
Instrumentación para Monitoreo de Salud Estructural de Edificaciones

Ana María Pérez Duran

Trabajo de Grado para Optar el título de Especialista en Estructuras

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ingeniero Civil - PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2019

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo General	14
1.2. Objetivos Específicos	14
2. Alcance	14
3. Marco Teórico	15
3.1. Salud Estructural	15
3.2. Conceptos de Dinámica Estructural	15
3.2.1. Frecuencia y Periodo	16
3.2.2. Amortiguamiento	16
3.2.3. Grados de Libertad	18
3.2.4. Formas Nodales	20
3.2.5. Excitación Dinámica	20
3.3. Instrumentación Sísmica	22
4. Tipos de Instrumentos	24
4.1. Indicadores	24
4.2. Sensores	25
4.2.1. Acelerógrafos	25
4.2.2. Acelerómetros.	26

INSTRUMENTACION PARA MONITOREO EN EDIFICACIONES	5
4.2.3. Inclínometros	29
4.2.4. Galgas Extensométrica o Transductor	29
5. Pasos para Instrumentar un Edificio	30
5.1.1. Línea Base	34
5.1.2. Modelo Numérico Inicial	34
5.1.3. Calibración	35
6. Antecedentes Internacionales	36
6.1. México	37
6.1.1. Normativa Mexicana	37
6.1.2. Antecedentes	38
6.2. Chile	46
6.2.1. Normativa Chilena	46
6.2.2. Antecedentes	47
6.3. Estados Unidos	55
6.3.1. Normativa Estadounidense	55
6.3.2. Antecedentes	57
7. Estado Actual de la Instrumentación de Edificios en Colombia	59
7.1. Normativa Colombiana	59
7.1.1. Localización	60
7.1.2. Características Donde se Coloca la Instrumentación	61

7.1.3. Colocación de Instrumentos	61
7.2. Principales Realizaciones de Edificaciones Instrumentadas en Colombia	62
7.2.1. Edificio 350 – Univalle	62
8. Análisis Crítico	67
8.1. Costos Asociados a la Instrumentación Sísmica en Edificaciones	69
9. Conclusiones	70
Referencias Bibliográficas	71

Lista de Figuras

Figura 1. Modelo del Amortiguador.	17
Figura 2. Fuerza de Amortiguamiento De Coulomb.	17
Figura 3. Sistema de Masa Concentrada.	18
Figura 4. Sistema de Masa Distribuida.	18
Figura 5. Modelo de en Solo Grado de Libertad.	19
Figura 6. Modelo de Varios Grados de Libertad.	19
Figura 7. Tres Modos de Vibración.	20
Figura 8. Acelerómetro Piezoeléctrico	27
Figura 9. Acelerogramas Registrados en la Estación Parque de las Garzas Cali, Sismo del 30 de Septiembre del 2012.	28
Figura 10. Galga Extensométrica.	30
Figura 11. Recomendación de Posicionamiento de Instrumentos.	31
Figura 12. Posicionamiento de 12 Sensores.	32
Figura 13. Ubicación de los Sensores y Vista en Planta.	44
Figura 14. Acelerogramas Obtenidos.	45
Figura 15. Ubicación de los Sensores.	47
Figura 16. Ubicación de los Sensores.	48
Figura 17. Comparación de Acelerogramas, Primer y Último Piso.	49
Figura 18. Frecuencias y Aceleraciones Pico Efectivas de las Direcciones E-W Y N-S.	50
Figura 19. Registro de la Aceleración en la Fundación.	51
Figura 20. Registro de la Velocidad en la Fundación.	52
Figura 21. Registro del Desplazamiento en la Fundación.	52

Figura 22. Registro de Aceleraciones en el Cuarto Piso.	53
Figura 23. Registro de Velocidades en el Cuarto Piso.	53
Figura 24. Registro de Velocidades en el Cuarto Piso.	54
Figura 25. Espectros de Respuesta Elástica de Aceleración del Suelo.	54
Figura 26. Número Mínimo de Instrumentos.	56
Figura 27. Ubicación de Acelerógrafos.	58
Figura 28. Amplificación de los Movimientos Correspondientes a la Planta Alta, Media y Baja, En Comparación a la Respuesta en la Isla Yerba Buena, con Aproximadamente la Misma Distancia Epicentral	59
Figura 29. Planta de Edificio 350.	62
Figura 30. Ubicación de Sensores en el Edificio 350.	63
Figura 31. Respuesta del Edificio 350 ante Sismo de Magnitud 4,5.	64
Figura 32. Respuesta del Edificio 350 ante Sismo de Magnitud 3,6.	64
Figura 33. Aceleraciones Pico Según las Horas del Día.	65
Figura 34. Aceleraciones Pico Durante una Semana.	65
Figura 35. Variación de las Frecuencias en Función del Tiempo.	66

Lista de Tablas

Tabla 1. Tipos de Excitación Dinámica.	21
Tabla 2. Tipos de Instrumentación.	24
Tabla 3. Actividades Fundamentales del Monitoreo Estructural.	33
Tabla 4. Desplazamientos Relativos para Cada Dirección.	40
Tabla 5. Ubicación, Tipo y Dirección de Sensores.	45
Tabla 6. Aceleraciones Obtenidas en el Sismo del 18 de Agosto de 2004.	46
Tabla 7. Valores Máximos de Aceleración, Velocidad y Desplazamiento .	51
Tabla 8. Número Mínimo de Instrumentos Según el Número de Pisos.	56
Tabla 9. Registro de Eventos Sísmicos.	58

Resumen

TITULO: INSTRUMENTACION PARA MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES*

AUTOR: ANA MARIA PEREZ DURAN**

PALABRAS CLAVE: salud estructural, monitoreo, instrumentación, acelerógrafo, acelerograma,

DESCRIPCION:

Es necesario conocer los efectos que las fuerzas dinámicas producen a las estructuras para detectar e identificar posibles daños y sus factores, por eso, se da la necesidad de abordar el comportamiento de una estructura a través la instrumentación sísmica. Al ser Colombia un país, en que la mayoría de su territorio se encuentra en zonas de amenazas sísmicas altas e intermedia, se hace un enfoque a las excitaciones dinámicas producidas por eventos sísmicos, mediante la caracterización de las propiedades dinámicas de la estructura que permiten entender el estado de la estructura y las posibles futuras respuestas ante eventos sísmicos fuertes, ya que, al instrumentar una estructura, se puede comprobar que el modelo matemático propuesto es el adecuado según la respuesta de la misma ante un sismo. Al obtener dicha comparación, se puede mejorar los modelos, acercándolos al comportamiento real de la edificación.

El presente trabajo presenta una revisión del estado del arte sobre la instrumentación de estructuras y los dispositivos para dicho fin. Para esto se desarrollan conceptos básicos de dinámica estructural y salud estructural, se expondrán algunos dispositivos comúnmente utilizados en la instrumentación de edificaciones y como, según la normativa colombiana y algunas normativas internacionales se instrumenta una edificación. Se tratarán ejemplos de edificios instrumentados en países como México, Estados Unidos, Chile y algunas de las principales realizaciones en Colombia.

* Monografía

**Facultad de ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director, PhD Álvaro Viviescas Jaimes

Abstract

TITLE: INSTRUMENTATION FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING IN BUILDINGS

AUTHOR: ANA MARIA PEREZ DURAN

KEYWORDS: structural health, monitoring, instrumentation, accelerograph, accelerogram.

DESCRIPTION:

It's necessary to know the effects that dynamic forces produce to structures to detect and identify possible damages and their factors, therefore, there is the need to address the behavior of a structure through seismic instrumentation. Since Colombia is a country, in which most of its territory is located in areas of high and intermediate seismic threats, an approach is made to the dynamic excitations produced by seismic events, by characterizing the dynamic properties of the structure that allows us to understand the state of the structure and the possible future responses to strong seismic events, since, when implementing a structure, it can be verified that the proposed mathematical model is adequate according to its response to an earthquake. By obtaining this comparison, you can improve the models, bringing them closer to the real behavior of the building.

This paper presents a review of the state of the art on the instrumentation of structures and devices for that purpose. For this, basic concepts of structural dynamics and structural health are developed, some devices commonly used in the instrumentation of buildings will be exposed and how, according to Colombian regulations and some international regulations, a building is implemented. Examples of instrumented building in countries such as Mexico, United States, Chile and major realizations in Colombia will be discussed.

* Monograph

**Physicomechanical faculty of engineering, School of Civil Engineering. Director, PhD Álvaro Viviescas Jaimes

Introducción

Además de estudiar la naturaleza del movimiento de la tierra, la comunidad de ingeniería estructural está interesada en el conocimiento de las respuestas de las estructuras ante eventos sísmicos para conocer los parámetros estructurales que son de interés para la seguridad y confiabilidad de la estructura. Se mide mediante la instrumentación de estructuras, con el fin de registrar la respuesta de las estructuras mientras están sometidas a cargas dinámicas como eventos sísmicos, viento, maquinaria, personas o vehículos desplazándose, colisiones y explosiones (Uma, King, Cousins, & Gledhill, 2011). Por ser la amenaza sísmica en Colombia el factor que gobierna los diseños, se estudiara la instrumentación para el monitoreo de edificaciones ante eventos sísmicos.

Se ha buscado entender el comportamiento y el estado de las estructuras ante una excitación dinámica, mediante la instrumentación de estructuras, se puede monitorear, evaluar y medir las respuestas de las estructuras ante cargas dinámicas, y así determinar, localizar y cuantificar los daños en las mismas (Mehmet Celebi, Safak, & Brady, 1986).

La utilización de instrumentos como acelerómetros y galgas extensométricas, que permitan, entre otros aspectos, la verificación de los modelos matemáticos de diseño y el procesamiento de parámetros relacionados a los periodos y modos de vibración de la estructura; para detectar posibles daños producidos después de un evento sísmico y poder así, encontrar soluciones reduciendo la vulnerabilidad de la edificación y aumentando la confiabilidad de la misma (Barreto & Sanchez, 2015).

La instrumentación deberá proveer suficiente información para reconstruir la respuesta de la estructura con suficiente detalle para comparar con la respuesta predicha por los modelos

matemáticos, con el objetivo de mejorarlos. Adicionalmente, los datos deben hacer posible explicar las razones de cualquier daño en la estructura (Mehmet Celebi et al., 1986).

Esto se puede alcanzar mediante la comprensión del comportamiento dinámico de estructuras nuevas y existentes, por lo tanto, verificar las suposiciones en el diseño estándar bajo eventos sísmicos (Uma et al., 2011). Una instrumentación deberá dar también, detallada información sobre la respuesta de la estructura para conseguir comparar con la respuesta predicha por un modelo matemático, para lograr así, mejorar la propuesta de los modelos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Profundizar en el estudio y evaluar la importancia de la posible aplicación en Colombia de la instrumentación para el monitoreo del comportamiento de edificaciones ante eventos sísmicos.

1.2. Objetivos Específicos

Hacer una revisión de literatura sobre sistemas de instrumentación para el monitoreo de salud estructural en edificaciones.

Realizar una revisión de la norma colombiana, así como de las normas internacionales sobre instrumentación sísmica en edificaciones.

Describir ejemplos de edificios instrumentados en el entorno internacional y el caso colombiano.

2. Alcance

Según el Reglamento General de Posgrado, en su Acuerdo 075 de 2013, Capítulo III, del trabajo de grado, en su Artículo 51, el cual reglamenta que, si el proyecto educativo del programa de especialización lo contempla, el candidato a especialista realizara un trabajo de grado individual en la modalidad de monografía. El alcance del presente trabajo, es el de un texto argumentativo, con función informativa, que presenta y organiza los datos, obtenidos de varias fuentes sobre Instrumentación para Monitoreo de Salud Estructural en Edificios y analizarlos con una visión crítica.

3. Marco Teórico

3.1. Salud Estructural

El monitoreo de salud estructural es un proceso que consiste en la captura periódica o continua, ya sea de forma permanente o habitual, de los parámetros estáticos y dinámicos representativos que permiten conocer el estado de una estructura. El monitoreo de salud estructural permite identificar la presencia de daños, así como el comportamiento de las estructuras que pueden ser comparadas con el análisis estructural (Marulanda & Thomson, 2011).

Al iniciar un monitoreo estructural, se deben identificar los parámetros que se emplearan para realizar los objetivos propuestos, debe realizarse cuidadosamente, ya que dichos parámetros, deben mostrar la respuesta real de la estructura. Cuando se tienen identificado los parámetros que se monitorearan, se procede a seleccionar los dispositivos para obtener las mediciones. La selección del sistema de monitoreo más adecuado, depende de los objetivos, de los parámetros elegidos, de la precisión de las mediciones, las condiciones del lugar en donde será instalado, ya que no debe haber campos electromagnéticos, humedad o variaciones de temperatura que interfieren en las mediciones (Quintero & Villamizar, 2010).

3.2. Conceptos de Dinámica Estructural

La dinámica se entiende como el estudio de los cuerpos en movimiento. La dinámica se divide en dos campos, la cinemática, la cual estudia la geometría del movimiento, relacionando el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo, sin hacer referencia a las causas del movimiento y en la cinética, la cual estudia la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo,

la masa del cuerpo y su movimiento, permitiendo predecir los movimientos que causan las fuerzas, o determinar las fuerzas necesarias para producir un movimiento (Maldonado & Chio, 2004).

La dinámica estructural estudia las vibraciones de cuerpos flexibles y rígidos, teniendo en cuenta factores como desplazamiento, velocidad, tiempo y masa, permitiendo de esta manera establecer la relación entre ellas (Barreto & Sanchez, 2015).

3.2.1. Frecuencia y Periodo. El Periodo natural de la estructura se define como el tiempo requerido en que la estructura realiza un ciclo bajo una vibración libre, se expresa en segundos por ciclo. La frecuencia es el valor inverso del periodo natural, el cual representa al número de oscilaciones o de vibraciones de un movimiento periódico que se producen durante cada unidad de tiempo, se expresa en Hertz (Hz), como lo expresa la Ecuación 1 (Maldonado & Chio, 2004).

$$T = \frac{1}{f} \quad f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Ecuación 1}).$$

3.2.2. Amortiguamiento. Una estructura sometida a un sismo oscila constantemente durante un tiempo determinado y su movimiento tiende a disminuir con el tiempo debido a la pérdida de energía, siendo disipadas por fuerzas llamadas de fricción o amortiguamiento. Existen varias formas de describir los fenómenos de amortiguamiento los cuales se presentan a continuación (García Reyes, 1998).

3.2.2.1. Amortiguamiento Viscoso. El amortiguamiento considera que las fueras de amortiguación son proporcionales a la magnitud de la velocidad y opuestas al movimiento. Expresada en la Ecuación 2.

$$F_a = c\dot{u} \quad (\text{Ecuación 2}).$$

Donde F_a , la fuerza producida por el amortiguador, c la constante del amortiguador y $\dot{u}$ es la velocidad relativa entre los dos extremos del amortiguador, como se muestra en la Figura 1 (Maldonado & Chio, 2004).

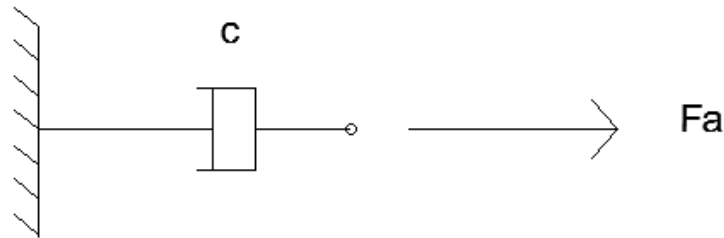


Figura 1. Modelo del amortiguador. Adaptado de: (García Reyes, 1998).

3.2.2.2. Amortiguamiento de Coulomb. Este amortiguamiento se produce por el rozamiento o deslizamiento entre superficies evidenciado en la Figura 2, la fuerza de amortiguamiento es proporcional al producto de la fuerza normal a la superficie y el coeficiente de fricción (Chopra, 2012).

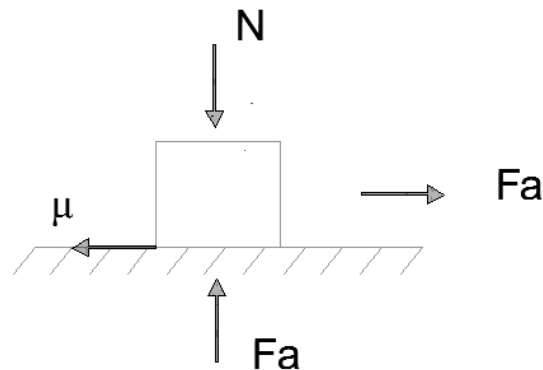


Figura 2. Fuerza de amortiguamiento de Coulomb. Adaptado de: (Maldonado & Chio, 2004).

3.2.3. Grados de Libertad. El número de grados de libertad, corresponde al número mínimo de coordenadas necesarias para definir la posición en el espacio y en el tiempo de todas las partículas de masa del sistema. Se evidencia en la Figura 3, que, cuando se trata de sistemas rígidos, en los cuales no puede haber desplazamiento relativo entre las partículas de masa, las propiedades de la masa se pueden describir referidas a su centro de masa. Esto conduce a lo que se conoce como sistemas de masa concentrada. Como se muestra en la Figura 4, cuando la masa hace parte de un elemento flexible se tiene un sistema de masa distribuida y por consiguiente se puede hablar de un número infinito de grados de libertad (García Reyes, 1998).

