

**ESTUDIO DE LAS TENDENCIAS ACTUALES EN MONITOREO DEL  
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES**

**CRISTIAN ESTEBAN FERNANDEZ YATE  
LORENDYS LUCIA LAVERDE LAVERDE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2014**

**ESTUDIO DE LAS TENDENCIAS ACTUALES EN MONITOREO DEL  
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES**

**CRISTIAN ESTEBAN FERNANDEZ YATE  
LORENDYS LUCIA LAVERDE LAVERDE**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director**

**ALVARO VIVIESCAS JAIMES**

**Ing. Civil**

**Co-Director**

**ALEXIS VEGA ARGUELLO**

**Ing. Civil**

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

**2014**

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco en primer lugar a Dios y a mis Padres que son la razón de lo que hoy me he convertido como persona, mi ejemplo a seguir y la fortaleza necesaria para emprender el camino al éxito.*

*También quiero agradecerles a mis hermanos y amigos por el apoyo incondicional que me brindaron para culminar esta etapa de mi vida.*

## AGRADECIMIENTOS

*Al amor y la perseverancia de mi madre por estar ahí cuando menos quería ir a la Universidad.*

*Al amor y la paciencia de mi padre cuando ni mi mamá ni yo queríamos levantarnos de la cama.*

*A la curiosidad académica de mis hermanos que me han hecho estar retomando todo el aprendizaje con el que he llegado hasta aquí.*

*A ella y su compañía.*

*A todos los malos consejos de mis amigos que me dejaron un leve arrepentimiento, capaz de hacer tomar más fuerza para seguir.*

*A todos los profesores con los que tuve problemas. Y en especial aquellos con los que el grado de amistad era notorio.*

*Y a este tipo de escritos que no me gustan.*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCION</b>	14
<b>JUSTIFICACION DEL PROYECTO</b>	16
<b>1. INSTRUMENTACIÓN SISMICA</b>	17
<b>2. INSTRUMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS</b>	18
<b>3. SALUD ESTRUCTURAL</b>	19
<b>4. MONITOREO ESTRUCTURAL</b>	20
<b>5. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES</b>	22
<b>5.1 INSTRUMENTACIÓN SISMICA EN MÉXICO</b>	22
<b>5.2. INSTRUMENTACIÓN SISMICA EN CHILE</b>	29
<b>5.2.1 Monitoreo general.</b>	31
<b>5.2.2 Monitoreo especializado.</b>	32
<b>5.3 INSTRUMENTACIÓN SISMICA EN JAPON</b>	36
<b>5.4 INSTRUMENTACIÓN SISMICA EEUU</b>	40
<b>5.5. INSTRUMENTACIÓN SISMICA EN COLOMBIA</b>	48
<b>5.5.1 Criterios para instrumentar un edificio según la NSR-10.</b>	49
<b>5.5.1.1 Localización.</b>	49
<b>5.5.1.2 Colocación de instrumentos sísmicos.</b>	50
<b>5.5.1.3 Costos.</b>	51
<b>5.5.1.4 Colocación de instrumentos sísmicos.</b>	52
<b>6. PROPUESTA CASO DE APLICACIÓN</b>	53
<b>6.1. CRITERIO NORMATIVO PARA INSTRUMENTAR UN EDIFICIO TIPO SEGÚN LA NSR-10</b>	54
<b>6.1.1 Propuesta alternativa de instrumentación para el edificio tipo.</b>	54
<b>CONCLUSION Y RECOMEDACIONES</b>	58
<b>REFERENCIAS</b>	60

