede estar asociado a un comportamiento de la estructura que no sigue estrictamente la ley de Hook o que la contribución del suelo en la rigidez total del sistema dependa también de la magnitud de la vibración.

Figura 27. Aceleraciones medidas en la dirección NS sobre el extremo sur-oeste de la edificación⁸⁴.



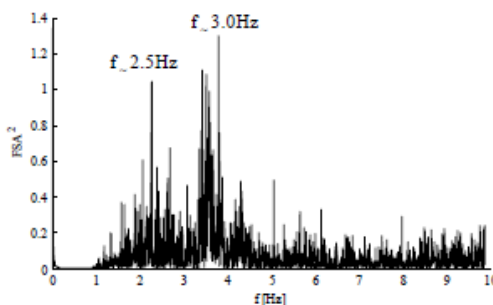
La Figura 27 muestra el auto-espectro de Fourier medido sobre el suelo en la periferia del edificio. Los valores predominantes de frecuencias entre 2.5Hz y 3.0Hz corresponden a los mismos valores de vibraciones principales del edificio mostrados en la Figura 24 y la Figura 26, lo cual indica que el suelo circundante también se mueve junto con la estructura ya sea como consecuencia de la vibración de la estructura, o que el suelo se mueve mediante la transferencia de ondas provenientes por ejemplo de las cargas de tráfico cercano y por consiguiente mueve

⁸³ CONSUEGRA, F. and IRFANOGLU, A. Variation of small amplitude vibration dynamic properties with displacement in reinforced concrete structures. *Experimental Mechanics*, 2012. doi 10.1007/s11340-011-9590-0.

⁸⁴ CONSUEGRA, MARULANDA, y PHILLIPS, Óp. Cit.

la estructura. Las mediciones de la edificación fueron utilizadas para establecer una función de transferencia entre la base del edificio a nivel del suelo (entrada) y el punto más alto (salida). Figura 28 (a) muestra el espectro de Fourier de aceleraciones medidas en el techo de la edificación revelando una frecuencia principal de la estructura similar a la de la Figura 26. La función de transferencia calculada con las vibraciones medidas se muestra en la Figura 28 (b) en que la frecuencia principal de 3.0Hz es mayor que la frecuencia principal del sistema vibrando, dado que la función de transferencia revela la frecuencia de vibración de la estructura sin interacción suelo-estructura⁸⁵, es decir la frecuencia con que vibraría la edificación cimentada sobre roca. La Figura 28 (c) muestra la comparación entre la Función de Transferencia medida y aquella calculada para un sistema de un grado de libertad lineal-elástico según la ecuación (1) en donde “m”, “c”, “k” y “W” representan la masa, amortiguamiento, rigidez y frecuencia angular respectivamente. Desviación del comportamiento real de la estructura del modelo lineal son evidencia del comportamiento no-lineal mencionado. Con base en las observaciones anteriores, se puede determinar que existe dependencia entre el suelo y la edificación en la definición del sistema dinámico, por lo cual una representación adecuada debería incluir el efecto del suelo con un modelo simplificado al menos igual al de la Figura 29.

Figura 27. Frecuencias principales de vibración detectadas en el suelo⁸⁶.



⁸⁵ SAFAK, E. Detection and identification of soil-structure interaction in buildings from vibration recording. *Journal of Structural Engineering*, 1995, vol. 121, no. 5, pp. 889-906.

⁸⁶ CONSUEGRA, MARULANDA, y PHILLIPS, Óp. Cit.

Figura 28. Función de transferencia entre la base y el techo del edificio (EW)⁸⁷.