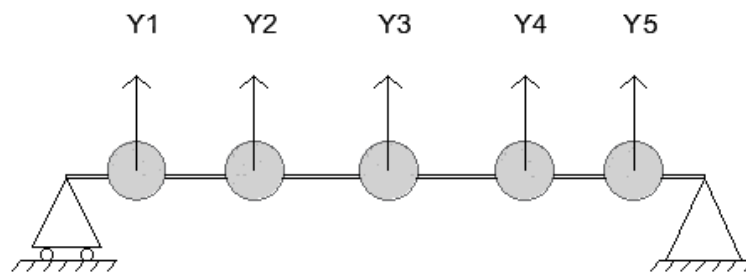


Figura 3. Sistema de Masa Concentrada. Adaptado de (García Reyes, 1998).

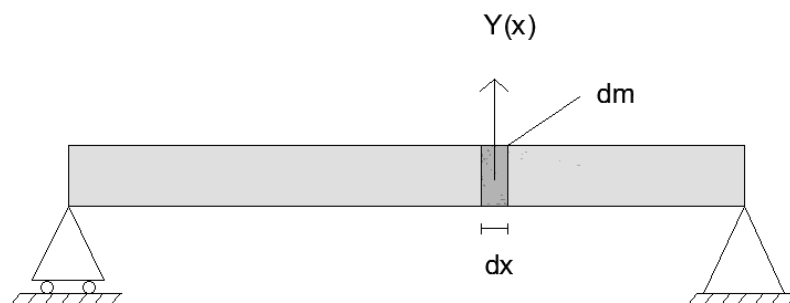


Figura 4. Sistema de Masa Distribuida. Adaptado de (García Reyes, 1998).

Una estructura puede modelarse como un sistema de uno o varios grados de libertad. Las estructuras modeladas como un sistema de un solo grado de libertad, como los de la Figura 5, son aquellas correspondientes con un solo desplazamiento, los cuales tienen un elemento de masa m ,

un elemento k el cual representa las fuerzas internas del sistema y la capacidad de rigidez del sistema y el elemento P , que equivale a las fuerzas externas que actúan sobre el sistema.

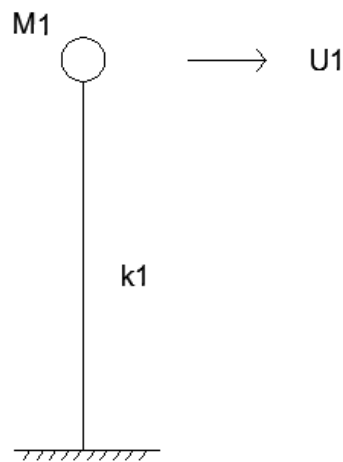


Figura 5. Modelo de un solo grado de libertad.

En situaciones que la modelación como un solo grado de libertad puede ser conservadora, es necesario usar un modelo con varios grados de libertad, como en la Figura 6, siendo su representación, una generalización de los sistemas de un grado de libertad.

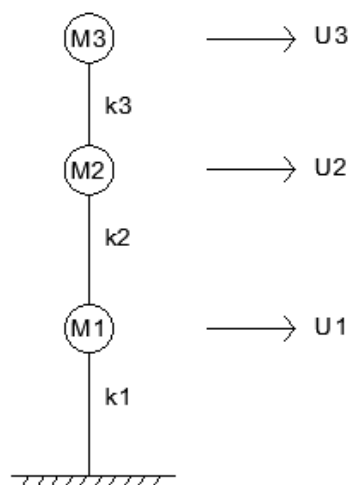


Figura 6. Modelo de varios grados de libertad.

3.2.4. Formas Nodales. Ante una acción dinámica, las estructuras reaccionan de formas diferentes. Estas respuestas están relacionadas con las formas o modos de vibración y sus correspondientes frecuencias y periodos propios (Cassano, 2009). Cada modo natural de vibración de la estructura puede calcularse en forma independiente de las otras, cada modo con su propio patrón particular de deformación, como lo muestra la Figura 7, la forma modal con su propia frecuencia natural y con su propio amortiguamiento (Chopra, 2012).

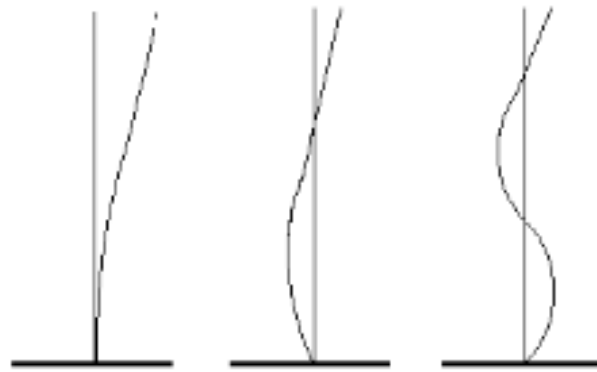
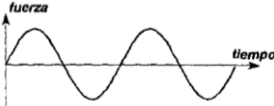
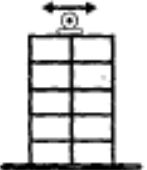
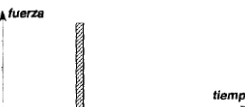
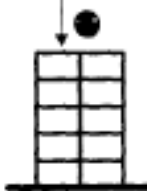
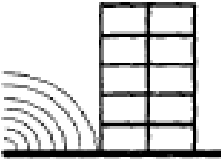
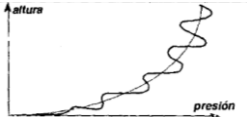
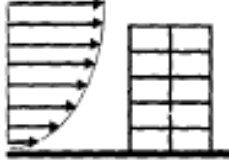
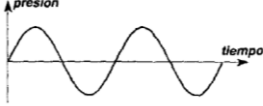
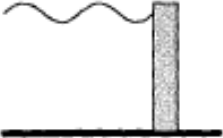
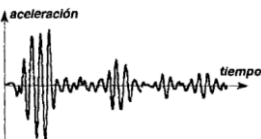
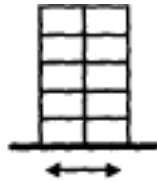


Figura 7. Tres Modos de Vibración. Tomado de (Espinoza, 2016).

3.2.5. Excitación Dinámica. Toda estructura se ve afectada numerosas veces durante su vida por efectos dinámicos que van desde magnitudes despreciables, hasta efectos que pueden poner en peligro su estabilidad (García Reyes, 1998). Se muestra un resumen en la Tabla 1 con los tipos de excitación dinámica.

Tabla 1
Tipos de Excitación Dinámica

Causa	Ilustración	
Equipos mecánicos: Efectos causados por maquinarias y equipos que tengan componentes que roten o se desplacen periódicamente.		
Impacto: Una masa que sufre colisión con otra, induce una fuerza impulsiva aplicada sobre las dos masas, la cual induce vibraciones.		
Explosiones: Una explosión produce ondas de presión en el aire o movimientos del terreno.		
Viento: La intensidad de las presiones que ejerce el viento sobre las estructuras induce vibraciones sobre ellas.		
Olas: Las olas inducen efectos dinámicos correspondientes a las variaciones del empuje hidráulico sobre las estructuras hidráulicas.		
Sismos: El efecto sobre las estructuras de los movimientos del terreno por la ocurrencia de un sismo, conduce a vibraciones importantes.		

Nota: Adaptado de (García, 1998).

3.3. Instrumentación Sísmica

La filosofía del diseño de edificios permite que, en los sistemas estructurales, además de resistir las fuerzas que le imponen su uso, resistan sismos de poca intensidad sin daño, sismos moderados sin daño estructural pero posibles daños en elementos no estructurales y en sismos fuertes con daños en elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso. *“Por ello es necesario entender el comportamiento de éstos más allá de su límite de comportamiento elástico”*. (Fuentes-Olivares & Muria-Vila, 2001). *“La disparidad en las consideraciones del modelado, puede llevar a los analistas a obtener diferencias mayores al cien por ciento en sus resultados, así se emplee la misma herramienta matemática”* (Muria David; Gonzales Ricardo, 1991).

El objetivo principal de la instrumentación sísmica para sistemas estructurales, es mejorar la comprensión del comportamiento e identificar potenciales daños en las estructuras bajo las cargas dinámicas de sismos. Como resultado de este entendimiento, las prácticas de diseño y construcción pueden ser modificadas para minimizar el daño del sismo futuro (Mehmet Celebi, 2000). Una estructura bien instrumentada, de la cual se han obtenido un conjunto de registros, debería proporcionar información útil para verificar la validez del modelo dinámico (tanto de masa concentrada como finita) en el rango elástico, determinar la importancia del comportamiento no lineal en la respuesta general y local de la estructura, seguir la extensión del comportamiento no lineal a lo largo de que la respuesta de la estructura se aumenta y determinar el efecto del comportamiento no lineal en la frecuencia y el amortiguamiento, correlacionar el daño con el comportamiento inelástico, determinar los parámetros de movimiento del terreno que se correlacionen con la respuesta de daños del edificio, hacer recomendaciones para mejorar los códigos sísmicos, facilitar las decisiones para modernizar y fortalecer el sistema estructural, así como asegurar el contenido dentro de las estructuras (Mehmet Celebi, 2000).

El uso de esta información permite contrastar los datos obtenidos en las condiciones reales, con aquellos datos teóricos determinados en el diseño estructural y así, conocer el comportamiento dinámico de la estructura.

Además de estudiar la respuesta dinámica de los edificios durante un sismo, la información registrada es fundamental para validar las hipótesis del comportamiento estructural empleadas en los modelos de análisis y diseño, cuantificar la influencia de las condiciones locales del sitio y caracterizar la incidencia de elementos no estructurales en la respuesta sísmica (Vargas, 1999).

Según la Organización de las Naciones Unidas, la población del mundo es posible que aumente en un 25% en los próximos 50 años (UN, 2001). Debido a que este crecimiento se dará en las ciudades, se necesitará de una infraestructura renovada. Las demandas e incertidumbres involucradas en proyectos de renovación de la infraestructura moderna, apuntan al uso de instrumentación en proyectos actuales (Iskander & Nerik, 2009).

La aceleración ha sido un fenómeno tradicionalmente medido, mayormente porque no había sensores para otros parámetros en el pasado. La adquisición del equipo, la transmisión de datos y el software de procesamiento han estado orientados a registrar las aceleraciones. El segundo fenómeno es la deriva entre pisos, considerado el indicador más útil del daño estructural. Es un fenómeno global, en vez de un fenómeno local, lo cual significa que es menos costoso de medir más de la categoría final que abarca la integridad de los nudos individuales usando indicadores como el descascaramiento del concreto, fractura del acero, rotación de los nudos, entre otros (Deam & Cousins, 2002).

4. Tipos de Instrumentos

Hay dos categorías de instrumentación: indicadores y sensores. Se muestra en la Tabla 2, según el fenómeno, su respectivo indicador o sensor. Los indicadores son usados principalmente para detectar sobre si algo ha sucedido y posiblemente cuanto, mientras que los sensores se usan para medir la cantidad y almacenar su variación con el tiempo utilizando un sistema de datos (Deam & Cousins, 2002).

Tabla 2.
Tipos de Instrumentación

Fenómeno	Indicador	Sensor
Aceleración de Baja Frecuencia	Scratch - plate	Acelerógrafo
Deriva entre piso	Muros no estructurales	Acelerómetro
Integridad Estructural	Cintas de Alarma	Potenciómetro

Nota: Adaptado de (Deam & Cousins, 2002).

4.1. Indicadores

Los indicadores son instrumentos utilizados para mostrar visualmente el valor de una cantidad medida. Los indicadores suelen proporcionar menos información y son menos costosos que los sensores. Son más adecuados para proporcionar información a los ocupantes y al propietario del edificio si el edificio presenta daños o no. Por su naturaleza la mayoría de los indicadores no son capaces de transmitir la información de forma electrónica, lo que facilita su instalación y, posiblemente, también más sencillo de mantener, pero hace que sea más costoso recopilar la información después de un terremoto. De manera similar, los muros no estructurales se podrían usar para indicar las máximas deformaciones entre piso de un edificio, cuando sus placas superior e inferior son unidas a las losas de piso arriba y abajo. La deformación máxima está relacionada

aproximadamente con la cantidad de daño alrededor del perímetro de las placas. La integridad estructural se puede indicar, por medio de envolver las conexiones estructurales críticas con “cintas de alarma”, se denota daño cuando la cinta se estira demasiado ya sea en una grieta del concreto o una junta pernada con daño (Deam & Cousins, 2002).

4.2. Sensores

Los sensores forman el primero de los componentes en un sistema de adquisición de datos que se utiliza para registrar la variación de la cantidad física con el tiempo. Siendo el sensor un dispositivo diseñado para recibir información para luego transformarla en una magnitud eléctrica, que se puede cuantificar, manipular y almacenar en una base de datos (Deam & Cousins, 2002).

4.2.1. Acelerógrafos. Acelerógrafos son usados para registrar aceleraciones de baja frecuencia (menores que 100 Hz), y normalmente tienen una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Algunos modelos son capaces de registrar frecuencias más altas transitorias, como aquellas causadas por el impacto estructural o fractura dentro de la estructura que tienen aceleraciones en el rango de, por ejemplo, de 1 a 10 kHz, pero esto no se realiza de manera rutinaria debido al gran volumen de datos. Un acelerógrafo contiene acelerómetros para registrar el movimiento del suelo. El registro que se obtiene se conoce como acelerograma. (Deam & Cousins, 2002).

4.2.2. Acelerómetros. Los acelerómetros son instrumentos cuya función es medir las aceleraciones producidas por un movimiento (Barreto & Sanchez, 2015). Acelerómetros de alta precisión son requeridos para monitorear edificios porque los usos principales de los datos son para obtener un historial de desplazamiento mediante la integración doble del registro o la Transformada de Fourier (Deam & Cousins, 2002). *“La Transformada de Fourier se utiliza para pasar al dominio de la frecuencia una señal para así obtener información que no es evidente en el dominio temporal. Son aplicadas a las señales para obtener información de las frecuencias, midiendo la frecuencia en ciclos por segundo o Hertz. La señal se divide en frecuencias organizadas en bandas uniformes”* (Bayona & Cruz, 2014). Se muestra la expresión de la transformada de Fourier en la Ecuación 3.

$$g(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\varepsilon x} dx \text{ (Ecuación 3).}$$

Esto se vuelve aún más importante cuando se usan diferencias para calcular las deformaciones relativas entre dos pisos. Debido que a menudo son las deflexiones entre pisos las que son de mayor interés, es conveniente registrarlos directamente (Deam & Cousins, 2002).

Los acelerómetros son dispositivos para medir aceleración y vibración. Estos dispositivos convierten la aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la aceleración del sistema, o del mecanismo sometido a vibración o aceleración. Esta señal analógica indica la aceleración instantánea del objeto en tiempo real, sobre el cuerpo (Galindo, 2010).

4.2.2.1. Acelerómetro Mecánico. Está compuesto por la unión de una masa inerte y un dinamómetro cuyo eje se encuentra en la misma dirección que la aceleración que se desea medir. En este tipo de acelerómetro los cambios se miden con galgas extensométricas, los cuales incluyen sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación (Barreto & Sanchez, 2015).

4.2.2.2. Acelerómetro Piezoeléctrico. Su funcionamiento se basa en la compresión de un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada y probablemente es de los más usados en la medida de vibraciones. Su principal inconveniente se encuentra en su frecuencia máxima de trabajo y en la incapacidad de mantener un nivel permanente de salida ante una entrada continua, se muestra un acelerómetro piezoeléctrico comúnmente usado en la Figura 8 (Galindo, 2010).

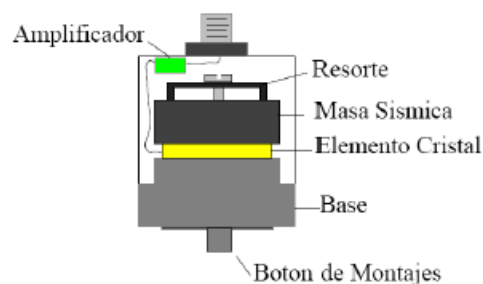


Figura 8. Acelerómetro Piezoeléctrico (Galindo, 2010).

4.2.2.3. Acelerómetro de Condensador. Miden el cambio de capacidad eléctrica de un condensador mediante una masa sísmica situada entre las placas del mismo, que al moverse hace cambiar la corriente que circula entre las placas del capacitor. Todos los registros obtenidos por los acelerómetros se denominan acelerogramas. Estos corresponden a los valores de aceleración del terreno, en dirección Norte – Sur, Este – Oeste y verticales (Barreto & Sanchez, 2015).

Se muestra en la Figura 9, un ejemplo de acelerogramas, los cuales fueron registrados en el sismo del 30 de septiembre del 2012 en la estación Parque de las Garzas en la ciudad de Cali.