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Edificio Instrumentado OASIS	25
<b>Figura 2.</b> Planta Tipo Edificio OASIS	25
<b>Figura 3.</b> Croquis de ubicación y dirección de los sensores	26
<b>Figura 4.</b> Diagrama de la tubería de conexión del Edificio Instrumentado OASIS	28
<b>Figura 5.</b> Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción	34
<b>Figura 6.</b> Localización de sensores en CHCC	35
<b>Figura 7.</b> Ubicaciones de los sensores del Edificio de Oficinas (SKS) de Osaka Sakishima	38
<b>Figura 8.</b> Ubicaciones de los sensores del Edificio de Oficinas (SKS) de Osaka Sakishima	39
<b>Figura 9.</b> (a) Ubicación de instrumentos sísmicos recomendada por UBC	44
<b>Figura 10.</b> b) Modelo ideal extensivo	44
<b>Figura 11.</b> Edificios instrumentados sísmicamente por CISN. Edificio VN7SH de 7 pisos	45
<b>Figura 12.</b> Diferentes vistas del VN7SH. (a) y (b) Vista frontal que muestra las grietas y daños presentes en el edificio y la ubicación de 13 sensores	46
<b>Figura 13.</b> Izq. Sección transversal típica del Suelo perforado para la construcción	46
<b>Figura 14.</b> Posicionamiento de los sensores antes y durante el sismo de 199	47
<b>Figura 15.</b> Diferentes enfoques del edificio tipo	53
<b>Figura 16.</b> Diferentes enfoques del edificio tipo	55

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Edificios Instrumentados en México	24
<b>Tabla 2.</b> Claves, ubicaciones y orientaciones de los sensores del edificio OASIS	27
<b>Tabla 3.</b> Comparación de diversas características en métodos de ensayos no destructivos	33
<b>Tabla 4.</b> Nombres y características de edificios chilenos instrumentados	34
<b>Tabla 5.</b> Códigos modelos en las tres regiones	41
<b>Tabla 6.</b> Listado de códigos hechos por la UBC	41
<b>Tabla 7.</b> Listado de los mayores sismos ocurridos en E.U.	42
<b>Tabla 8.</b> Nombre de los edificios y características	45
<b>Tabla 9.</b> Colocación de instrumentos según la NSR-10 zona sísmica alta	51
<b>Tabla 10.</b> Colocación de instrumentos según la NSR-10 zona sísmica intermedia	51
<b>Tabla 11.</b> Características generales del edificio tipo	53
<b>Tabla 12.</b> Criterios normativos relevantes en el edificio tipo	54
<b>Tabla 13.</b> Modos de vibración de la estructura	56
<b>Tabla 14.</b> Distintos acelerógrafos en el mercado y cotización verbal con el proveedor Kinematics	57

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LAS TENDENCIAS ACTUALES EN MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES \*

**AUTORES:** CRISTIAN ESTEBAN FERNANDEZ YATE, LORENDYS LUCIA LAVERDE LAVERDE, ALEXIS VEGA ARGUELLO, ALVARO VIVIESCAS JAIMES \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Instrumentación sísmica, monitoreo, vulnerabilidad, registros sísmicos, salud estructural.

### **CONTENIDO:**

A lo largo de la historia, han ocurrido grandes pérdidas económicas y humanas ocasionadas por factores ambientales, uno de ellos son los terremotos que han ocasionado el colapso de un gran número de edificaciones de viviendas; por este motivo se han realizado estudios e investigaciones alrededor del mundo con el fin de mejorar las normas de construcción en aspecto sismo resistente para garantizar la seguridad y confiabilidad de las estructuras.

Adicionalmente, una rama que toma relevancia, especialmente con la entrada de vigor de la NSR-10 es la instrumentación sísmica de edificaciones con el fin de realizar monitoreo permanente de esta estructura. Con base a lo anterior este trabajo tiene como objetivo principal la recopilación y análisis de información sobre las tendencias actuales en sistemas de instrumentación sísmica para monitoreo de edificaciones aplicados en otros países que comparten con el nuestro la amenazas sísmica tales como México, Chile, Japón, Estados Unidos.

Luego de realizar dichos estudios y de tener una idea más clara de las alternativas de instrumentación para monitoreo sísmico en estos países se procede a realizar una propuesta para la instrumentación de una edificación tipo en la ciudad de Bucaramanga.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Álvaro Viviescas.