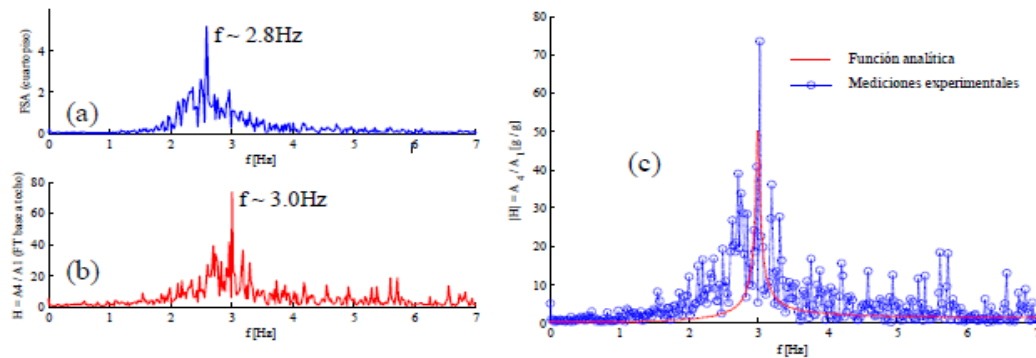
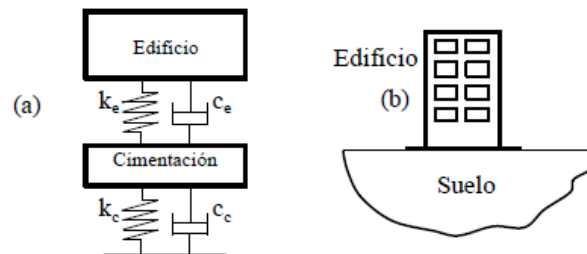


Figura 29. Modelo de 2 grados de libertad Estructura-Suelo⁸⁸.



Los resultados nos muestran que la interacción del suelo-estructura es un factor importante en respuesta ante solicitaciones dinámicas. Aunque el estudio anterior se centra en el comportamiento de la estructura ante cargas vehiculares, es importante considerar en términos de frecuencia y amortiguamiento que el cambio es un elemento esencial para predecir los movimientos de la edificación ante solicitaciones sísmicas. Cabe resaltar que, dependiendo el tipo de suelo, el comportamiento de la estructura es diferente.

⁸⁷ CONSUEGRA, MARULANDA, y PHILLIPS, Óp. Cit.

⁸⁸ Ibíd.

5. NORMATIVIDAD

5.1 CHILE.

En el proceso de recopilación de información se obtuvo la Nch433.of1996 modificada en 2009⁸⁹ que cita textualmente sobre instrumentación sísmica: Al proyectar una obra, la autoridad competente puede exigir que el proyecto se contemple la inclusión de por lo menos dos recintos adecuados para la instalación de acelerógrafos de movimiento fuerte Esta es la normatividad que exige el gobierno de Chile para desarrollar un sistema de monitoreo estructural.

5.2 PERU

Según la norma técnica E.030 DISEÑO SISMORRESISTENTE⁹⁰, que cita textualmente sobre instrumentación sísmica:

En el literal 50.3. Las edificaciones que, individualmente o en forma conjunta, tenga un área techada igual o mayor que $10.000\ m^2$, cuenten con una estación acelerométrica instalada a nivel del terreno natural o en la base del edificio.

En el literal 50.4. las edificaciones con más de 20 piso o en aquellas con dispositivos de disipación sísmica o de aislamiento en la base, de cualquier altura, se requiere además de una estación acelerométrica en la base, otra adicional en la azotea o en el nivel inferior al techo.

La información registrada por los instrumentos es integrada a la base de datos de la red Sísmica Nacional, a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y se

⁸⁹ INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION, INN-CHILE, norma chilena oficial NCh 433.of1996 modificada en 2009.

⁹⁰ MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO, Norma técnica Peruana E.030. Diseño Sismorresistente, Resolución Ministerial, Lima, 2018.

encuentra a disposición del público en general.