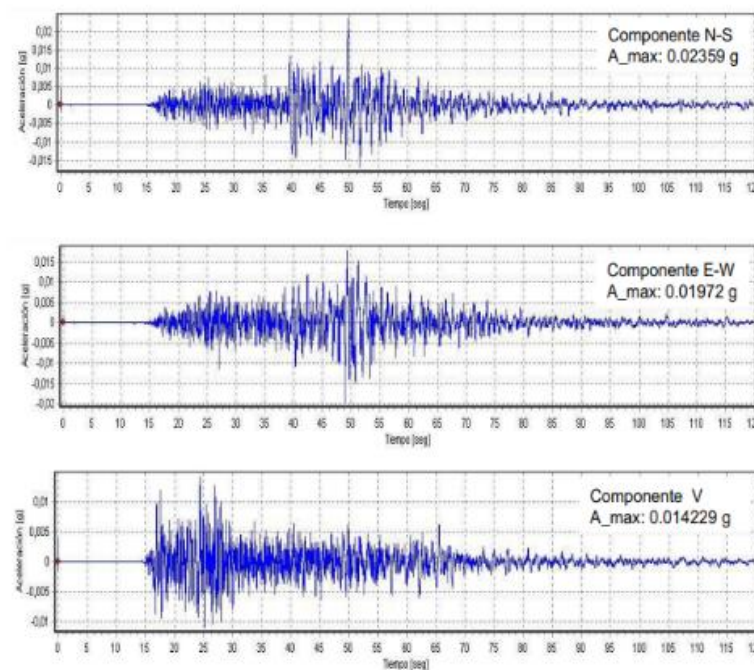


Figura 9. Acelerogramas registrados en la estación Parque de las Garzas Cali, sismo del 30 de septiembre del 2012. Tomado de (OSSO, 2012).

4.2.3. Inclinómetros. Las inclinaciones se han determinado por medio del equipo de medida llamado inclinómetro. Este aparato consta, básicamente, de tres elementos: placa base de control, sensor y equipo de lectura. Su funcionamiento está basado en una señal eléctrica que proporciona el sensor, la cual es proporcional al seno del ángulo de la inclinación de su base con la horizontal. El sistema de lectura del sensor se realiza mediante un servo acelerómetro que funciona estacionando la base del sensor sobre la placa base de control, cada vez que se realiza la lectura (Martínez, 1996).

Un inclinómetro es un nivel de burbuja de precisión se percibe eléctricamente como un puente de resistencia. Se utiliza para monitorear cambios en la inclinación de una estructura. Los medidores de inclinación fueron seleccionados sobre otros instrumentos, debido a su precisión, facilidad de integración dentro de la instalación, con el registrador de datos, y el costo relativamente bajo (Aboumoussa & Iskander, 2011).

4.2.4. Galgas Extensométrica o Transductor. Una galga extensométrica es un dispositivo transductor universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas, como pueden ser: presión, carga, torque, deformación, posición, etc. Se entiende esfuerzo, a la resistencia de un cuerpo debida a la fuerza aplicada sobre él, relación entre la fuerza aplicada y la superficie en la cual se aplica. Si se lo pone en términos matemáticos, esfuerzo (ϵ) se define como la fracción de cambio en longitud, como lo muestra la Figura 10 (Yapur, Israel, García, Héctor, & Salazar, 2015). Un transductor de desplazamiento, mide los movimientos del edificio en la dirección longitudinal y transversal (Aboumoussa & Iskander, 2011).

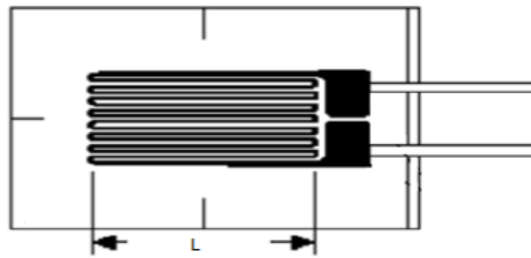


Figura 10. Galga extensométrica. (Yapur et al., 2015).

La mayoría de galgas extensométricas de resistencia pueden ser consideradas como una longitud de conducto en el material o como un cable. Su funcionamiento se basa en el tensionamiento de una longitud de cable, cuando esta aumenta con el correspondiente decremento de su diámetro y cambio de su resistencia eléctrica, si el material conductor es unido a un elemento elástico bajo deformación entonces el cambio en la resistencia puede ser medido, y usado para calcular la fuerza desde la calibración del elemento (Barreto & Sanchez, 2015).

5. Pasos para Instrumentar un Edificio

Una vez que se decide instrumentar una estructura, siguen una serie de estudios, deducciones y decisiones. Es importante optimizar los esquemas de instrumentación desde el punto de vista del costo y los datos requeridos. Para optimizar la instrumentación es importante estudiar el comportamiento dinámico esperado de la estructura. Los estudios preliminares incluyen el estudio de la información disponible de diseño y análisis después de la autorización para instrumentación concedida por el propietario, visitas al sitio y estudios analíticos requeridos y pruebas (Mehmet Celebi et al., 1986).

Al seleccionar las estructuras para la instrumentación sísmica, se pueden seguir parámetros como el material de construcción, el sistema estructural, la geometría, la discontinuidad y la edad del mismo. Se tienen en cuenta también parámetros del suelo, como la severidad del factor de vibración, basada en la cercanía con grandes fallas, la probabilidad de un gran sismo en los próximos 30 años, esto con el objetivo de considerar regiones donde puede haber una gran posibilidad de registrar datos útiles dentro de la vida útil de una estructura (Çelebi & Park, 2001)

La recomendación más común es colocar un número mínimo de tres instrumentos, el primero en la base de la edificación, el segundo en el punto medio y el tercero en el nivel superior, como se muestra en la Figura 11 (United States Geological Service, 2002).

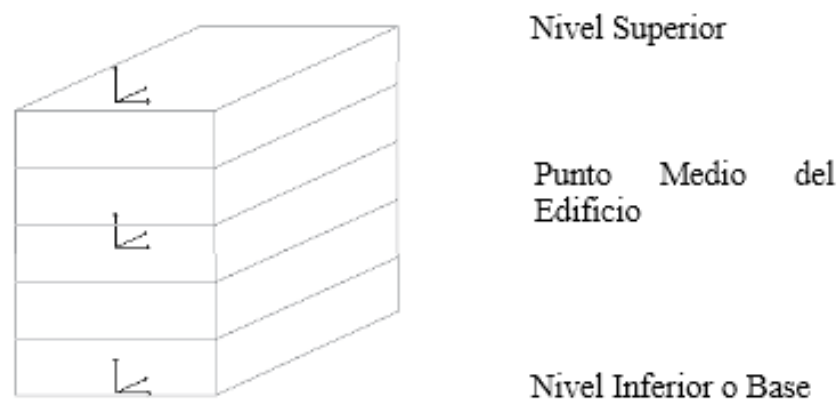


Figura 11. *Recomendación de posicionamiento de Instrumentos. Adaptado de (United States Geological Service, 2002).*

La respuesta predominante de un edificio alto se puede describir por la participación de los primeros cuatro modos de cada uno de los tres conjuntos de modos (dos traslacionales y uno de torsión), por lo tanto, se estima un mínimo de 12 sensores sean necesarios, se evidencia dicho posicionamiento en la Figura 12.

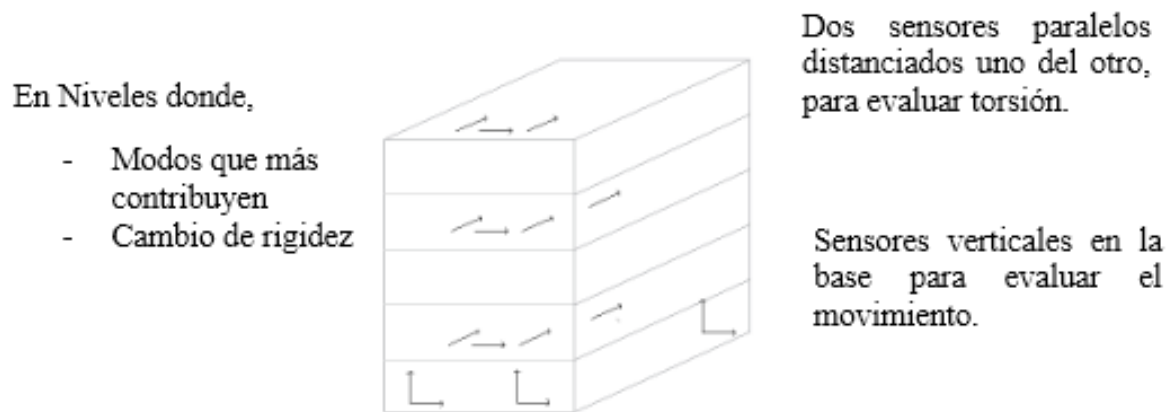


Figura 12. Posicionamiento de 12 sensores. Adaptado de (Mehmet Celebi, 2000).

Para la instalación del equipo de medición de vibraciones ambientales, se deben ubicar en sectores alejados de máquinas, equipos y personas, ya que, podrían alterar el contenido energético, el espectro de frecuencias de la señal y así, distorsionar los resultados (Espinoza, 2016).

Así como la superestructura, el sistema de cimentación necesita estar instrumentado para estudiar su respuesta. Eso se puede colocar con el esquema de instrumentación de la superestructura (Celebi, 2002).

Entre las principales actividades que conforman el monitoreo estructural se encuentran la selección de la estrategia del monitoreo, la instalación del sistema, el mantenimiento y el manejo de datos, de los cuales, cada uno cuenta con sub-actividades; resaltando la creación de una buena estrategia de monitoreo como la más importante, ya que de ella se derivan las demás tareas, como se resume en la Tabla 3.

Tabla 3

Actividades fundamentales del monitoreo estructural

Estrategia Monitoreo	de	Instalación del sistema de monitoreo	Mantenimiento del sistema de monitoreo	Manejo de los datos	Cierre de Actividades
Objetivo del monitoreo		Instalación de los sensores	Proporcionar el suministro eléctrico	Ejecución de las mediciones	Interrupción del monitoreo
Selección de los parámetros a monitorear		Instalación de accesorios	Proporcionar líneas de comunicación	Almacenamiento de datos	Retiro del sistema de monitoreo
Selección del equipo		Instalación de las unidades de lectura	Ejecución de planes mantenimiento para diferentes dispositivos	Proporcionar acceso a los datos	Almacenamiento del equipo de monitoreo
Establecer los puntos de medición		Instalación del software	Reparación y reemplazo de elementos descompuestos	Visualización	
Determinar el calendario de monitoreo		Interacción con los usuarios		Salida de datos	
Aprovechamiento de los datos				Análisis de datos	
Costos				Uso de los datos	

Nota: Adaptado de (Mendoza, 2011).

En la Tabla 3 se describe en detalle los diferentes pasos para desarrollar un sistema de monitoreo, se describirán algunos de ellos a continuación.

5.1.1. Línea Base. La línea base se realiza como referencia para lograr monitorear, seguir, evaluar y comparar los resultados del comportamiento de la estructura después de eventos sísmicos y durante un periodo de tiempo definido. Es de mucha importancia la elaboración de la línea base, para comparar el comportamiento de la estructura después de eventos sísmicos o periodos de tiempo definidos. El primer paso para la instrumentación de una estructura, es conocer los parámetros de diseño de la misma, seguido de un modelo matemático, la toma de las mediciones y la recopilación de datos (Viviescas Jaimes, Carrillo León, & Vargas Carvajal, 2018).

5.1.2. Modelo Numérico Inicial. Se debe realizar una modelación matemática o un análisis dinámico por parte de los diseñadores estructurales para poder hacer una comparación con la instrumentación. Un modelo de elementos finitos se puede desarrollar para obtener las características dinámicas, dicho modelamiento se puede realizar con programas computacionales como SAP2000, ETABS, entre otros (Mehmet Celebi, 2000).

Para la modelación matemática de la estructura se consideran las características principales del sistema, su geometría, sus irregularidades, las propiedades de los materiales, las condiciones de apoyos, patologías existentes, entre otros. Se deben incluir también, aspectos estructurales como la existencia de zonas rígidas en las uniones, la obtención de los modos de vibración, sus periodos y frecuencias, la respuesta espectral modal, ya que dichas características, influyen en la obtención de los parámetros dinámicos de la estructura (Muria David; Gonzales Ricardo, 1991).

5.1.3. Calibración. La obtención de características dinámicas de estructuras reales permite evaluar los modelos teóricos existentes y calibrar modelos para que sean capaces de reproducir la respuesta lineal ante acciones dinámicas, al fin de comparar las características calculadas y experimentales (Muriá Vila & González, 1995).

Es necesario realizar una validación del modelo, ya que, se debe cuantificar que tan adecuadamente describe los datos para los cuales fue aplicado y cómo es el ajuste. Antes de proceder a evaluarlo, es necesario volver a examinar la formulación del problema para detectar posibles errores y determinar la consistencia de las expresiones matemáticas. La siguiente etapa consiste en evaluar algunos estadísticos de prueba como el coeficiente de correlación. En la evaluación de resultados se pueden variar los parámetros de entrada y verificar el comportamiento de los resultados, y si es posible, utilizar datos históricos para reconstruir el pasado y compararlos con los resultados del modelo. Finalmente es necesario verificar si las condiciones o supuestos iniciales coinciden con los resultados obtenidos, para esto es necesario el uso de pruebas de bondad de ajuste (Vera, 2003).

“Los modelos calibrados se obtienen con base en la incorporación de los elementos estructurales y no estructurales que participan en la rigidez y/o masa, así como el deterioro de los elementos estructurales, de acuerdo a las condiciones que evidencia el edificio ante un evento dado” (Fuentes-Olivares & Muria-Vila, 2001).

Según (Muriá Vila & González, 1995), las consideraciones de análisis para una idealización representativa del comportamiento lineal son:

- La existencia de zonas rígidas en la unión viga columna
- La presencia de pretiles y dinteles

-
- El acoplamiento de la losa con las vigas
 - Escaleras y rampas de estacionamiento
 - Las propiedades geométricas de los elementos estructurales
 - Las concentraciones significativas de carga muerta en una planta deben considerarse en el cálculo de los momentos de inercia de masa
 - Sección agrietada en vigas para edificios en que se observen agrietamientos en trabes y losas
 - Los muros de mampostería que no estén adecuadamente desligados
 - Los módulos de elasticidad, deben establecerse según los niveles de esfuerzos
 - En edificios sobre suelos blandos es necesario tomar en cuenta la flexibilidad del suelo y para estructuras muy rígidas, se debe considerar la capacidad de disipación de energía del suelo.

6. Antecedentes Internacionales

China fue el primer país en tener detector mecánico de ondas sísmicas, los primeros sismómetros consistían en péndulos no amortiguados, los cuales no tenían la capacidad de registrar el movimiento del suelo durante el inicio del sismo, solo su dirección, mientras que el primer sismómetro electromecánico fue inventado en 1875 en Italia que consistía de dos péndulos con dirección N-S y E-O. En 1914, Galitzin desarrollo el primer sismógrafo electromagnético, el cual obtiene una señal eléctrica proporcional a la velocidad del terreno obtenida de ondas sísmicas (Vera, 2003).

En 1940, Ralph Peck fue el pionero en el uso de instrumentación electrónica al monitorear el desempeño estructural de la excavación para los sistemas de soporte durante la construcción del sistema de metro de Chicago. Peck inicio el método conocido actualmente como el método observacional, donde los datos de la instrumentación son usados para verificar si el diseño original está teniendo un rendimiento aceptable (Dunnicliff & Deere, 1991).

La instrumentación permite de forma apropiada comparar los resultados teóricos con los obtenidos en la experimentación. La observación sismológica y la instrumentación de estructuras han ido aumentando paulatinamente en todo el mundo, avanzando en el conocimiento de la sismicidad y del comportamiento de las estructuras ante ella. Existen diferentes normativas en el mundo, así como edificaciones instrumentadas, se expondrán tres casos internacionales.

6.1. México

6.1.1. Normativa Mexicana. En México, entidades como el Servicio Sismológico Nacional, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico son los principales encargados de la instrumentación sísmica en edificios en México. El Servicio Sismológico Nacional (SSN) pasó a ser parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1929 y desde 1948 quedó adscrito al Instituto de Geofísica de la UNAM. Además del SSN, el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES), fue fundado en 1986, para promover la investigación y desarrollo de tecnología para la instrumentación sísmica de edificios en la Ciudad de México (CIRES, 2005).

Para el posicionamiento de la instrumentación, se debe seleccionar un lugar adecuado para que el sensor quede anclado a la estructura, ya sea en el centro o en los extremos, el sitio debe estar libre de tránsito, vibraciones inducidas por maquinarias, equipos como plantas eléctricas, bombas de agua, tuberías de presión y ascensores, para que estas vibraciones, no afecten los registros ni el

funcionamiento de los equipos. La ubicación de los sensores, se deja al criterio y el fin con el que se estudiara la estructura (Lagos, 2014).

6.1.2. Antecedentes

6.1.2.1. Catedral Metropolitana. La Catedral Metropolitana de México es objeto de un proceso de rehabilitación, ya que presenta daños como el deterioro del material, asentamientos de hasta 2,4 metros con respecto a su nivel inicial y severos agrietamientos de los elementos estructurales producidos por el paso del tiempo y eventos sísmicos ocurridos anteriormente. Por lo que se consideró realizar una instrumentación para el monitoreo de la Catedral (Meli, Rivera, & Sánchez, 2001).