## ABSTRACT

**TITULO:** ESTUDIO DE LAS TENDENCIAS ACTUALES EN MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES \*

**AUTORES:** CRISTIAN ESTEBAN FERNANDEZ YATE, LORENDYS LUCIA LAVERDE LAVERDE\*\*

**KEYWORDS:** Seismic instrumentation, monitoring, vulnerability, seismic record, structural health.

### **CONTENIDO:**

Throughout history, economic and human losses have occurred caused by environmental factors, like earthquakes which have caused the collapse of a large number of residential buildings; for this reason multiples studies have been developed around the world to improve standards construction technics in appearance resistant to ensure safety and reliability of structures.

Additionally, one branch became relevant, especially with the entry of force of the NSR-10 seismic instrumentation of buildings in order to conduct ongoing monitoring of this structure. Therefore, the main objective this work is the collection and comparison of information systems for monitoring seismic instrumentation of buildings used in other countries, those countries such as Mexico, Chile, Japan, USA suffer seismic and tectonic hazards like Colombia

After conducting such studies and to have a clearer idea of alternative seismic monitoring in these countries we proceed to make a proposal for the implementation of a building in the city of Bucaramanga.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Álvaro Viviescas. Co-Director Alexis Vega Arguello.

## INTRODUCCION

La instrumentación sísmica nos permite registrar la respuesta estructural que ha tenido una edificación durante diversos eventos sísmicos, esto nos proporciona una valiosa fuente de información para determinar entre otras cosas la salud de una edificación. Esta, tiene como objetivo determinar las características dinámicas reales de una estructura y realizar valoraciones cuantitativas de las acciones producidas por los sismos.(Muria Vila, 2007) Las metodologías empleadas han tenido que adaptarse a la creciente accesibilidad de información y a los avances tecnológicos en cuanto a programas y sistemas de cómputo cada vez más potentes, permitiendo incursionar en nuevos campos y obteniendo mejores alternativas que nos ayudan en seguridad, prevención de desastres y mantenimiento de las estructuras.(Taborda, Muria Vila, Macias, & Escobar, n.d.)

Nuestro país, al estar ubicado en una zona de alta sismicidad, ha vivido las consecuencias de grandes eventos sísmicos tales como el del Eje Cafetero el 25 de enero de 1999 en la zona centro-occidental de Colombia el cual evidencio la falta de una metodología para la evaluación de estructuras y una actualización de la Norma sismo resistente

A pesar de que las normas de construcción mejoran con el paso del tiempo y la información que se obtiene a partir de esas nuevas experiencias son un avance para la solución de este problema, seguimos viviendo trágicas pérdidas alrededor del mundo debido a la falta de interés y la falta de apoyo económico que se debe brindar al instrumentar edificaciones. Países como Estados Unidos, Japón, y Chile cuentan con una mayor instrumentación de edificios, debido a que se encuentran ubicados en zonas altamente sísmicas.

La evaluación de la seguridad estructural de una edificación es muy importante debido a que a partir de los resultados obtenidos de ellos, se pueden llegar a tomar decisiones para reparar, reforzar o rehabilitar un edificio a fin de reducir su vulnerabilidad ante un sismo.

Este trabajo presenta una propuesta para la recopilación de datos, análisis y tendencias utilizadas por los distintos países con alta vulnerabilidad sísmica a la hora de realizar instrumentaciones en edificaciones y realizar una comparación de todas las técnicas aplicadas por cada país frente al nuestro.

## JUSTIFICACION DEL PROYECTO

Debido a la obligatoriedad que implica la entrada en vigor de la NSR-10 en el tema de instrumentación sísmica para el monitoreo de edificaciones, se pretende realizar un análisis de las experiencias internacionales que sirvan como partida para la creación de conocimiento en esta temática para nuestro país

De la información disponible en la literatura científica, se evidencian los beneficios que se obtienen de la información generada por estos instrumentos acerca de la salud estructural de un edificio. Al realizar una instrumentación sísmica en un edificio podemos disponer de datos que permitan esclarecer varios aspectos relacionados con la respuesta de la estructura y en particular ante aquellos sismos de gran intensidad, además de esto se obtienen sus formas modales y frecuencias de vibración que se pueden utilizar para estimar su estado o nivel de daño.