5.3 MEXICO

En la norma técnica complementaria para diseño por sismo (NTC-RSEE)⁹¹, en el capítulo B.4.7. colocación e inspección enuncia lo siguiente:

- Se deberán establecer planes regulares para la colocación, así como para pruebas e inspección de los dispositivos disipadores.
- Se deberá dar seguimiento sobre el control de calidad de los disipadores que se hayan instalado en la obra.
- Los disipadores deberán colocarse en lugares accesibles para su inspección, mantenimiento y, en su caso, reemplazo (aun cuando la probabilidad de reemplazo sea baja).
- Se deberá hacer un análisis para estimar los intervalos de tiempo en los que se deben sustituir los disipadores de energía.
- Se recomienda monitorear el comportamiento dinámico del sistema estructura-disipador mediante instrumentación sísmica.

Se infiere que esta normativa solo recomienda monitorear la estructura cuando este tiene disipadores de energía.

5.4 COLOMBIA.

El reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10⁹² en el Capítulo A.11.2- Colocación de instrumentos sísmicos, manifiesta:

Dentro de las construcciones que se adelanten en el territorio nacional, cubiertas

⁹¹ SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA Y SECRETARIA DE OBRAS Y SERVICIOS. Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las edificaciones (NTC-RSEE), Ciudad de México, 2017.

⁹² MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10, Segunda actualización, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.

por el alcance del presente Reglamento, deben colocarse instrumentos sísmicos en los siguientes casos:

A.11.2.1 - ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA ALTA — En las siguientes edificaciones, localizadas en zonas de amenaza sísmica alta deben colocarse instrumentos sísmicos:

- (a) En toda edificación con un área construida de más de **20 000** m² y que tenga entre **3** y **10** pisos debe colocarse un instrumento sísmico como mínimo. El espacio para su colocación será colindante con el sistema estructural y debe localizarse en el nivel inferior de la edificación.
- (b) En toda edificación con un área construida de más de **20 000** m² que tenga entre **11** y **20** pisos, deben colocarse al menos **2** instrumentos sísmicos, en espacios colindantes con el sistema estructural, localizados, uno en el nivel inferior y otra cerca de la cubierta. En este caso el instrumento localizado cerca de la cubierta puede tener solo dos sensores horizontales ortogonales.
- (c) En toda edificación de **21** o más pisos, independientemente del área construida, deben colocarse **3** instrumentos, en espacios colindantes con el sistema estructural. Uno en el nivel inferior, uno aproximadamente a mitad de la altura y otro en inmediaciones de la cubierta. Los instrumentos deben conformar un arreglo. Alternativamente al arreglo de tres instrumentos, se puede realizar la instalación de tres sensores de aceleración, uno triaxial y dos biaxiales como indica A.11.1.3(a), conectados a un sistema central de captura de datos.
- (d) En todo conjunto habitacional que tenga más de **200** unidades de vivienda, que no sean de interés social, se debe colocar un instrumento de campo abierto.

A.11.2.1 - ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA INTERMEDIA — En las siguientes edificaciones, localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia deben colocarse instrumentos sísmicos:

- (e) En toda edificación con un área construida de más de **30 000** m² y que tenga entre **5** y **15** pisos debe colocarse un instrumento como mínimo. El espacio

donde se coloque el instrumento será colindante con el sistema estructural y debe localizarse en el nivel inferior de la edificación.

- (f) En toda edificación con un área construida de más de **30 000 m²** que tenga entre **16** y **25** pisos, deben colocarse al menos **2** instrumentos sísmicos, en espacios colindantes con el sistema estructural, localizados, uno en el nivel inferior y otro cerca de la cubierta.
- (g) En toda edificación de más de **25** pisos, independientemente del área construida, deben colocarse **3** instrumentos sísmicos, en espacios colindantes con el sistema estructural. Uno en el nivel inferior, uno aproximadamente a mitad de la altura y otro en inmediaciones de la cubierta. Los instrumentos deben conformar un arreglo. Alternativamente al arreglo de tres instrumentos, se puede realizar la instalación de tres sensores triaxiales de aceleración, conectados a un sistema central de captura de datos.
- (h) Todo conjunto habitacional que tenga más de **300** unidades de vivienda, que no sean de interés social, debe colocarse un instrumento sísmico de campo abierto.