La red de instrumentación está compuesta por instrumentos que miden en tres direcciones ortogonales, la aceleración del movimiento del punto sobre el que están colocados. *“Cada instrumento cuenta con un sensor que se compone de tres acelerómetros de fuerza balanceada que convierten la aceleración del suelo en una señal de voltaje que más tarde es transformada a palabras digitales mediante un convertidor analógico – digital. Se conectaron los acelerógrafos para operar con un disparo común y una señal de tiempo común”* (Meli et al., 2001).

Desde el año 1997 al año 1999, la red acelerográfica registro cerca de 16 sismos. Entre los más fuertes se encuentran, el sismo del 11 de enero del 1997 con magnitud 7,3 en la escala de magnitud de coda; el sismo del 15 de junio de 1999 con magnitud 6,7 en la escala de magnitud de coda; sismo del 22 de mayo de 1997 con magnitud 5,9 en la escala de magnitud de coda y el 21 de junio del 1999 con magnitud 5,8 en la escala de magnitud de coda; lo que permitió registrar aceleraciones en la parte superior de la torre, 14,26 gal en la dirección N-S y 16,23 gal en la dirección E-W. (Meli et al., 2001).

Se deduce que el sitio presenta un periodo fundamental de vibración de aproximadamente 2,6 segundos y un segundo modo de vibración, para un periodo cercano a 0,5 segundos (Meli et al, 2001).

Para el movimiento en la base del edificio, *“un primer aspecto a estudiar en este sentido es la diferencia que puede haber entre el movimiento en campo libre y el que se da en la base de la estructura; esto permite determinar si la presencia del edificio altera en alguna forma el movimiento del terreno, y si la excitación inducida en la estructura es diferente de la que se deduciría de los registros obtenidos en campo libre”* (Meli et al., 2001). Para ello (Meli et al., 2001), compararon los registros de campo libre con los promedios de los instrumentos de los sótanos, lo hicieron con el sismo del 11 de enero, 22 de mayo y 19 de julio de 1997.

Para el movimiento de la cubierta del edificio, *“se obtuvieron espectros de respuesta de los cuatro puntos de la azotea (azotea sur, azotea norte, azotea centro y azotea oeste), para las dos direcciones horizontales y para los tres eventos sísmicos seleccionados”* (Meli et al., 2001). Se estudia la uniformidad del movimiento en distintos puntos de la base del edificio, para determinar diferencias causadas por condiciones del subsuelo o la deformación de la estructura y su cimentación.

Los registros muestran grandes diferencias para los 3 sismos y para las dos direcciones, se evidencian picos de amplitud para los periodos dominantes del terreno. *“La amplificación espectral para este periodo fundamental es relativamente mayor para los sismos de menor intensidad y para la dirección N-S, debido a los mayores contenidos de ondas con periodos cercanos al fundamental de la estructura en el movimiento del terreno”* (Meli et al., 2001).

“Se calcularon los desplazamientos relativos de cada extremo del sótano con respecto al centro (SC-SN y SC-SS) y de los dos extremos entre sí, para las direcciones N-S, E-W y para la vertical. Los resultados muestran una tendencia de la base de la Catedral a flexionarse tanto vertical como lateralmente” (Meli et al., 2001). Los desplazamientos relativos están consignados en la Tabla 4.

Tabla 4
Desplazamientos Relativos para Cada Dirección.

Evento	Estaciones	Dirección N-S	Dirección V	Dirección E-W
		Desplazamiento Relativo (cms)	Desplazamiento Relativo (cms)	Desplazamiento Relativo (cms)
11 de enero de 1997	SC-SN	0,0380	0,0800	0,2000
	SC-SS	0,1140	0,0440	0,2340
	SN-SS	0,1000	0,1100	0,2810
22 de mayo de 1997	SC-SN	0,0210	0,0160	0,0390
	SC-SS	0,0280	0,0180	0,0460
	SN-SS	0,0240	0,0180	0,0700
19 de julio de 1997	SC-SN	0,0080	0,0110	0,0170
	SC-SS	0,0160	0,0080	0,0320
	SN-SS	0,0130	0,0120	0,0450

Nota: Adaptado de (Meli et al., 2001).

La amplificación de la respuesta entre la azotea y los sótanos permite hacer una estimación del amortiguamiento, se tiene que los valores varían según la intensidad de los sismos y la posición de los sensores, pero en promedio se acercan al 10% de amortiguamiento crítico, siendo este valor el doble de la amortiguación de los edificios modernos los cuales son de amortiguamiento del 5%. El valor del amortiguamiento alto contribuye a que el movimiento en la cubierta sea poco mayor al movimiento que se registra en la parte de la base del edificio (Meli et al., 2001).

“Los espectros de respuesta también muestran que sobre la dirección N-S la azotea sur presenta una amplitud de respuesta mayor que el resto de las estaciones, esto se atribuye a la

presencia de la fachada principal que tiene una masa considerable y tiende a vibrar en dirección perpendicular a su plano. Una amplificación similar se observa en la azotea oeste que muestra una mayor amplitud de vibración para la dirección E-W, esto se deriva de la vibración normal a su plano de la fachada lateral. Por otra parte, puede verse que en la dirección E-W también se amplifica el movimiento de la azotea debido a la presencia de la gran masa de la cúpula y de su base” (Meli et al., 2001).

Para la vibración vertical de la cúpula, se comparan los espectros de respuesta en dirección vertical de los puntos de la azotea, evidenciando que en los sismos del 11 de enero y del 22 de mayo de 1997. Según (Meli et al., 2001), la azotea centro experimento una mayor respuesta que los demás puntos de la azotea dentro del intervalo cercano a 0,2 segundos y en el evento sísmico del 19 de julio de 1997, no fue clara dicha situación, esto se le atribuye a que el sismo del 19 de julio no indujo una respuesta importante en la estructura en comparación con los sismos del 11 de enero y del 22 de mayo, que generaron un modo de vibración vertical de la cúpula central. En los espectros de respuesta, la cúpula experimenta una mayor respuesta que el resto de la cubierta con un pico para una frecuencia de 6,5 Hz (periodo de 0,15s), evidenciando que la cúpula presenta una vibración vertical local que le atribuye al gran peso de la estructura sumado a la baja rigidez lateral de sus apoyos que, en la vibración horizontal de la cubierta, se abren y cierran (Meli et al., 2001).

Se evidencio también, gracias al análisis dinámico realizado en 1998, en el modelo de elementos finitos, que el periodo asociado al movimiento vertical de la cubierta es de 0,157 segundos, dando un resultado muy similar al inferido de los registros sísmicos. (Meli et al., 2001).

Para la vibración de la torre sur, se tiene que, en el punto sobre la parte alta de la torre, durante los sismos de 1998, experimentó aceleraciones máximas del orden de 7,5 veces las que se midieron

en el sensor del sótano, sobre las dos direcciones horizontales, ya que, se muestra los acelerogramas registrados en las dos alturas de la torre, ante los acelerogramas en el sótano, durante el sismo del 20 de abril de 1998. Los valores de los espectros de respuesta, para cada punto sobre la torre, en la dirección N-S, en la parte alta responde cuatro veces más que la parte baja de la torre, esto para un periodo del orden de 0,8 segundos; en la dirección E-W, la parte alta presenta una respuesta del orden de cinco a seis veces mayor que la presentada en la parte baja, para un periodo de aproximadamente 0,88 segundos.

El análisis de un modelo de elemento finito de la torre, considerada como un cuerpo independiente del resto de la estructura, dio como resultado, periodos fundamentales de 0,59 y 0,66 segundos, para las dos direcciones horizontales y una amplificación de solo 2 veces de la parte superior con respecto a la inferior. Esto evidencia que el modelo planteado, no representa el comportamiento real. Para comprender mejor dicha situación, se realizó el análisis de un modelo simple de dos grados de libertad, del cual se obtuvo, que, para reproducir los resultados, se debe considerar que la parte baja de la torre tiene una masa 10 veces mayor a la de la parte alta, en lugar de 2 veces. *“Esto indica que la torre esta en realidad adherida al resto del monumento, o al menos de la fachada principal, y que una parte de la masa del cuerpo principal participa de la vibración de la torre. De esta manera, la parte superior de la torre, que tiene mucho menor masa y rigidez que la parte inferior, acta como un apéndice que amplifica significativamente las vibraciones”* (Meli et al., 2001).

Se evidencia que los movimientos inducidos por los eventos sísmicos, que fueron registrados por la red de acelerógrafos instalados en la Catedral, variaron en un amplio intervalo de intensidades, aunque fueron menores a los máximos movimientos que ha soportado la Catedral Metropolitana de México y los que soportará, esto indica, que la respuesta medida se considera

representativa cuando haya sismos pequeños o moderados. Se tiene también que, las respuestas de desplazamientos y aceleraciones fueron proporcionales a la intensidad del sismo, pudiendo usar dichos resultados para estimar la respuesta de la estructura ante sismos de mayor magnitud (Meli et al., 2001).

De la interpretación de los resultados obtenidos destacan algunas conclusiones relevantes. *“El movimiento del terreno en el sitio se caracteriza por tener un periodo fundamental de vibración de 2,6 segundos, que es muy superior al período fundamental de la Catedral como conjunto (0,4 segundos) y al de sus principales elementos constitutivos; esto es particularmente favorable, ya que al no tener periodos de vibración similares la estructura y el terreno de apoyo, se está lejos de la posibilidad de resonancia, y las amplitudes de vibración inducidas en la Catedral son reducidas”* (Meli et al., 2001). Se tiene que, al tener la estructura un amortiguamiento cercano al 10% del crítico, la estructura sigue el movimiento del terreno como un todo y tiene una vibración de cuerpo rígido. Las fachadas sur muestran una vibración significativa en su plano, lo que indica que no están perfectamente conectadas al resto de la estructura, lo que conllevaría a considerar la mejora en la conexión de las fachadas con el resto de la estructura. La parte alta de la torre surponiente, experimenta aceleraciones horizontales que en promedio son casi 7,5 veces las registradas en el sótano, lo que indica que dicho elemento es flexible en comparación al resto de la estructura, lo que hace que su vibración asociada al primer modo de vibración de traslación horizontal sea amplificada notablemente (Meli et al., 2001).

Es recomendable seguir manteniendo la instrumentación de la Catedral Metropolitana de México, para comprobar la estabilidad de la respuesta observada y conocer con más claridad el comportamiento de los elementos estructurales de la misma (Meli et al., 2001).

6.1.2.2. Torre Central de Comunicaciones. La Torre Central de Comunicaciones es una estructura de concreto reforzado, con 90 metros de altura, forma de “H” de 46 metros de frente por 35 metros de ancho, a base de marcos y muros de concreto. Integrada por sótano, planta baja, 16 niveles de oficinas, dos niveles donde se localizan las antenas de transmisión.

Se instaló un acelerógrafo triaxial en el terreno con el fin de registrar eventos sísmicos. Se instaló un sensor triaxial en la zona de estacionamiento, cerca al sensor instalado en el terreno; se instalaron en el sótano 7 sensores uniaxiales, distribuidos en tres esquinas extremas y en el centro, en posición horizontal y vertical; en los niveles 3, 7 y 12 se instalaron tres acelerómetros; en el nivel 16 se instalaron 4 sensores uniaxiales y en el nivel 18 se instalaron 3 sensores uniaxiales (Alcántara et al., 2004). Se muestra en la Figura 13, la ubicación de los sensores en el edificio de telecomunicaciones.

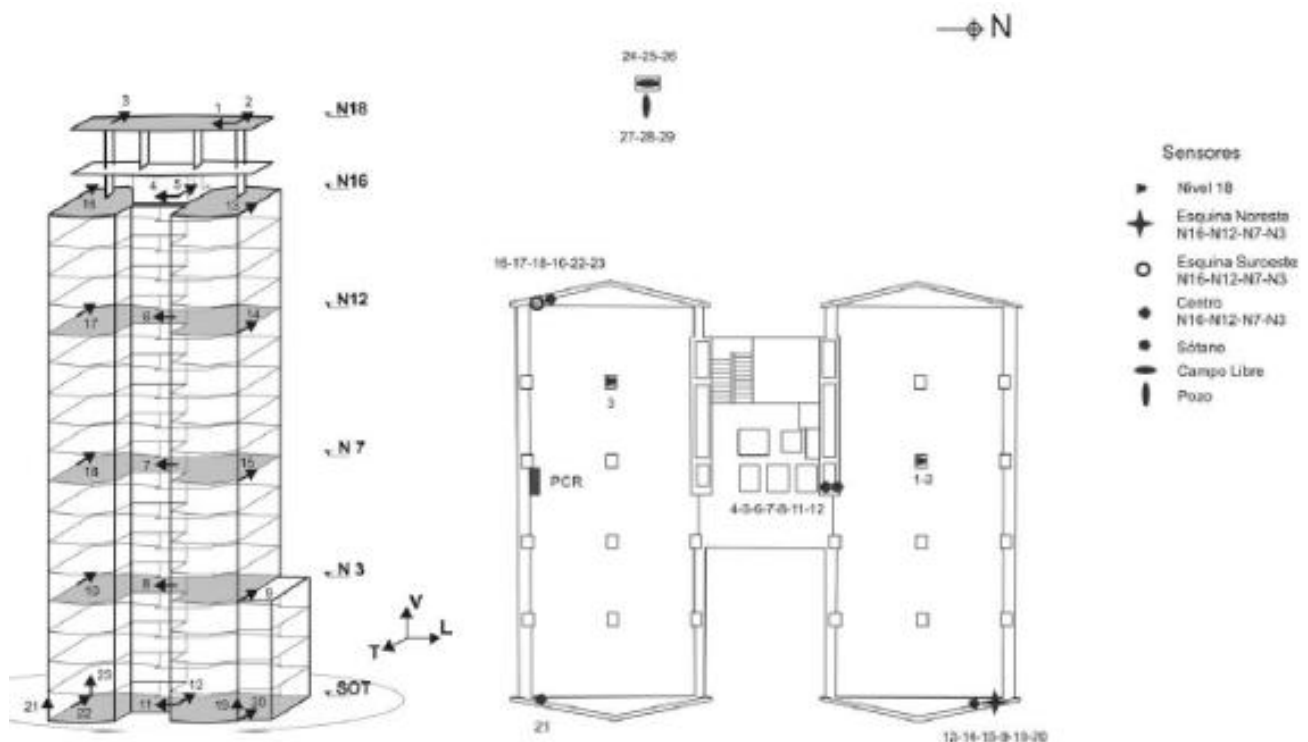


Figura 13. Ubicación de los sensores y vista en planta. Tomado de (Alcántara et al., 2004).

Tabla 5
Ubicación, tipo y dirección de sensores.

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

Nota: Tomado de (Alcántara et al., 2004).

Se registró el sismo del 18 de agosto del 2004, de magnitud 5,7 en la escala de magnitud de momento. Se muestran en la Figura 14 los acelerogramas de los niveles instrumentados obtenidos.

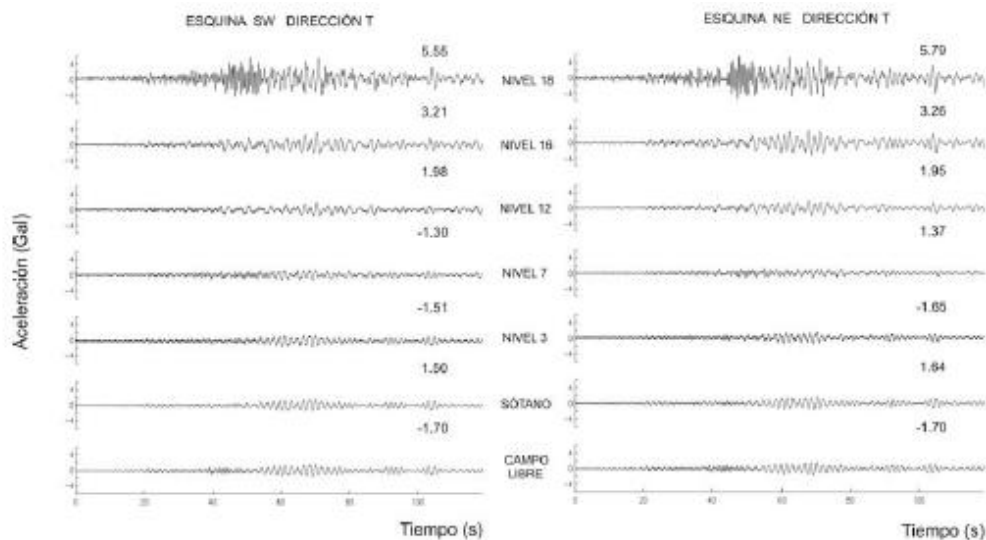


Figura 14. Acelerogramas obtenidos. Tomado de (Alcántara et al., 2004).

Teniendo como resultado, las aceleraciones mostradas en la Tabla 6, según el sismo del 18 de agosto del 2004.

Tabla 6

Aceleraciones obtenidas en el sismo del 18 de agosto de 2004

Nivel	Sensor	Componente	Aceleración Máxima (cm/s ²)
Azotea	Triaxial	T	11,07
		L	13,69
		V	2,44
Sótano	Triaxial	T	7,1
		L	5,75
		V	0,87
Campo Libre	Triaxial	T	7,69
		L	8,68
		V	3,86

Nota: Adaptado de (Alcántara et al., 2004).