Sin embargo a pesar de toda la información que se obtiene de los análisis y de las metodologías de instrumentación de estos países, la instrumentación sísmica a nivel mundial aun es muy limitada, tanto así que existen zonas sísmicas con poca o nula cobertura instrumental.

Dicho lo anterior, la razón para la instrumentación de estructuras recae en poder desarrollar métodos que permitan realizar estudios de las características dinámicas y el estado de daño de una estructura y así poder establecer aportes a los diferentes problemas y mejorar el conocimiento sobre la respuesta sísmica de la estructura.

## 1. INSTRUMENTACIÓN SISMICA

La instrumentación sísmica de estructuras tiene como propósito contribuir a la comprensión de la respuesta dinámica antes un sismo de gran intensidad realizando así, diversos seguimientos de estas respuestas para estudiar las modificaciones que sufren sus parámetros estructurales, y con la información obtenida, poder determinar con mayor exactitud las reparaciones o refuerzos que se requieren debido a los daños como resultado de un proceso de deterioro.(Escobar, 2006)

Según la Norma Sísmica Colombiana NSR-10 el principal objetivo de la instrumentación sísmica para edificaciones está basada en la recolección de registros que permitan, en otros: la medición de los periodos de vibración de la edificación al verse sometida a movimientos sísmicos, la determinación del nivel de daño que ocurrió a la edificación debido a la ocurrencia de un sismo que la afecte, la identificación de efectos de sitios causados por la amplificación de las ondas sísmicas debido a los estratos del suelo subyacente, el grado de atenuación que sufren las ondas sísmicas que sufren las ondas sísmicas al viajar desde el lugar donde ocurre la liberación de energía hasta el sitio donde se encuentra localizada la edificación, y en general el mejoramiento sobre el conocimiento que tiene a nivel nacional de los fenómenos sísmicos y sus efectos sobre las construcciones y los materiales de construcción nacionales.(NSR-10, 2010)

## 2. INSTRUMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS

El mal funcionamiento de las estructuras puede tener grandes consecuencias en donde se ven involucradas pérdidas humanas o en su defecto poblaciones con carencia de infraestructuras que queden parcial o totalmente fuera de servicio debido a colapsos. Al monitorear obras civiles, se promueve la investigación y se adquiere nuevos conocimientos el cual nos permite un mayor entendimiento del comportamiento de los materiales y métodos tradicionales de construcción.(Mendoza, 2011).

La necesidad de encontrar nuevas tecnologías que permitan evaluar el desempeño de la infraestructura ante la ocurrencia de un fenómeno natural, es una prioridad en un país donde existan obras estructurales importantes. Actualmente el número de obras civiles instrumentadas es muy poco, sin embargo la aparición de nuevas exigencias técnicas y económicas que conlleven a garantizar la seguridad de los usuarios y minimizar costos, hacen del monitoreo estructural una labor indispensable en la búsqueda de alternativas para esta problemática.(Mendoza, 2011)

Uno de los principales objetivos de la instrumentación sísmica en estructuras es establecer las variaciones en las respuestas por el efecto del comportamiento dinámico de cada estructura, para poder realizar comparaciones entre los modelos de análisis matemáticos empleados durante el diseño y determinar variaciones o modificaciones. Además busca el establecer métodos para la evaluación de daños en estructuras de gran importancia, para lo que requiere de un monitoreo constante. (UNIVERSIDAD COSTA RICA, 2009-2013)

### **3. SALUD ESTRUCTURAL**

Para (Díaz, 2013) el término de salud estructural ha tomado mucha relevancia a nivel internacional, este concepto tiene como objetivo fundamental la generación de un diagnóstico del estado y características de las propiedades dinámicas y físicas de una estructura además de comprender los factores que influyen en el rendimiento estructural, poder evitar fallas y tomar decisiones eficaces con respecto a mejoras o cambios necesarios.

El envejecimiento de las estructuras y las evoluciones constructivas generan un gran reto para asegurar que los edificios continúen sus operaciones de manera eficiente y a costos razonables. Afortunadamente, el estado de la profesión también ha ido evolucionando en varios aspectos y está cumpliendo muchos de estos desafíos.