A.11.2.2 - ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA BAJA — En las edificaciones localizadas en zonas de amenaza sísmica baja no hay obligación de colocar instrumentos sísmicos.

6. RECOMENDACIONES PARA EL DESARROLLO DEL MSE EN EDIFICACIONES DE BUCARAMANGA

El presente escrito propone lineamientos para proceso de diseño de caracterización de los edificios en Bucaramanga y el correcto monitoreo de la salud estructural, tomando como referencia el sistema SIAP-MIT del Instituto Mexicano de transporte que desarrollo un sistema administrativo para puentes.

La ciudad de Bucaramanga posee una alta amenaza sísmica donde confluye el movimiento de placas tectónicas de la cordillera oriental que la hacen propensa a fenómenos de origen geológico. El informe del diagnóstico realizado por el ordenamiento territorial del municipio de Bucaramanga, evidencia que la amenaza para el sector urbano es por sismicidad, por inundación y deslizamiento.

En el informe elaborado por Plan municipal de gestión de riesgo de desastres PMGRD, 2013 menciona que no hay un inventario actualizado de la infraestructura de establecimientos de comercio, ni de producción, ubicadas en el área amenazada por condición latente derivada de la posible ocurrencia de un sismo de cierta magnitud. Aunque se tiene inventarios institucionales parciales de acuerdo a la misión de cada entidad, no se ha consolidado, ni actualizado el inventario de viviendas, escuelas, jardines infantiles, centros de salud, líneas de servicios públicos, patrimonio cultural material e inmaterial etc., y la evaluación de sus estructuras⁹³.

El diseño, construcción y supervisión técnica de edificios deben cumplir con los requisitos mínimos establecidos en la norma sismo resistente colombiana que se remonta a las leyes 400 de 1.997 y modificada 1229 de 2008, de la cual la segunda

⁹³ PLAN MUNICIPAL DE GESTION DEL RIESGO DE DESASTRE, PMGRD DE BUCARAMANGA, Primera versión Bucaramanga, diciembre de 2013, Fecha de elaboración: septiembre de 2012 Actualización: diciembre de 2013 Elaborado por: CMGRD de Bucaramanga.

actualización del reglamento NSR-10 se expidió por medio del decreto 926 del 19 de marzo de 2010, que en el capítulo A-11 hace referencia a la instrumentación sísmica. La normativa señala que en las construcciones altas deben instalarse equipos como sismógrafos, acelerógrafos, también indica donde corresponden localizarse, quien debe correr con los costos de adquisición y mantenimiento del espacio que ocupen y de su vigilancia.

La norma establece en Colombia tres tipos de zona con amenaza sísmica (alta, intermedia y baja), Santander se encuentra en zona alta sísmica, aplicando el reglamento NSR10, para esta ciudad las construcciones con un área construida de 20.000 metros cuadrados y que tenga de 3 a 10 pisos debe colocar un (1) instrumento como mínimo, en espacio colindante con la estructura, y debe localizarse en el nivel inferior de la edificación. También contempla la norma que en toda edificación de más de 20.000 mts cuadrados y que tenga entre 11 y 20 pisos, debe colocar dos (2) instrumentos como mínimo y en espacios colindantes con la estructura, localizado uno en el nivel inferior y otro cerca de la cubierta. por último, en toda construcción de 21 pisos o más, independientemente del área construida debe colocarse tres instrumentos, en espacios colindantes con la estructura, uno en el nivel inferior, otro a media altura y otro en inmediaciones de la cubierta⁹⁴.

Es a partir de lo expuesto significativamente importante generar un programa de inspecciones que proporcione datos para conocer el estado de las edificaciones en la ciudad y a la vez cuantificar el daño o falla; consolidar una base de datos con información estructural posibilitará diagnósticos integrales los cuales podrán ser utilizados por autoridades públicas o privadas para impulsar medidas de mitigación y prevención.