Se evidencio que la implementación de la red sísmica fue oportuna, ya que días después de instalada, se registró el sismo del 18 de agosto de 2004, de magnitud 5,7 en la escala de magnitud de momento y debido a dicho sismo, se permitió calibrar el sistema en su totalidad con resultados completamente favorables (Alcántara et al., 2004).

6.2. Chile

6.2.1. Normativa Chilena. La Norma Chilena Oficial para el diseño sísmico de edificios, en su sección 4.4 Instrumentos sísmicos, estipula que al proyectar una obra, la autoridad competente puede exigir que en el proyecto se contemple la inclusión de por lo menos dos recintos adecuados para la instalación de acelerógrafos de movimiento fuerte (Norma Chilena para el Diseño Sísmico de Edificios, 2012).

6.2.2. Antecedentes

6.2.2.1. Edificio 2 – Distrito Económico “Los Condes”. Es un edificio de 10 pisos de concreto reforzado, con seis niveles de parqueadero subterráneo, este edificio se encontraba en construcción en la parte interior, por lo que, permitió contar con pisos sin ocupar, dando así, facilidad para la instalación de sensores. El sistema estructural consiste en un núcleo de muros de aproximadamente desde 20 a 30 centímetros, con un marco externo de columnas y vigas. La instrumentación consto de uniáxica y triaxial acelerómetros con un rango de medida de más o menos 4g, el primer piso, fue instrumentado con 3 acelerómetros uniaxiales en las esquinas del edificio, como se muestra en la Figura 15 y en la Figura 16 (Lemnitzer et al., 2014).

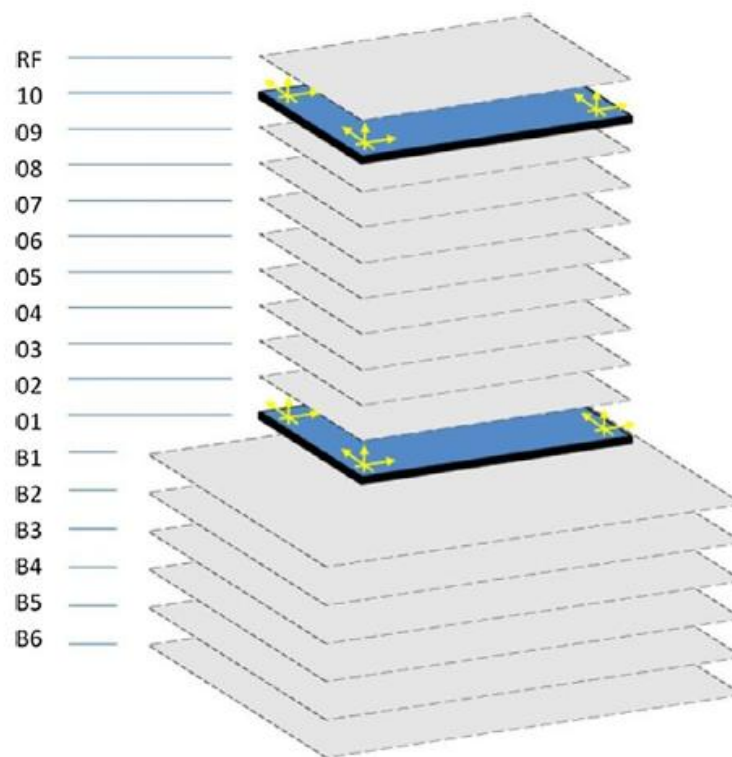


Figura 15. Ubicación de los sensores. Tomado de (Lemnitzer et al., 2014).

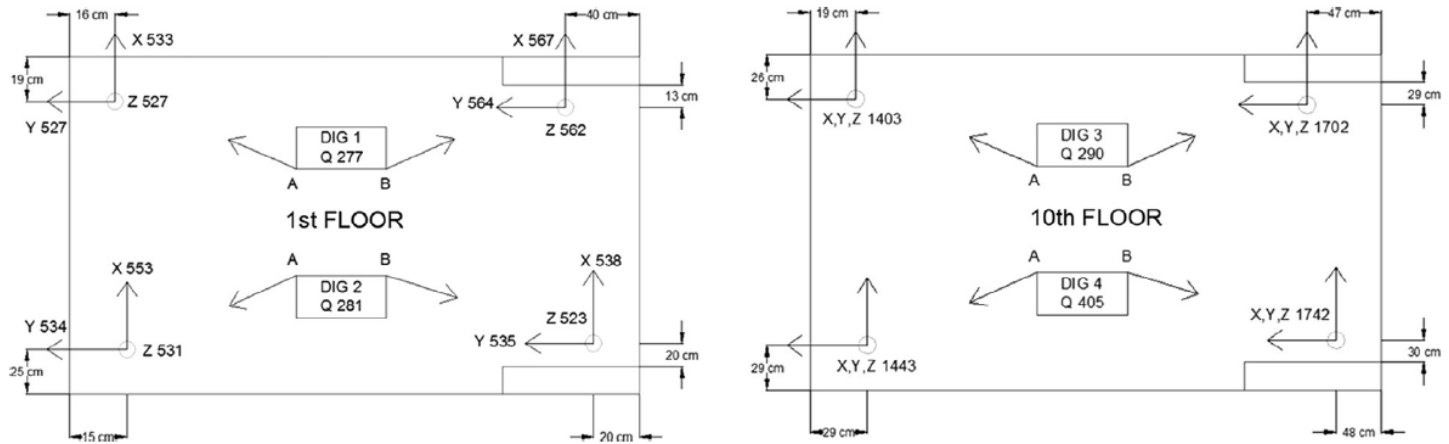


Figura 16. Ubicación de los sensores. Tomado de (Lemnitzer et al., 2014).

Se tiene que, se registró un sismo de magnitud 4,7 en la escala de Richter su epicentro estaba cerca de 17 km de Pichilemu, que está localizado cerca de 200 km al sur de Santiago con una profundidad de 34,5 km. Dicho epicentro coincide con la región en que más se liberó energía en el sismo de Maule. Diferentes conjuntos de aceleraciones en las esquinas se usaron para calcular las dos formas traslacionales y torsional, en un punto central de la losa evidenciando que se comporta como un diafragma rígido. En el primer piso, se obtuvieron aceleraciones con valores máximos de $1,2 \text{ cm/s}^2$, tanto en la dirección N-S, como en la dirección E-W, en el piso 10, las aceleraciones centrales son de $3,5 \text{ cm/s}^2$ y aceleraciones en las esquinas de $4,5 \text{ cm/s}^2$ en la dirección E-W y aceleraciones en la parte central de $2,8 \text{ cm/s}^2$ y aceleraciones en las esquinas de $5,0 \text{ cm/s}^2$ en la dirección N-S (Lemnitzer et al., 2014). En la Figura 17, se evidencia la aceleración máxima torsional en el primer y último piso.

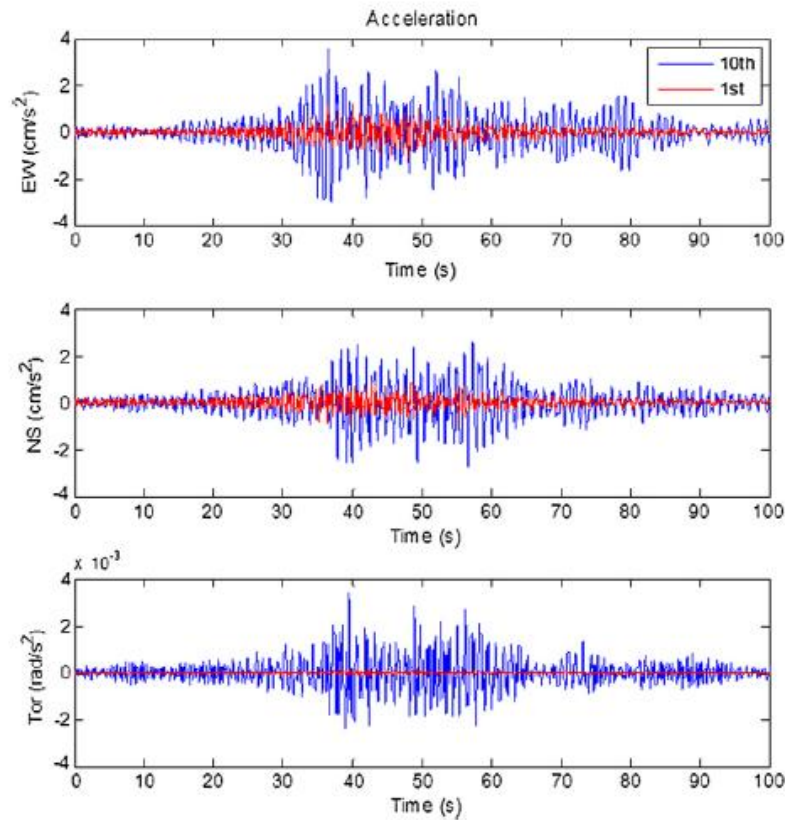


Figura 17. Comparación de acelerogramas, primer y último piso. Tomado de (Lemnitzer et al., 2014).

Acerca de desplazamientos, se tiene que, en la dirección E-W, el desplazamiento máximo es de 0,017 centímetros y 0,104 centímetros, medidas para el piso uno y diez, respectivamente, mientras que la deriva máxima entre los pisos 1 y 10, fue de 0,088 centímetros. En cuanto a la dirección N-S, los desplazamientos máximos fueron de 0,015 centímetros y 0,061 centímetros, mientras que la deriva máxima entre los pisos 1 y 10 fue de 0,046 centímetros, lo que es casi la mitad de la deriva medida en la dirección ortogonal (Lemnitzer et al., 2014).

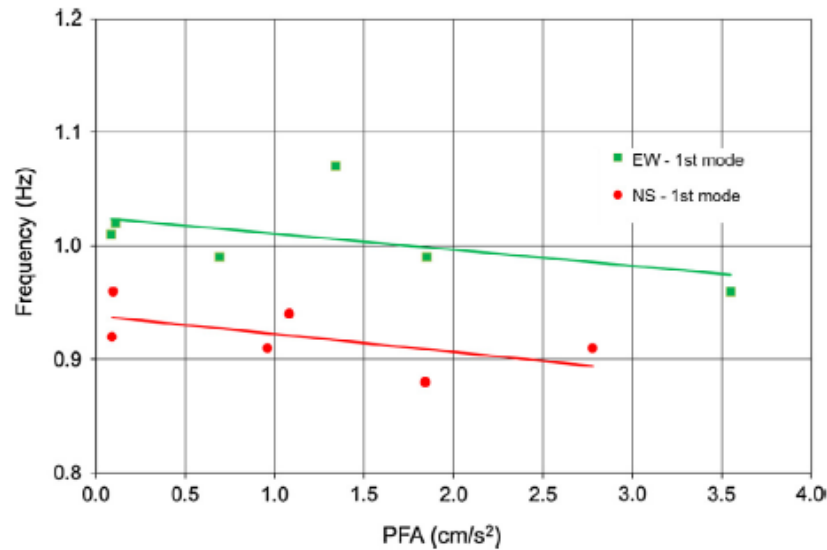


Figura 18. Frecuencias y aceleraciones pico efectivas de las direcciones E-W y N-S. Tomado de (Lemnitzer et al., 2014).

6.2.2.2. Conjunto Habitacional Comunidad Andalucía. Es un edificio que posee cuatro pisos, del cual, posee cuatro departamentos dúplex, con dimensiones en planta de 10 metros longitudinales y 6 metros transversales, estructurado con muros de concreto reforzado en el primer piso y muros de mampostería confinada en los restantes, tiene losas de concreto reforzado de 10 centímetros de espesor en todos los pisos.

El edificio se encuentra instrumentado con acelerómetros digitales tipo Solid State Accelerograph, el cual registra en tres direcciones ortogonales, la estructura posee un acelerómetro a nivel de techo, otro en el muro transversal y uno a nivel de fundaciones del edificio aislado, que se considera como información de campo libre (Andrade, 2014). Se expondrán los registros obtenidos por el terremoto del 27 de febrero del 2010, conocido como el terremoto de Maule de magnitud 8,8 en la escala de magnitud de momento sísmico.

Los registros obtenidos del acelerómetro situado en la fundación del edificio con aislación han permitido analizar el movimiento del suelo, en la Tabla 7 se muestran los valores máximos de la aceleración, velocidad y desplazamiento en las 3 direcciones registradas.

Tabla 7

Valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento

Sismo	Componente	Acel [cm/s^2]	Vel [cm/s]	Desp [cm]
27/02/2010	NS	302.18	25.64	4.14
03:34:14	EO	210.57	21.93	4.81
Mw 8.8	V	172,4	14,43	5,72

Nota: Adaptada de (Andrade, 2014).

En la Figura 19, se presentan los registros de aceleración en la fundación, en la Figura 20, se presentan los registros de la velocidad y en la Figura 21 los registros del desplazamiento.

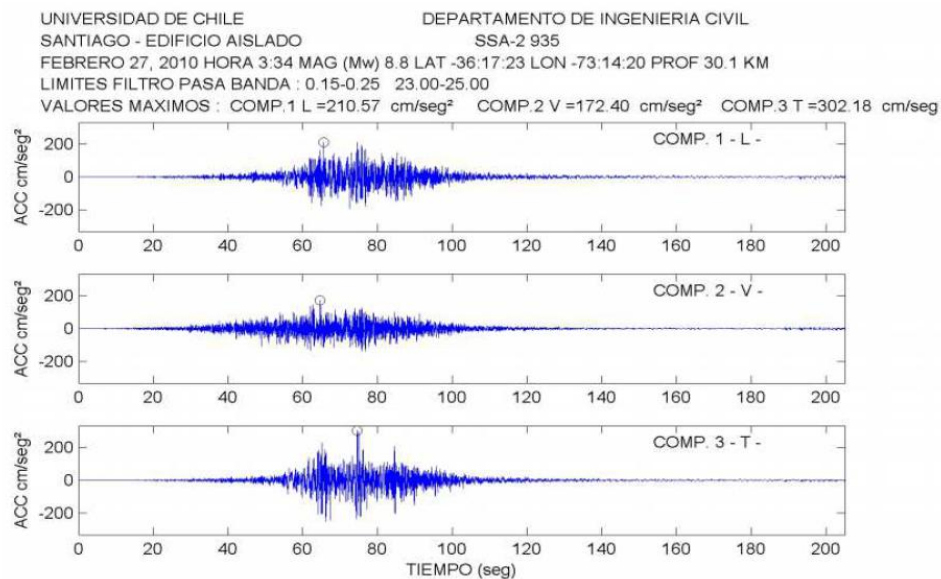


Figura 19. Registro de la aceleración en la fundación. Tomada de (Lemnitzer et al., 2014).

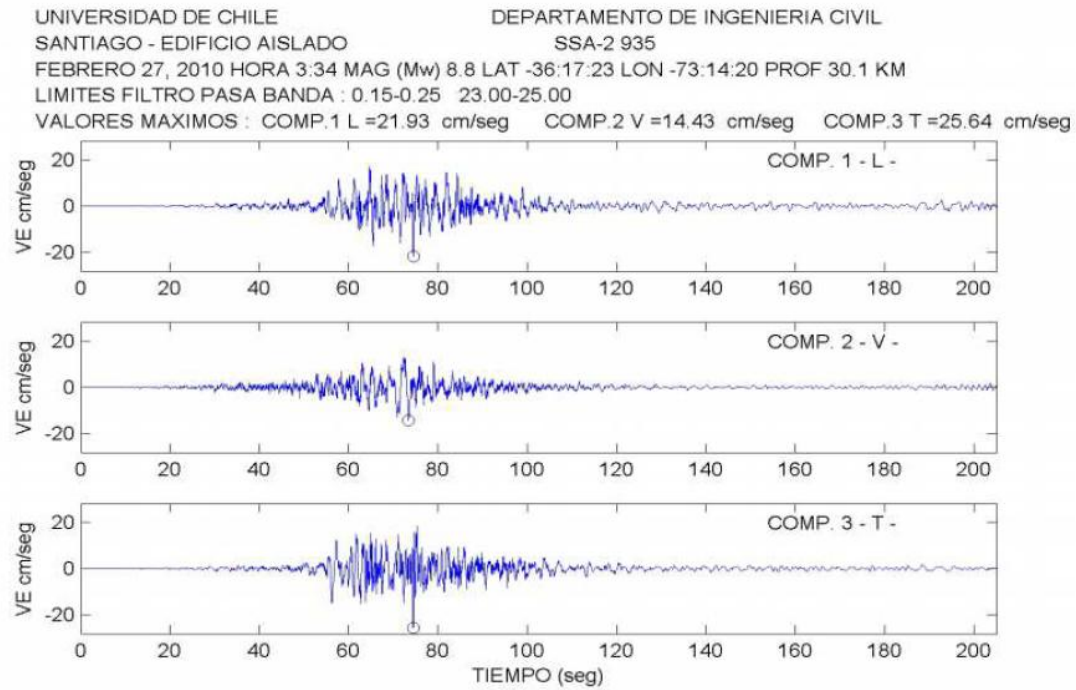


Figura 20. Registro de la velocidad en la fundación. Tomada de (Lemnitzer et al., 2014).