La evaluación de la salud estructural a través de las inspecciones visuales y el uso de sensores e instrumentación, al ser planificado y ejecutado de manera eficiente pueden conducir a una mayor confiabilidad del rendimiento esperado de la estructura. Así, el mantenimiento necesario, las inspecciones y otras operaciones programadas a lo largo del ciclo de vida pueden traducir en evitar costos o daños estructurales significativos.

## 4. MONITOREO ESTRUCTURAL

El monitoreo de la salud estructural es un proceso que consiste en la captura continua o periódica; de forma permanente o habitual, de los parámetros más representativos que permiten conocer el estado de una estructura, lo cual significa que puede realizarse a corto, mediano, largo plazo o inclusive durante la vida útil del inmueble.(Mendoza, 2011)

Las principales actividades que conforman el monitoreo estructural son:

- Selección de la estrategia de monitoreo.
- Diseño de la instrumentación (ubicación, tipo de equipos, cantidad, etc.).
- Instalación del sistema de monitoreo.
- Mantenimiento del sistema de monitoreo.
- Análisis de la información.

Este monitoreo estructural puede ser aplicable en presas, embalses, puentes, edificios e instalaciones mediante la colocación de sensores y otros instrumentos a lo largo de la estructura con el fin de obtener información permanente, además de detectar algún daño ocasionado por eventos sísmicos u otros eventos externos que afecten la estructura. Este monitoreo nos permite cuidar la estructura a largo plazo disminuyendo así, costos de mantenimiento y reparaciones.

El objetivo de un sistema de monitoreo estructural es proveer información en tiempo real sobre la integridad, la seguridad y la respuesta de la estructura ante distintas situaciones. Por lo tanto, el monitoreo estructural nos permite reducir significativamente los costos de reparación mediante la detección de problemas en sus primeras etapas, y hacer a la estructura más segura y eficiente en relación a sus costos de mantenimiento. Otros beneficios son (AMBHER INGENIERÍA):

- Mayor conocimiento del comportamiento estructural.
- Reducción en tiempo de inspecciones y reparaciones.
- Aseguramiento del funcionamiento y longevidad de la estructura.

## **5. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES**

Las referencias sobre instrumentación sísmica de edificios en el mundo son escasas con excepción de Japón y Estados Unidos que tienen cientos de ellos. Japón cuenta con 2000 acelerógrafos destinado al registro del movimiento que producen los terremotos y temblores y se encuentran distribuidos en diferentes ciudades, además es el único país que cuenta con instalaciones necesarias para realizar pruebas de carga lateral en edificios de 10 pisos en escala real. Así mismo, se estima que Estados Unidos hay cerca de 3000 acelerógrafos. (Escobar, 2006)

Para este trabajo, se escogieron 5 países con alta vulnerabilidad sísmica y se recopiló la información de las metodologías de instrumentación sísmica y sus diferentes propuestas de aplicaciones para edificios.

### **5.1 INSTRUMENTACIÓN SISMICA EN MÉXICO**

La instrumentación sísmica para edificaciones en México da comienzo en el año 1950 con la instalación de transductores de desplazamientos y algunos acelerógrafos en la Torre Latino Americana (Zeervaert, 1960 y 1963). Esta nueva incursión de equipos sismológicos registró los movimientos del sismo de San Marco (julio de 1957) de magnitud de 7.5 en la escala de Richter, cuyos desplazamientos relativos y aceleraciones registradas dieron paso para crear los coeficientes sísmicos que se establecieron en las normas de construcción de la ciudad de México.

A pesar de que el Instituto de Ingeniería de la UNAM y Leonardo Zeevaert quien fue el principal promotor de la instalación de estos equipos en la Torre Latino

Americana hicieron gran promoción a este nuevo avance tecnológico, pero por desgracia, no motivo el interés en la sociedad para instrumentar otros edificios. Posteriormente, con la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México que produjo grandes pérdidas tanto humanas como económicas, esto evidenció la importancia de la instrumentación en las edificaciones nuevas, no tanto en su diseño, si no en el monitoreo permanente encaminado a la prevención y análisis de daños estructurales.