⁹⁴ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Óp. Cit.

Existen diferentes tipos de inspección, estas pueden variar durante la vida útil de una estructura a otra, la intensidad de la indagación en el momento de evaluar conlleva a diferentes niveles de inspección; según las necesidades de cada tipología existen tres tipos de inspección: inspección general, inspección detallada e inspección especial⁹⁵.

Figura 30. Niveles de inspección en los puentes.

NIVEL DE INSPECCIÓN	TECNICA DE INSPECCIÓN	CRITERIO DE ANÁLISIS
General	Visual	Indice de la condición estructural
Detallada	Pruebas dinámicas, estáticas, semiestáticas, y pruebas de carga Evaluación de la corrosión.	Capacidad estructural, y vida residual o vida útil
Especial	Según se requiera	Evaluación estructural, capacidad de carga, y vida

Fuente: Adaptado de CARRIÓN, Francisco. *Metodologías de inspección no destructiva aplicables a sistemas de gestión de puentes*. México: Publicación Técnica No 302 Sanfandila, Qro, 2006.

En resumen, la inspección general se logra mediante inspección visual si el edificio no es aceptable pasa a una inspección detallada en casos muy especiales se pasará a una inspección especial, la inspección detallada requiere de pruebas dinámicas, estáticas, semiestática y pruebas de cargas. las pruebas dinámicas se podrán obtener con sensores como acelerómetros de deformación de fibra óptica con rasurado de braga(FBG); las pruebas de carga estática y semi estática se podrán usar los extensómetros, ellos miden la tensión de un elemento estructural. Los sensores de potencial eléctrico y la resistividad del concreto se medirán para evaluar el daño por corrosión en el acero de refuerzo⁹⁶.

Retomando el concepto básico del sistema de administración de puente que el instituto mexicano de transporte establece en SIAP-MIT⁹⁷. El soporte esencial para el inicio del proceso de monitoreo de la salud estructural para edificaciones, parte

⁹⁵ CARRIÓN, Francisco. *Metodologías de inspección no destructiva aplicables a sistemas de gestión de puentes*. México: Publicación Técnica No 302 Sanfandila, Qro, 2006.

⁹⁶ *Ibíd.*

⁹⁷ MARTÍNEZ, Luis. *Sistema inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 464 Sanfandila, Qro, 2016. ISSN 0188-7297.

de la alimentación de la información de campo que comprende datos de diseño, especificaciones, planos, historiales de inspección, mantenimientos, archivos fotográficos. proveniente de las inspecciones que posteriormente el proceso ejecuta de tal forma que la salida sea programas de inspección, programas de obra y proyectos de diseño y especificaciones de mantenimiento.

Teniendo en cuenta lo anterior se propone la creación de una red de instrumentación en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) liderada por el grupo de Investigación en materiales y estructuras de construcción INME, de la Universidad Industrial de Santander, aprovechando su conocimiento en monitoreo de la salud estructural.

El grupo INME actualmente es reconocido por el sector inmobiliario y por el gremio de constructores de la Cámara Colombiana de la Construcción Camacol seccional Santander, como un ente consultivo en el diagnóstico y en el estudio del comportamiento de las estructuras para edificaciones y obras de infraestructura en zonas de alta actividad sísmica.

Aprovechando toda esta experiencia y fortaleza en investigación del INME se impulsará la red de instrumentación que permitirá ofrecer un valor agregado a la industria de la construcción con equipos que identifican daño con pruebas no destructiva. Actualmente para hacer diagnósticos de estructuras se utilizan ensayos destructivos tales como extracción de núcleos, realización de apiques, los cuales son altamente costosos e invasivos para la estructura.

Las nuevas tecnologías en Monitoreo de la Salud Estructural día a día vienen ganando seguidores en el campo de las obras civiles, por el avance en el procesamiento digital con ensayos no destructivos, los cuales entregan un valor agregado para el sector inmobiliario de la ciudad ofreciendo garantía, calidad y confiabilidad.