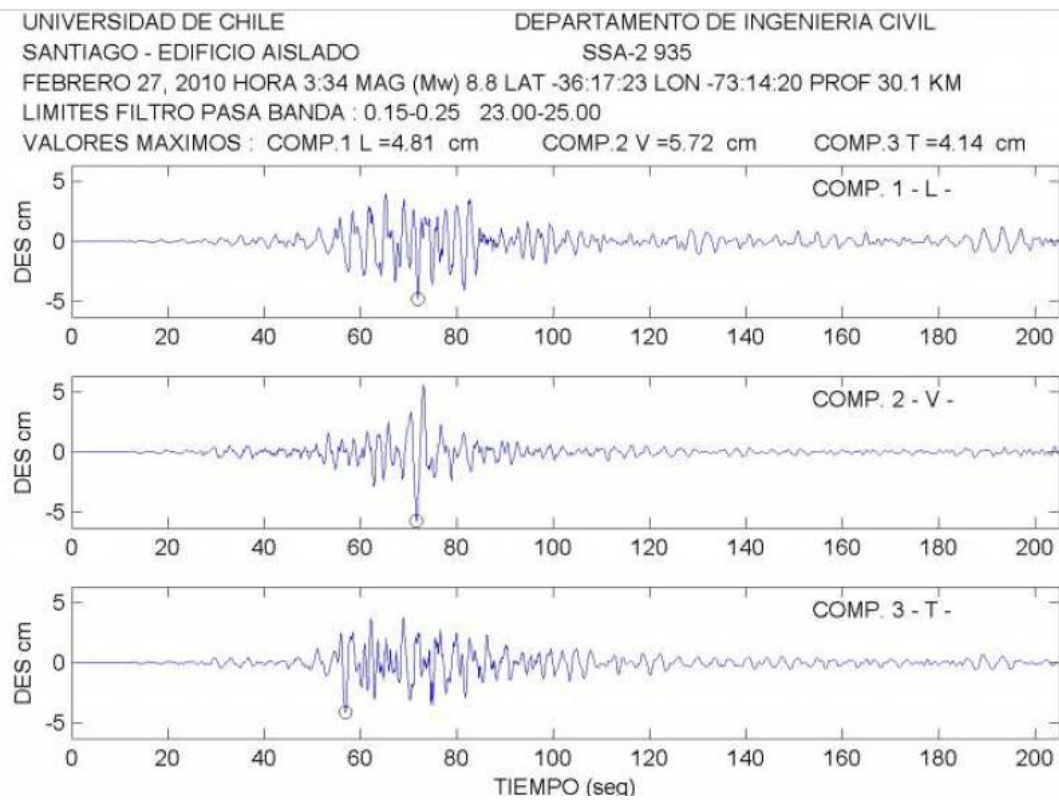


Figura 21. Registro del desplazamiento en la fundación. Tomada de (Lemnitzer et al., 2014).

Se muestran en la Figura 22 los registros de aceleración, en la Figura 23 los registros de velocidad y en la Figura 24 los registros del desplazamiento en el cuarto piso. Como se evidencia, el desplazamiento máximo observado en la componente E-W es de al menos 5 cm.

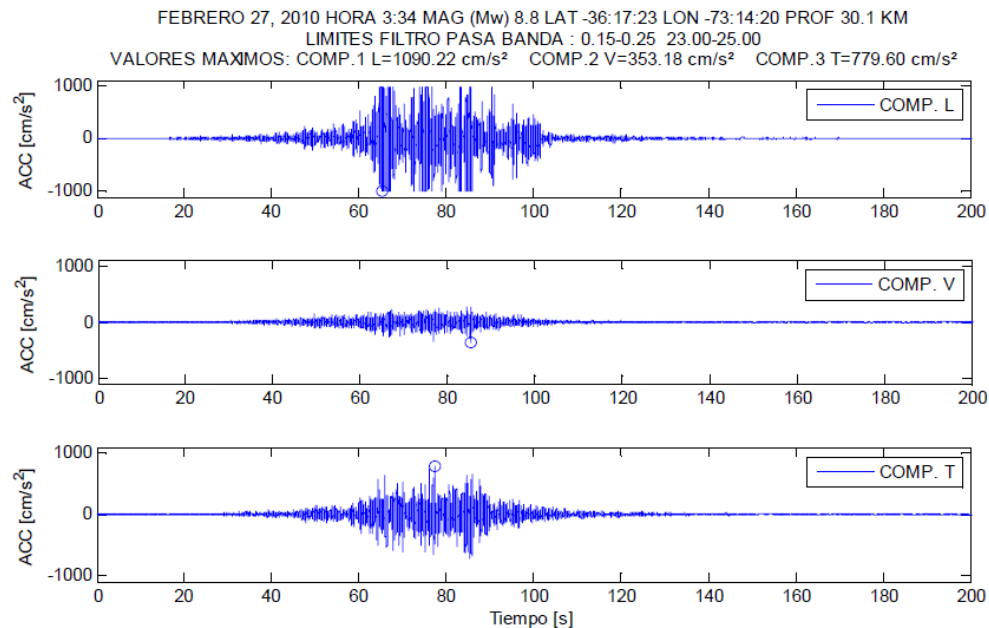


Figura 22. Registro de aceleraciones en el cuarto piso. Tomada de (Lemnitzer et al., 2014).

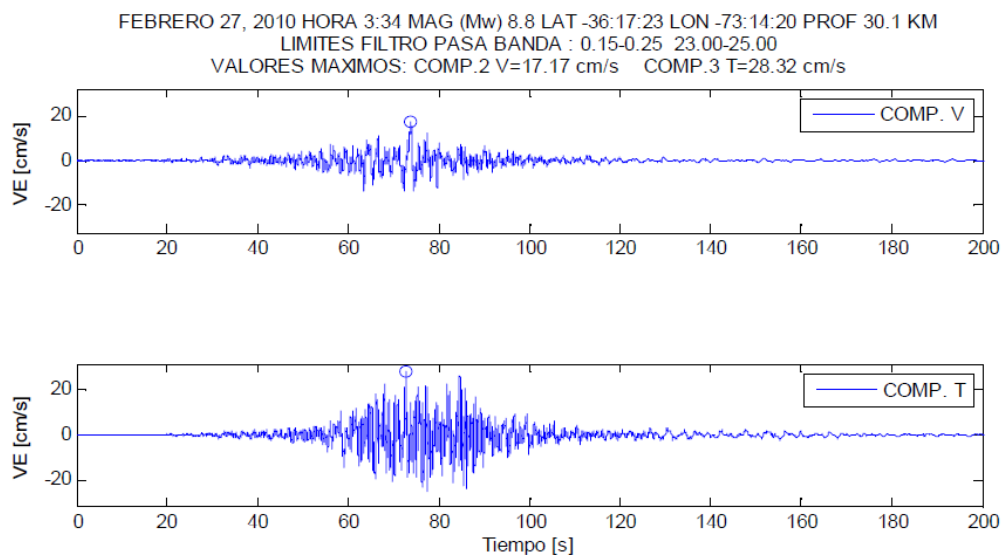


Figura 23. Registro de velocidades en el cuarto piso. Tomada de (Lemnitzer et al., 2014).

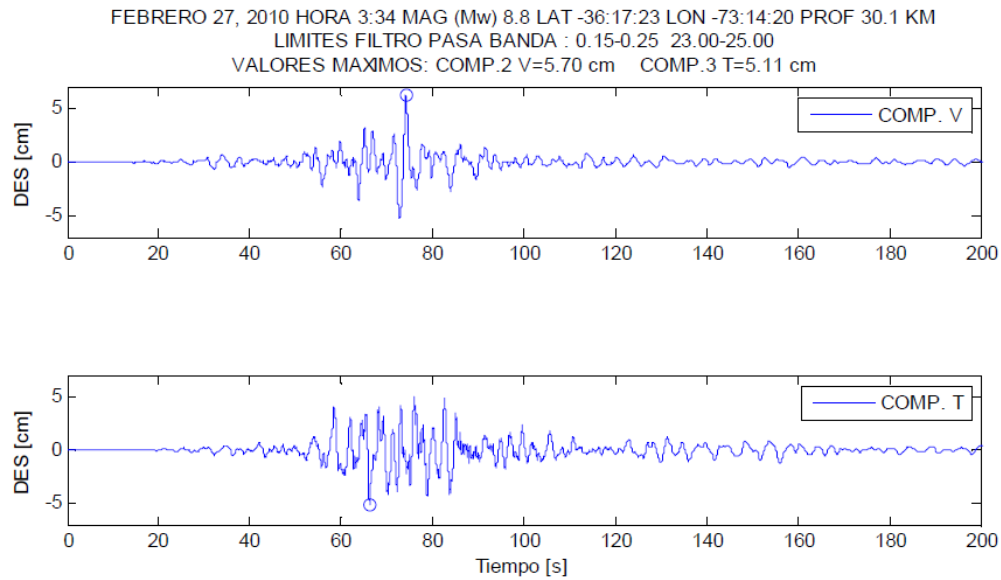


Figura 24. Registro de velocidades en el cuarto piso. Tomada de (Lemnitzer et al., 2014).

Se muestran en la Figura 25 los espectros de respuesta elástica para un amortiguamiento del 5% de las componentes horizontales, juntos con el espectro de diseño de la norma Chilena (Norma Chilena para el Diseño Sísmico de Edificios, 2012), respecto al sitio del lugar de la urbanización.

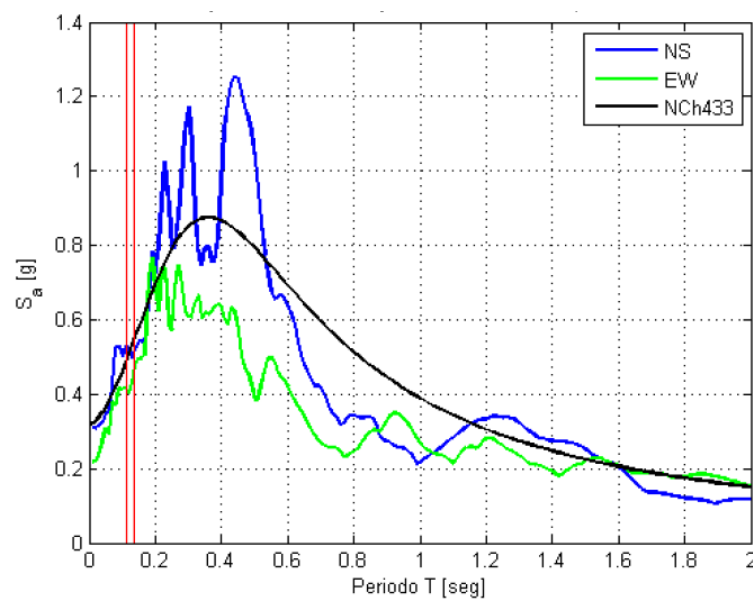


Figura 25. Espectros de respuesta elástica de aceleración del suelo. Tomada de (Lemnitzer et al., 2014).

Se puede apreciar que el espectro de respuesta elástica para la componente horizontal E-W, queda debajo del espectro de diseño elástico para periodos menores a 0,18 segundos, y el espectro de respuesta elástica para la componente N-S, tiene aceleraciones mayores al espectro de diseño elástico para periodos mayores a 0,2 segundos, esto quiere decir que, para los periodos predominantes del edificio, la aceleración máxima de los espectros de respuesta elástica en ambas direcciones queda bajo la aceleración elástica de diseño (Lemnitzer et al., 2014).

6.3. Estados Unidos

6.3.1. Normativa Estadounidense. En Estados Unidos la entidad encargada de la instrumentación sísmica en edificios es el Servicio Geológico de Estados Unidos (United States Geological Service, 2002) y aunque dicha entidad da unos parámetros para instrumentar un edificio, códigos como el Código Internacional de Edificios, también da en su normativa, parámetros mínimos para la instrumentación sísmica.

El Código Internacional de Edificios (International Building Code UBC), es usado y adoptado por los 50 estados, el Distrito de Columbia, Guam, la ciudad de Nueva York, las Islas Vírgenes y Puerto Rico (IBC, 2018). El IBC, estipula un número de instrumentos en la edificación según el número existente de pisos sobre el suelo, como se evidencia en la Tabla 8, a su vez, indica los tipos de acelerómetros que se colocan; como se muestra en la Figura 26, (Skolnik, 2010) coloca como ejemplo un edificio de 10 pisos y su instrumentación.

Tabla 8

Número mínimo de instrumentos según el número de pisos

Número de Pisos sobre el suelo	Número mínimo de instrumentos sobre suelo
10 -20	15
20 - 30	21
30 - 50	24
>50	30

Nota: Adaptado de (Skolnik, 2010)

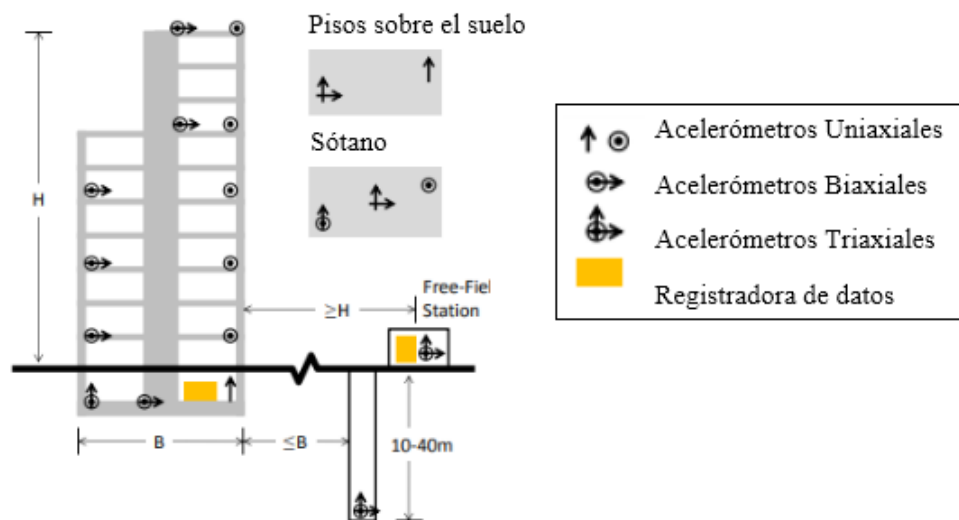


Figura 26. Número mínimo de instrumentos. Adaptado de (Skolnik, 2010).

Según el (IBC,2018), toda estructura ubicada donde la respuesta de aceleración espectral S_1 es mayor a 0,40, excede los seis pisos con un área de 60.000 pies cuadrados (5574,183 metros cuadrados) o más y excede los 10 pisos sin importar el área, debe estar equipado con no menos de 3 acelerógrafos aprobados. Dichos acelerógrafos deben estar interconectados para que estén sincronizados. Deben estar localizados en el nivel más bajo, en el nivel intermedio y en el nivel superior de la estructura, cada instrumento debe estar ubicado para que se mantenga el acceso

siempre y no este obstruido, un letrero que diga “Keep free access to this instrument”, lo que se traduce a “Mantener el libre acceso a este instrumento, en letra de 1 pulgada y debe estar colgado cerca del instrumento.

El mantenimiento de la instrumentación debe ser dada por el dueño de la estructura. Dicho mantenimiento y servicio se debe hacer anualmente por una agencia aprobada, el dueño debe notificar a un oficial del edificio, un reporte informando que el instrumento está trabajando en buenas condiciones, cada instrumento, también deberá tener una etiqueta que muestre la fecha del último mantenimiento y la agencia que realice dicho mantenimiento. Los datos producidos por el instrumento, deben estar disponibles por el oficial del edificio cuando sea necesario (IBC, 2018).

6.3.2. Antecedentes

6.3.2.1. Pacific Park Plaza. El Pacific Park Plaza, cuenta con un sistema estructural de tres alas igualmente espaciadas, con un total de 30 pisos de concreto reforzado, con una altura total de 95,1 metros. Las tres alas del edificio están construidas monolíticamente y están espaciadas igualmente a 120 grados alrededor del centro. Cuenta con 12 acelerómetros uniaxiales, 3 acelerómetros biaxiales y 4 acelerómetros triaxiales como lo muestra la Figura 27, esto con el fin de medir los movimientos traslacionales, verticales y de campo libre en superficie y en profundidad, siendo 61 metros de profundidad (M Celebi & Kalkan, 2006).

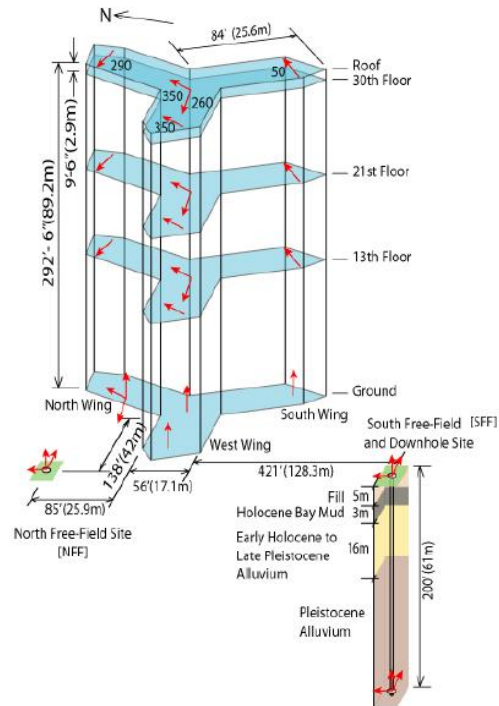


Figura 27. Ubicación de acelerógrafos. Tomado de: (M Celebi & Kalkan, 2006).