7. CONCLUSIONES

En un mundo globalizado, uno de los factores de competitividad de las ciudades urbanizadas es ofrecer condiciones de seguridad, entornos habitables, con sistemas preventivos en las estructuras; por tal motivo es importante desde el conocimiento y la experticia proponer un proyecto piloto de monitoreo estructural a edificaciones de la ciudad. Un método que nos permite evaluar las estructuras, de tal forma que se genere un diagnóstico ante variadas condiciones ambientales y de uso. El MSE aportará conocimiento sobre el desempeño real de las edificaciones frente a la actividad de eventos sísmicos, la cual es una amenaza permanente en la ciudad.

El monitoreo de la salud estructural en edificaciones, es un método innovador que no solo detecta fallas y evalúa confiabilidad en las estructuras, sino además predice y pronostica cambios en la vida útil de las edificaciones, calibra modelos de diseño, monitorea procesos constructivos, evita accidentes estructurales, reduce costos de mantenimiento. Sin embargo, es un método de alta tecnología con un costo económico importante aplicado a obras civiles de gran magnitud. El monitoreo estructural mide el comportamiento dinámico de la edificación por medio de sensores en tiempo real, calcula aceleraciones, velocidades y desplazamientos, que mediante la técnica de inspección visual no se podría obtener tal información.

Al realizar el monitoreo de la salud estructural existe una amplia gama de tecnología disponible de sensores y ensayos con métodos no destructivos, herramientas que han ganado especial atención en los últimos años debido al avance en tecnología de instrumentación y procesamiento digital de señales. Estos sensores distribuidos a lo largo y ancho de las edificaciones permiten identificar la ubicación y dimensión del daño a partir de los cambios de las estructuras en sus características estáticas y dinámicas. Las informaciones de las características dinámicas de los edificios se

pueden medir mediante sensores de aceleración (acelerómetros) que emplean señales como vibraciones ambientales, vibraciones forzadas y sensores de desplazamiento. El valor agregado de estas herramientas es que se puede implementar a distancia y en tiempo actual, lo que reduce los costos de inspección y tiempo de alerta. Estos equipos de sensores entregan información cuantitativa y son utilizados en la detección de grietas, presencia de corrosión en armaduras o dudas en la estabilidad de algún elemento estructural.

Una red de instrumentación es un mecanismo estratégico para el trabajo conjunto entre el grupo INME de la Universidad Industrial de Santander, gremio constructor y sector inmobiliario pues impulsará la innovación, la investigación, y aportará soluciones a la necesidad de inspeccionar o monitorear las edificaciones. La consolidación de una base de datos con información estructural, permitirá evaluar, analizar y controlar las fallas en el control urbano en el proceso de planificación de la ciudad.

BIBLIOGRAFIA

ABE, M., et al. *Monitoring of a Long Span Suspension Bridge by Ambient Vibration Measurement*. Palo Alto, California: Structural Health Monitoring, Stanford University, 2000.

AGNENI, A.; CREMA, L.B.; and MASTRODDI, F. *Damage Detection from Truncated Frequency Response Functions*. Madrid, Spain: European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, 2000.

ALCÁNTARA, Leonardo, et al. *Instrumentación sísmica de un edificio de telecomunicaciones*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 2004.

BERNARD, A. y TOUBOUL, P. *The Gradio Accelerometer: Disign and Development Status*. ESA SP-329, 1991, pp. 61-67.

BOROSCHEK, Rubén, et al. *Investigación edificios emblemáticos diagnostico e identificación de daño estructural*. Chile, 2010.

CARREÑO, R. *Variación de las propiedades dinámicas del Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción: caso sísmico*. [Tesis pregrado]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Ingeniería Civil, 2009.

CARRIÓN, Francisco. *Metodologías de inspección no destructiva aplicables a sistemas de gestión de puentes*. México: Publicación Técnica No 302 Sanfandila, Qro, 2006.