Al poco tiempo de ser instrumentado, el Pacific Park Plaza registro aproximadamente 5 eventos sísmicos los cuales se muestran en la Tabla 9, siendo uno de los más significativos, el sismo de Loma Prieta en 1989, el cual tuvo una magnitud de 6,9 en la escala de magnitud de ondas superficiales M_s (M Celebi & Kalkan, 2006).

Tabla 9
Registro de eventos sísmicos

Event/ Date	UTC	Lat. (N)/ Long. (E)	Dist. (km)	Azim. (deg)	Depth (km)	Mag.
Loma Prieta 10/18/1989	04:15	37.036 -121.883	96	157	18.0	M_s 6.9
El Cerrito 12/04/1998	12:16	37.920 -122.290	9	4	6.8	M_w 4.0
Yountville 09/03/2000	08:36	38.379 -122.413	61	350	10.1	M_w 5.0
Piedmont 09/05/2003	01:39	37.845 -122.222	7	85	12.4	M_w 3.9
Berkeley 03/02/2006	06:08	37.863 -122.245	5	96	11.4	M_d 2.8

Nota: Tomado de (Celebi & Kalkan, 2006).

De esta manera, se evidencia en la Figura 28, la amplitud en las aceleraciones pico de 0,26 g en la planta alta de la estructura y de 0,21 g en la planta baja de la estructura, lo cual indica la interacción suelo-estructura y como la onda se puede amplificar debido a las propiedades y características del suelo (M Celebi & Kalkan, 2006).

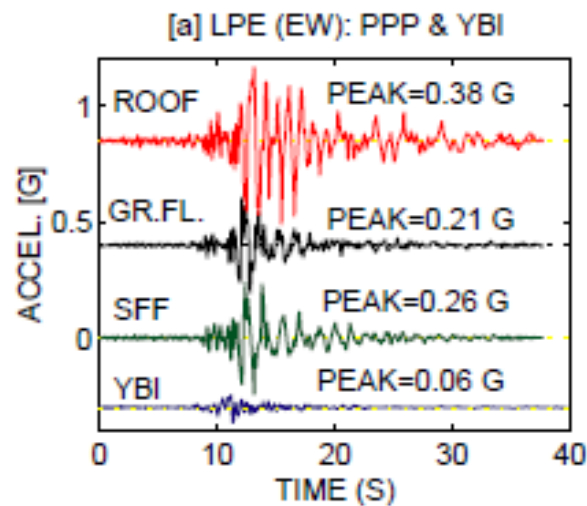


Figura 28. Amplificación de los movimientos correspondientes a la planta alta, media y baja, en comparación a la respuesta en la Isla Yerba Buena, con aproximadamente la misma distancia epicentral (M Celebi & Kalkan, 2006).

7. Estado Actual de la Instrumentación de Edificios en Colombia

7.1. Normativa Colombiana

El reglamento colombiano de construcción sismo resistente o NSR -10, contempla en sus capítulos, el Capítulo A.11 de instrumentación sísmica, el cual indica los parámetros para la instrumentación en edificaciones, sobre cuando se deben colocar instrumentos, su localización y la responsabilidad de la instrumentación. El (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010)

establece que se deben emplear acelerógrafos digitales de movimiento fuerte. La entidad gubernamental autorizada de aprobar los tipos de instrumentos a colocar en las edificaciones y aquella que opera la Red Nacional de Acelerógrafos es el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

7.1.1. Localización. La NSR – 10, en su sección A.11.1.3 estipula que la localización de los instrumentos en las edificaciones, es responsabilidad del ingeniero que realice el diseño estructural del proyecto, también debe cumplir con la localización estipulada por la misma (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

7.1.1.1. Instrumentación en Altura. La NSR – 10 , en su sección A.11.1.3 (a), estipula el uso de un mínimo de tres instrumentos en la edificación, en la parte de su base, en la mitad de la altura del edificio y en el nivel superior, el instrumento colocado en la base debe tener tres sensores triaxiales con dos componentes horizontales ortogonales y una componente vertical, mientras que los otros dos instrumentos pueden tener solo dos sensores horizontales ortogonales (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

7.1.1.2. Instrumento Único en la Edificación. Según la NSR – 10, en su sección A.11.1.3 (b), si al momento de hacer la instrumentación se decide colocar solo un instrumento de medición, este se pondrá en la base de la edificación (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

7.1.1.3. Instrumento de Campo Abierto. Como se evidencia en la NSR – 10, en su sección A.11.1.3 (c), “Se colocará un instrumento sobre el terreno, alejado de las edificaciones, por lo menos una distancia igual a su altura” (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

7.1.1.4. Arreglo de Instrumentos. Según lo establece la NSR – 10, en su sección A.11.1.3 (d), se colocarán los instrumentos de medición para las localizaciones anteriormente mencionadas, dichos instrumentos deben tener un dispositivo que inicie el registro de aceleraciones en todos simultáneamente (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

La NSR – 10, en su sección A.11.1.3.1 indica que, al momento de realizar una instrumentación, se deberá realizar un estudio geotécnico para definir las propiedades dinámicas del suelo en el sitio de la edificación (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

7.1.2. Características Donde se Coloca la Instrumentación. El lugar donde se colocarán los aparatos de medición debe tener al menos un área de 2 m^2 , dichos aparatos se deben colocar alejados de las zonas de alta circulación, de maquinarias o equipos que introduzcan vibraciones y puedan interferir en la toma de los datos, siendo esto estipulado por la sección A.11.1.4 de la NSR – 10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

7.1.3. Colocación de Instrumentos. Los aparatos de medición se colocarán de acuerdo a la NSR – 10 en su sección A.11.2, según a la amenaza sísmica del lugar de la edificación. En lugares donde la zona de amenaza es alta, la sección A.11.2.1 estipula que se debe colocar mínimo un instrumento en un área construida de más de 20000 m^2 y que tenga entre 3 y 10 pisos de altura; un mínimo de 2 instrumentos sísmicos en un área construida de 20000 m^2 y que tenga entre 11 y 20 pisos; en una edificación de 21 pisos o más, se colocara 3 sensores.

Cuando la zona de amenaza sísmica es intermedia, la sección A.11.2.2 señala que se debe colocar mínimo un instrumento en un área construida mayor a 30000 m^2 y que tenga entre 5 y 15 pisos de altura, un mínimo de 2 instrumentos en un área construida de 20000 m^2 y que tenga entre 16 y 25 pisos, en una edificación de más de 25 pisos, se colocaran 3 sensores. Cuando la amenaza

sísmica es baja, la sección A.11.2.3 indica que, no exige ni hay obligación de colocar instrumentos sísmicos (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010).

7.2. Principales Realizaciones de Edificaciones Instrumentadas en Colombia

7.2.1. Edificio 350 – Univalle. Este es un edificio que hace parte de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomántica de la Universidad del Valle, ubicado en el campus universitario Meléndez de la ciudad de Cali, el edificio es una estructura reticular celulada de dos pisos con una losa adicional de cubierta y distancias entre ejes de columnas de 7,20 metros, cada losa tiene una altura de 0,40 metros y estar armadas con viguetas, como se muestra en la Figura 29 (Univalle, 2012). Se tiene que la primera losa está ubicada a una altura de 3,20 metros, la segunda losa a 6,40 metros y la tercera losa a 8,00 metros.

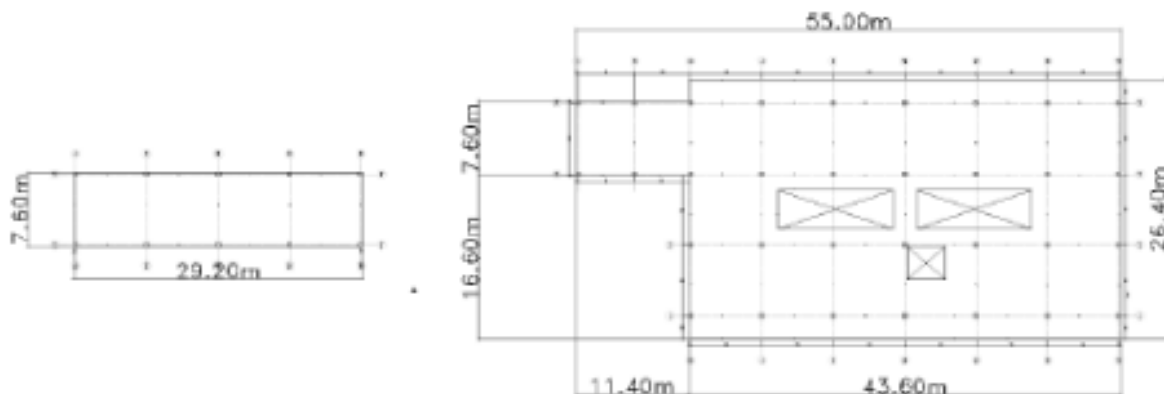


Figura 29. Planta de Edificio 350. Tomado de (Jimenez, Cruz, & Marulanda, 2012).

El edificio 350 cuenta actualmente con 6 sensores de aceleración marca REFTEK, los cuales están distribuidos así: 3 en la losa localizada en el Nivel + 6,40 metros y los 3 restantes, se

encuentran en la base de la edificación formando un triaxial. En la Figura 30, se muestra dicha distribución.

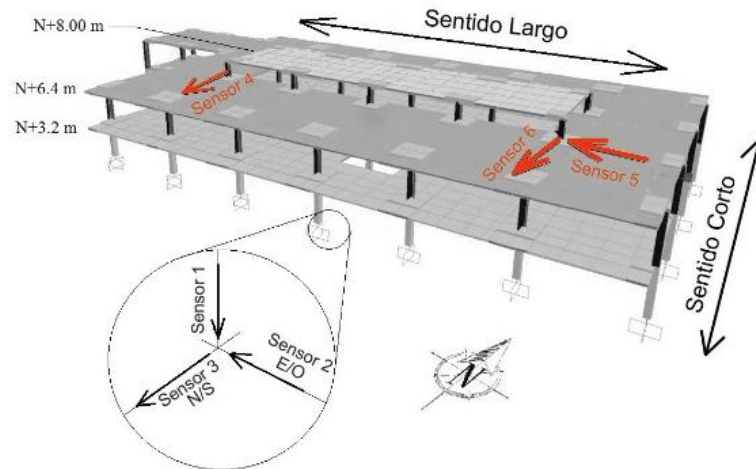


Figura 30. Ubicación de sensores en el Edificio 350. Tomado de (<http://proxse16.univalle.edu.co/~eicg/G-7/eng/Edificio350/index.html>).

Según (Jimenez et al., 2012) el sistema de monitoreo detectó dos sismos los días 12 y 28 de febrero de 2012, con epicentro cerca de la ciudad de Santiago de Cali. El sismo del 12 de febrero del 2012 tuvo lugar el Puerto Tejada, Cauca con una magnitud de 3,6 en la escala de magnitud de momento sísmico como se evidencia en la Figura 32 y el sismo del 28 de febrero del 2012 tuvo lugar en Sipí, Chocó con una magnitud de 4,5 en la escala de magnitud de Richter como lo muestra la Figura 31. El sistema de monitoreo registró la respuesta de la estructura ante dichos sismos, dando como resultado que las aceleraciones pico son de orden similar (Jimenez et al., 2012).

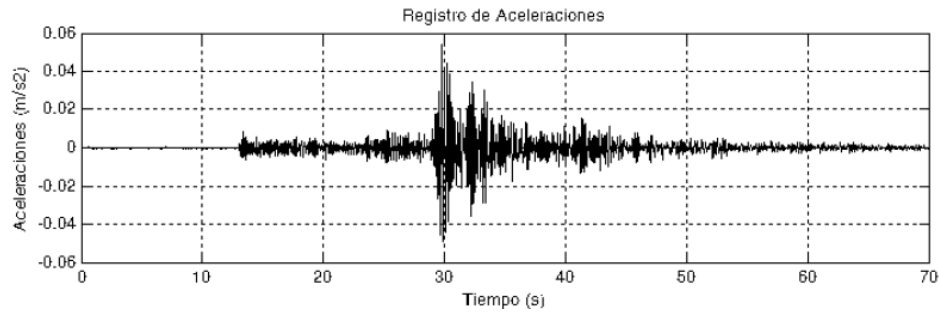


Figura 31. Respuesta del Edificio 350 ante sismo de magnitud 4,5. Tomado de (Jimenez et al., 2012).

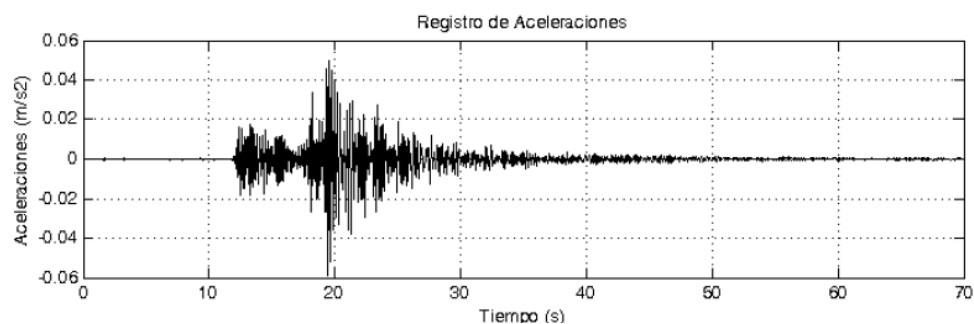


Figura 32. Respuesta del Edificio 350 ante sismo de magnitud 3,6. Tomado de (Jimenez et al., 2012).

La variación de masa y del paso de los usuarios del edificio a lo largo del día por su ocupación, afecta las propiedades dinámicas de la estructura, esto se ve reflejado en que las aceleraciones en las horas de la madrugada son casi nulas, mientras que en horas de jornada académica se puede ver las aceleraciones en el edificio que, aunque pequeñas, aumentan en comparación a su anterior estado, esto se vuelve a evidenciar en las horas de la noche cuando se termina la jornada académica (Jimenez et al., 2012). Se muestra en la Figura 33, las diferentes aceleraciones según las horas del día, obtenidas de los 6 sensores.

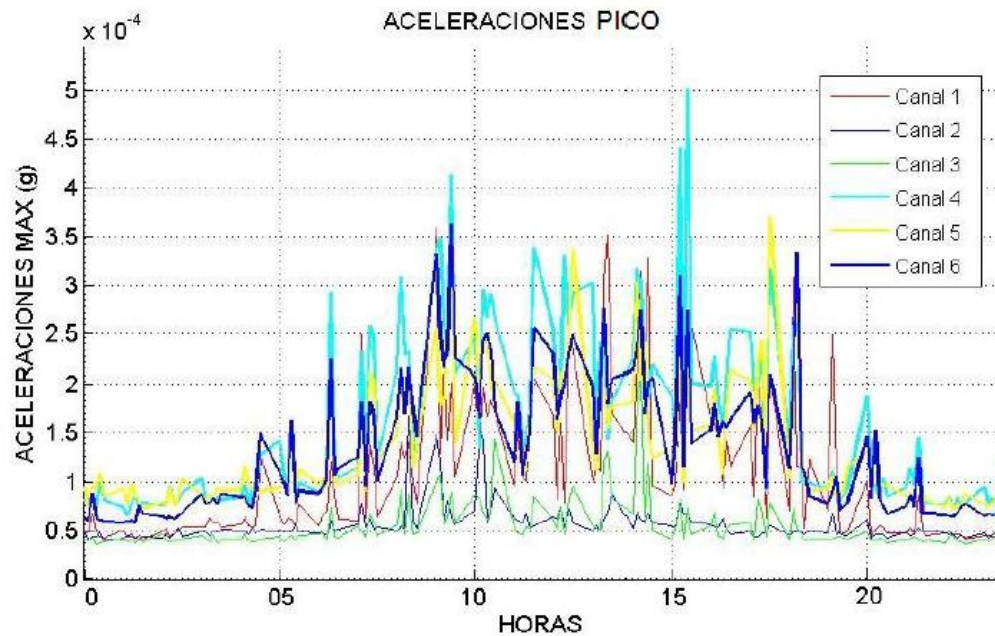


Figura 33. Aceleraciones pico según las horas del día. Tomada de (Jimenez et al., 2012).

Gracias al registro de las aceleraciones obtenidas, que, en ese caso, son aceleraciones debido a las vibraciones ambientales y a los cambios de servicio del edificio, se obtienen las aceleraciones pico que se presentaron en la estructura para una semana de monitoreo constante (Jimenez et al., 2012).