MARTÍNEZ, Luis. *Sistema inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 464 Sanfandila, Qro, 2016. ISSN 0188-7297.

CONSUEGRA, F. and IRFANOGLU, A. Variation of small amplitude vibration dynamic properties with displacement in reinforced concrete structures. *Experimental Mechanics*, 2012. doi 10.1007/s11340-011-9590-0.

CONSUEGRA, Fabián; MARULANDA, Camilo; y PHILLIPS, Camilo. *Interacción suelo-estructura como factor en las vibraciones perceptibles de un edificio en Bogotá*. Bogotá: VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Universidad de los Andes, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2015.

DÍAZ, Miguel; ZAVAL, Carlos; y ESTACIO, Lucio. *Implementación del sistema de monitoreo de la salud estructural de edificios en la ciudad de Lima en el marco del proyecto SATREPS*. Perú: XIX congreso nacional de ingeniería civil, 2015.

DOMÍNGUEZ-CAICEDO, Mauricio. Períodos de vibración de las edificaciones. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 1-13.

FEDERICI, Fabio, et al. *Design of Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring applications*. Italia: Euro Sensors, the XXVIII edition of the conference series, 2014.

GUPTA, I. D. Using strong-motion accelerograms for estimation of local magnitudes of earthquake in Himalayan region. *ISSET Journal of Earthquake Technology*, 2000, vol. 37, no. 398, pp. 1-10.

GUSTAVO, L. *Implementación de un algoritmo de monitoreo de salud estructural*

basado en objetos simbólicos y clasificación por agrupamiento. [Tesis de magister]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Ingeniería Civil y Magíster en Ingeniería Sísmica, 2017.

HENRY, J. *Optimización del control de la resistencia del hormigón de la obra de la depuradora del Besós mediante ultrasonidos*. [Tesis Pregrado]. Barcelona: Univ. Politécnica de Catalunya, departamento de la construcción, 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION, INN-CHILE, norma chilena oficial NCh 433.of1996 modificada en 2009.

JEREZ, C. A. R. Metodología de monitoreo de daño estructural para puentes simplemente apoyados: implementación numérica. *Medellín: Revista Facultad de Ingeniería*, 2007, no. 39.

KRAKHMAL'NY, S.I. EVTUSHENKO, M.P. KRAKHMAL'NAYA. *New System of Monitoring of a Condition of Cracks of Small Reinforced Concrete Bridge Constructions*. Platov, Russian: International Conference on Industrial Engineering, ICIE, 2016.

LOMBILLO, I.; et al. Evaluación no destructiva del patrimonio construido. *Revista internacional Construlin*, 2008, vol. 6, no. 16, pp. 40-53.

MAHESHWARI, Muneesh, et al. Combined Fiber Bragg Grating and Fiber Optic Polarimetric Sensors on a Single Fiber for Structural Health Monitoring of Two-Dimensional Structures. *Structural Health Monitoring*, 2016, vol. 15, no. 5, pp. 599–609, doi:10.1177/1475921716654132.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10, Segunda actualización, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO, Norma técnica Peruana E.030. Diseño Sismorresistente, Resolución Ministerial, Lima, 2018.

MONTEAGUDO, S. *Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos*. [Tesis Máster Estructuras]. Madrid: Univ. Politécnica de Madrid, 2010.

MORA, Ignacio; MURÍA, Dacid; y FRONTANA, Bernando. *Acelerógrafos a cargo del instituto de ingeniería: Características y algunos resultados*. Guadalajara: Memorias V Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 1979, Jal. 31.

MOYA, L. y ZAVALA, C. *Structural Evaluation of Block G2 of the Faculty of Civil Engineering – UNI*. Preliminary Report for Satreps- JST-JICA Project, 2012.

MURIÁ, David y GONZÁLEZ, Ricardo. Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. *México: Revista de Ingeniería Sísmica*, 1995, no. 51, pp. 25-45.

NÚÑEZ, Tomas. *Variación debido a cambios de masa y rigidez de las propiedades dinámicas de una estructura en proceso constructivo*. [Tesis de magister]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Ingeniería Civil y Magíster en Ingeniería Sísmica, 2009.

NÚÑEZ, Tomas; y BOROSCHEK, Rubén. *Monitoreo continuo de una estructura en proceso constructivo*. Valdivia-Santiago, Chile: 10 congreso chileno de sismología en ingeniería antisísmica, 2010.

OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R.; y BUCK J. Discrete-Time Signal Processing (2d Edition). Pearson Prentice Hall Safak E. 1995. Detection and identification of soil-structure interaction in buildings from vibration recording. *Journal of Structural Engineering*, 2006, vol. 121, no. 5, pp. 889-906.

PÉREZ-CARDOZO, Miguel. *Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 349 Sanfandila, Qro., 2012.

PLAN MUNICIPAL DE GESTION DEL RIESGO DE DESASTRE, PMGRD DE BUCARAMANGA, Primera versión Bucaramanga, diciembre de 2013, Fecha de elaboración: septiembre de 2012 Actualización: diciembre de 2013 Elaborado por: CMGRD de Bucaramanga.

RENADIC – UCH. *Edificio de la Cámara chilena de la construcción*. [En línea]. Santiago de Chile: Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2010. Disponible en: <http://www.terremotosuchile.cl/anexos/camara2.html>.

RUIZ, Daniel. *Referente Nacional en Sistema de instrumentación sísmica*. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería, 2015.

RYTTER, A. *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Denmark: Dissertation, Aalborg University, Department of Building Technology and Structural Engineering, 1993.

SAFAK, E. Detection and identification of soil-structure interaction in buildings from vibration recording. *Journal of Structural Engineering*, 1995, vol. 121, no. 5, pp. 889-906.

SALAZAR, J. Diseño e implementación de un sensor de fuerza de 6 grados de libertad. [Tesis Magister]. *Barcelona: Automática & Robótica, Univ. Politécnica de Catalunya*, 2011.

SAUTER, F. *Fundamentos de Ingeniería Sísmica: Introducción a la Sismología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2007.

SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA Y SECRETARIA DE OBRAS Y SERVICIOS. Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las edificaciones (NTC-RSEE), Ciudad de México, 2017.

SIFUENTES, A. I. *Evaluación de la salud estructural de edificios usando la curva de desempeño sísmico en tiempo real*. [Tesis de Magister]. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2015.

SOHN, H., et al. A Review of Structural Health Monitoring Literature form 1996-2001. *Los Alamos National Laboratory report LA-13976-MS*, 2004.

TAVUKCUOGLU, A.; AKEVREN, S.; y GRINZATO, E. In situ examination of structural cracks at historic masonry structures by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing. *Journal of Modern Optics*, 2010, vol. 57, no. 18, pp. 1779–1789.

TENA, A. *El macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995*. Universidad de Colima, Gobierno del Estado de Colima y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C., 1997, pp. 197-232.

TOBIO, J. *Ensayos no destructivos, métodos aplicables a la construcción*, citado por MONTEAGUDO, S. *Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos*. [Tesis Máster Estructuras]. Madrid: Univ. Politécnica de Madrid,

2010.

TRIFUNAC, Mihailo. Comparisons between ambient and forced vibration experiments. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1972, vol. 1, pp. 133-150.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. *Concepto técnico en relación a las causas más probables del colapso del edificio Space*. Medellín, Colombia: Alcaldía de Medellín, 2014.

VIVIESCAS, A.; CARRILLO, J.; y VARGAS, L. Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental. *INGE CUC*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 52-65.

WANG, B.; ZHANG, Z.; HE, C.; y ZHENG, H. Implementation of a long-term monitoring approach for the operational safety of highway tunnel structures in a severely seismic area of China. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, vol. 24, no. 11, pp. 1-18.

XIAODAN, F. Design and implementation of remote health monitoring system for 3D visual Bridge. *China: Procedia Engineering*, no. 174, 2017.