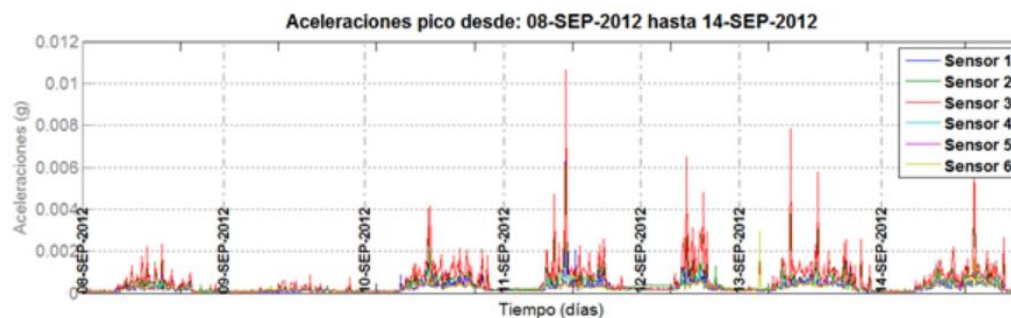


Figura 34. Aceleraciones pico durante una semana. Tomado de (<http://proxse16.univalle.edu.co/~eicg/G-7/eng/Edificio350/index.html>).

Factores como un evento sísmico, variación de la masa y la rigidez anteriormente mencionadas, influyen en el comportamiento de la estructura, variando su frecuencia. En Figura 34, se evidencia la variación de las frecuencias en función del tiempo, se espera que el efecto que produce la ocupación sea el de aumentar la masa, ya que las frecuencias características del edificio disminuyen de magnitud, aunque en las gráficas no muestra una tendencia, existe mucha dispersión en los datos y se podría deber al efecto que produce el ruido en la señal o posiblemente a una falta de calibración del algoritmo de identificación modal (Jimenez et al., 2012).

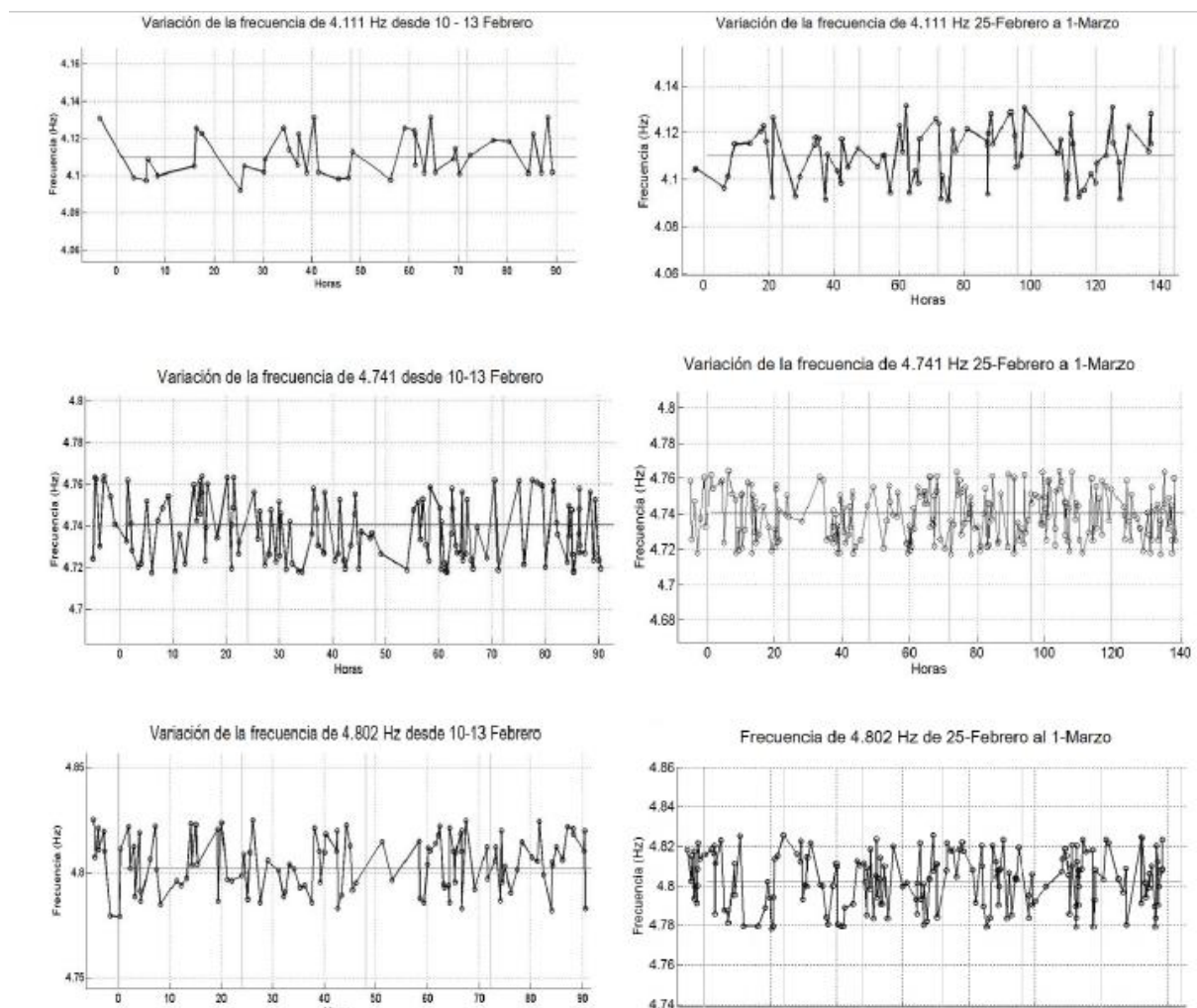


Figura 35. Variación de las frecuencias en función del tiempo (Jimenez et al., 2012).

8. Análisis Crítico

A nivel internacional se ha comprobado el incremento en el uso de la instrumentación sísmica para el monitoreo de la salud estructural en edificaciones, aunque en Colombia no ocurre la misma situación, se tiene que la NSR – 10, estipula en su Capítulo A.11 de Instrumentación Sísmica dicha práctica, se evidencia que no se cumple con la instrumentación en Colombia debido a los pocos casos encontrados de edificios instrumentados en el país.

La poca difusión de las normas sismo resistentes y sus variaciones introducidas al reglamento, han hecho que las personas del común, curadurías y oficinas de planeación no cumplan con la función de vigilar y controlar que la instrumentación sísmica en edificios en las edificaciones de Colombia entre en funcionamiento u operación y cumplan su propósito de monitorear el comportamiento de las estructuras.

Es muy poco usual que, a la hora de la venta de proyectos inmobiliarios, que incluyan edificios altos, se hable de otras características que no sean el área disponible, el número de habitaciones y diferentes comodidades que se pueden ofrecer al futuro inquilino; es inusual que a un futuro comprador se le hable del cumplimiento y normas de la NSR – 10.

Se hace énfasis en el Capítulo A.11 de Instrumentación Sísmica (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010), el cual estipula la instalación de instrumentos como sismógrafos y acelerógrafos en las construcciones altas y que superen cierta área construida, ya sean de uso residencial o comercial y el nivel de detalle que dicho capítulo contempla para realizar un monitoreo a las edificaciones.

Más allá de un requerimiento que se contempla en la NSR - 10, la mayor importancia de la instrumentación sísmica es recolectar registros que permitan obtener parámetros dinámicos como los periodos de vibración de la estructura ante eventos sísmicos y el nivel de daño que sufrió.

La instrumentación sísmica y la recolección de dichos registros, permiten realizar ajustes tanto a los modelos numéricos realizados previamente a la estructura, al calibrar y ajustar el modelo al comportamiento real de la estructura ante un evento sísmico, como a la misma NSR – 10, llevando a minimizar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones y el costo de proporcionar seguridad y protección sísmica a las mismas.

Se debe educar al ciudadano, en el momento de hacer la compra de un inmueble en edificios que cumplan con las características para realizar una instrumentación sísmica, ya que, debe exigir que el constructor tenga las herramientas necesarias para hacer cumplir con los requerimientos de la NSR – 10 y así poder ofrecer garantías al cliente, mediante la reducción del riesgo y el incremento en la seguridad estructural.

Conociendo que la NSR – 10 es Ley de la República por medio de la Ley 400 de 1997 y el Decreto 926 del 19 de marzo de 2010 Sísmica (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010), se debe asegurar que se cumpla con el Capítulo A.11, con mayor rigurosidad, ya que Colombia es un país con una zona de amenaza sísmica alta y es beneficioso para los próximos diseños, conocer el comportamiento de los diferentes sistemas estructurales en las diferentes zonas de amenaza sísmica y así poder mejorar los parámetros de análisis estructural que se toman a la hora de hacer un diseño, comparándolos con unos resultados reales en estructuras ya construidas.

8.1. Costos Asociados a la Instrumentación Sísmica en Edificaciones

Además de los beneficios obtenidos al instrumentar una estructura, se tiene en cuenta también el valor de la misma, ya que, conlleva unos ciertos ítems que elevan su costo. Partiendo de los dispositivos y aparatos de la instrumentación como tal, se tienen otros aspectos que son la instalación de los mismos y la adecuación de espacios para la instalación de los dispositivos, ya que, deben estar alejados de factores que puedan alterar sus registros.

Los costos de la instrumentación sísmica deben ser financiados por el dueño de la estructura tal como lo contempla la NSR – 10 en su sección A.11.1.5, debe cumplir con los dispositivos de instrumentación estipulados por el Servicio Geológico Nacional, el cual es la entidad que opera la Red Nacional de Acelerógrafos y es la encargada de aprobar los instrumentos y dispositivos que se colocaran en las edificaciones que cumplan con los requisitos para su instrumentación. El dueño de la edificación debe hacer la instalación y debe garantizar un acceso libre a los dispositivos para que el Servicio Geológico Nacional puedan verificar los registros y garantizar, un mantenimiento periódicamente, ya sea cada año o según el instrumento lo requiera.

El Servicio Geológico Nacional, independientemente del dueño de la estructura, debe recibir copia de los registros obtenidos por medio de los instrumentos, sin ningún costo.

9. Conclusiones

Al profundizar en el estudio del monitoreo de salud estructural en edificaciones por medio de la instrumentación sísmica, permite conocer los parámetros dinámicos de la estructura y su comportamiento ante eventos sísmicos, se evidencio que en la normativa internacional estudiada se reglamenta el uso de mínimo tres sensores, ubicados el primero en la base del edificio, el segundo en la parte media y el tercero en la parte superior, para obtener mejores registros.

La instrumentación tiene como ventaja la reducción del riesgo e incremento en la seguridad estructural, la posibilidad de realizar un mantenimiento preventivo por demanda y extensión de la vida útil de la edificación. También da una imagen favorable a la edificación, ya que al cumplir con la NSR – 10, aumenta el prestigio de la edificación por su responsabilidad social, a su vez, como una valorización por inversión en alta tecnología, investigación, desarrollo tecnológico, innovación y desarrollo científico local. También tiene de ventaja la seguridad que puede transmitir a los habitantes del edificio instrumentado.

En Colombia, la NSR – 10 en su Capitulo A.11, el cual contempla todas las pautas para instrumentar una edificación, tomando en cuenta su zona de amenaza sísmica y el número de pisos que ella tenga, lo cual beneficia a la comunidad, significando esto en una efectiva prevención de desastres, al conocer la respuesta en el rango inelástico de la estructura ante grandes eventos sísmicos, así como ante eventos sísmicos moderados se podría verificar el daño en elementos no estructurales que pueden afectar la continuidad operacional del edificio.

Referencias Bibliográficas

- Aboumoussa, W. ., & Iskander, M. G. (2011). *Instrumentation and Monitoring of a Four-Story Earth-Retaining Concrete Building*. 1753–1762.
- Alcántara, L., Murià, D., Vázquez, R., Macías, M. A., Almora, D., Torres, M., ... Vázquez, E. (2004). *Instrumentacion Sísmica de edificio de Telecomunicaciones*. (52), 1–11.
- Andrade, F. (2014). *Estimación De Capacidad Y Demanda De Muros , En Edificio De Vivienda Social , Durante El Sismo Del 27 De*.
- Barreto, N., & Sanchez, J. (2015). *Propuesta de Instrumentacion sismica para el nuevo edificio de investigacion y laboratorios de la facultad de Ingenieria*.
- Bayona, A., & Cruz, R. (2014). *Análisis Sísmico de los registros historicos desde 1993 hasta 2013 del Nido de Bucaramanga por medio de Transformadas de Fourier y Wavelets*.
- Cassano, A. M. (2009). *Analisis de Estructuras Bajo Acciones Dinamicas*.
- Çelebi, M., & Park, M. (2001). 1.3 Current Practice and Guidelines for Usgs Instrumentation of Buildings Including Federal Buildings. *Invited Workshop on Strong-Motion Instrumentation of Buildings*, 21.
- Celebi, M, & Kalkan, E. (2006). *Status and Needs for Seismic Instrumentation of Structures Along the Hayward Fault*. (c), 1–18.
- Celebi, Mehmet. (2000). Seismic Instrumentation of Buildings. *Usgs*, 94025(April), 1–37.
- Celebi, Mehmet, Safak, E., & Brady, G. (1986). Integrated Instrumentation Plan for Assessing the Seismic Response of Structures. In *Oxford University*.
- Chopra, A. K. (2012). *Dinamica de Estructuras*.
- CIRES. (2005). Sistema Acelerometrico Digital para Estructuras “SADE.”
-

-
- Deam, B. L., & Cousins, W. J. (2002). Strong-motion instrumentation of buildings in New Zealand. *New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, 2001*(2).
- Espinoza, D. (2016). *Respuesta Dinamica de un edificio instrumentado de concreto armado*.
- Fuentes-Olivares, L., & Muria-Vila, D. (2001). *Modelos Calibrados de un Edificio Instrumentado*. 2(3).
- Galindo, G. F. (2010). *Construccion y Validacion de un Sensor de Vibraciones usando un Sistema Micro-Electrico-Mecanico (MEMS)*. 67.
- García Reyes, L. E. (1998). *Dinamica estructural aplicada la diseño sísmico*.
- IBC. (2018). The International Building Code. Retrieved from <https://www.iccsafe.org/products-and-services/i-codes/2018-i-codes/ibc/>
- Iskander, M., & Nerik, Y. (2009). A course in instrumentation and monitoring of civil infrastructure. *In Situ*, 2, 95–102.
- Jimenez, L., Cruz, A., & Marulanda, J. (2012). *MONITOREO ESTRUCTURAL EN TIEMPO REAL PARA UN EDIFICIO E ESALA REAL*. 1–14.
- Lagos, S. (2014). *La Instrumentación Sísmica en México*.
- Lemnitzer, A., Massone, L. M., Skolnik, D. A., De, J. C., Martin, L., & Wallace, J. W. (2014). Aftershock response of RC buildings in Santiago , Chile , succeeding the magnitude 8 . 8 Maule earthquake. *Engineering Structures*, 76, 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.003>
- Maldonado, E., & Chio, G. (2004). *Análisis Sísmico de Edificaciones*. Bucaramanga.
- Martinez, J. M. (1996). *Instrumentación y Análisis de Resultados*.
- Marulanda, J., & Thomson, P. (2011). *Monitoreo de Salud Estructural*.
- Meli, R., Rivera, D., & Sánchez, A. R. (2001). *INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE LA*
-

CATEDRAL METROPOLITANA . 48(65).

Mendoza, M. (2011). *Instrumentacion para el Monitoreo de Obras Civiles*. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/448/A5.pdf?sequence=5>

Muria David; Gonzales Ricardo, E. J. M. (1991). *Analisis de la respuesta de un edificio instrumentado*.

Muriá Vila, D., & González, R. (1995). *Propiedades Dinámicas de Edificios de la Ciudad de México*. 51(25–45).

Norma Chilena para el Diseño Sísmico de Edificios. , (2012).

OSSO, C. (2012). *Análisis de los registros acelerograficos del sismo del 30 de Septiembre de 2012, La Vega, Cauca*.

Quintero, A., & Villamizar, R. (2010). Estado Del Arte en Monitorización de Salud Estructural: Un Enfoque Basado en Agentes Inteligentes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 117–132. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v20n1/v20n1a08.pdf>

Skolnik, D. A. (2010). *Building Instrumentation Requirements for Seismic Monitoring*.

Uma, S. R., King, A., Cousins, J., & Gledhill, K. (2011). The geonet building instrumentation programme. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(1), 53–63.

UN. (2001). *United Nations Population Division World Urbanization Prospects*.

United States Geological Service. Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings). , 2000 Technical Report No. 0-7460-68170 § (2002).

Univalle. (2012). Edificio 350. Retrieved from [http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/5533/1/TESIS LA INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA EN MÉXICO.pdf](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/5533/1/TESIS%20LA%20INSTRUMENTACI%C3%93N%20S%C3%89SMICA%20EN%20M%C3%89XICO.pdf)

-
- Vargas, I. R. (1999). *Instrumentación sísmica Evolución histórica y perspectivas futuras*. (365), 8–10.
- Vera, B. (2003). *Evaluacion de Errores de Datos Sismológicos y sus efectos sobre los parámetros y modelos derivados de éstos para una region determinada cubierta por la red del Observatorio Sismológico del SurOccidente - OSSO*.
- Viviescas Jaimes, A., Carrillo León, W. J., & Vargas Carvajal, L. A. (2018). Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental. *Inge Cuc*, 14(1), 52–65. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.05>
- Yapur, M., Israel, J., García, O., Héctor, D., & Salazar, T. (2015). *Medición de Esfuerzos y Deformaciones en Barras Metálicas Utilizando Galgas Medición de Esfuerzos y Deformaciones en Barras Metálicas Utilizando Galgas Extensométricas*. (March), 1–7.
-