En 1987 se dio inicio formalmente todos los estudios de instrumentación sísmica para edificaciones en la ciudad de México con la ayuda de Centro Instrumentación y Registros Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra (CIRES) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) (Muria Vila, 2007) luego se sumaron el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la fundación ICA; sin embargo, dado los elevados costos que implica la instrumentación sísmica, se estima que los edificios instrumentados en México no exceden a 30 en todo el país, que en general se localizan en la ciudad de México.( Escobar, 2006)

Esta cantidad no es suficiente para cubrir los edificios más representativos de las regiones de mayor riesgo sísmico del país. En el largo tiempo que realizaron exhaustivos análisis de las respuestas registradas de los diferentes edificios, se destacaron cuatro edificios altos de concreto reforzado, porque sus frecuencias o periodos fundamentales están muy cerca de las frecuencias dominantes del sitio, por lo tanto las respuestas registradas se dan en condiciones de cuasi resonancia. Tres de ellos se localizan en la ciudad de México y el otro en la ciudad de Acapulco. Por lo tanto el Instituto de Ingeniería de la UNAM se encuentra a cargo de la instrumentación de estos tal como lo indica la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Edificios Instrumentados en México

<b>Edificios</b>	<b>Características</b>
Córdoba	Edificio de concreto reforzado de 18 niveles
Juárez	Edificio de concreto reforzado de 12 niveles
Jalapa	Edificio de concreto reforzado de 14 niveles
OASIS	Edificio de concreto reforzado de 18 niveles (Cd de Acapulco)

**Fuente:** Escobar, 2006.

Para realizar una instrumentación sísmica de un edificio en México, se deben determinar una serie de requisitos para la selección del edificio más conveniente a instrumentar, tales como: que estuviera ubicado en una zona de suelo blando, que el sistema estructural fuera lo más sencillo, regular y simétrico posible, que su estructura fuera de concreto reforzado y no mayor de 20 pisos, que fuera una construcción reciente, que contara con la documentación técnica completa, y que se otorgaran los permisos de acceso para instalar y operar la red acelerométrica para inspeccionar la estructura cuando lo amerite. (Taborda et al., n.d.)

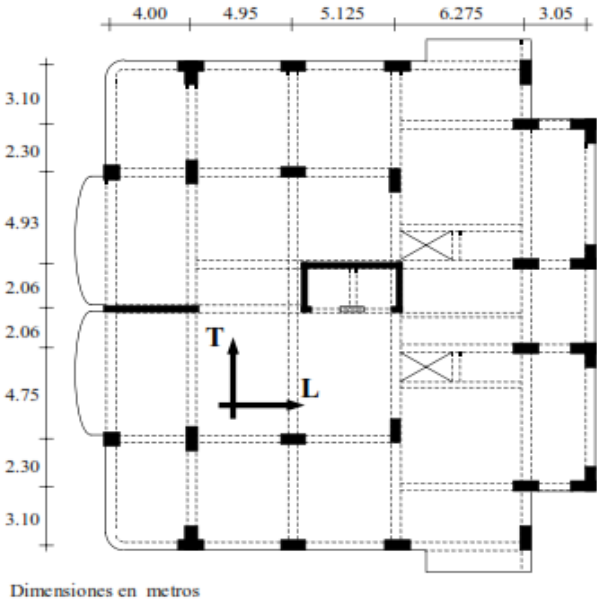
Para nuestro ejemplo se escogió el edificio OASIS el cual cuenta con los requisitos mencionados anteriormente. Este edificio se encuentra localizado en la ciudad de Acapulco, el edificio está compuesto por 17 pisos más uno de sótano para estacionamiento y se concluyó la construcción en diciembre del 2000 (Ver Figura 1). La estructura es de concreto reforzado a base de marcos y muros y su cimentación está conformada por 30 pilas de profundidad 12.5m. Tiene resistencia nominal de concreto  $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$  y una resistencia del acero de  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ . (Taborda et al., n.d.).

**Figura 1.** Edificio Instrumentado OASIS



**Fuente:** Taborda et al., n.d.

**Figura 2.** Planta Tipo Edificio OASIS

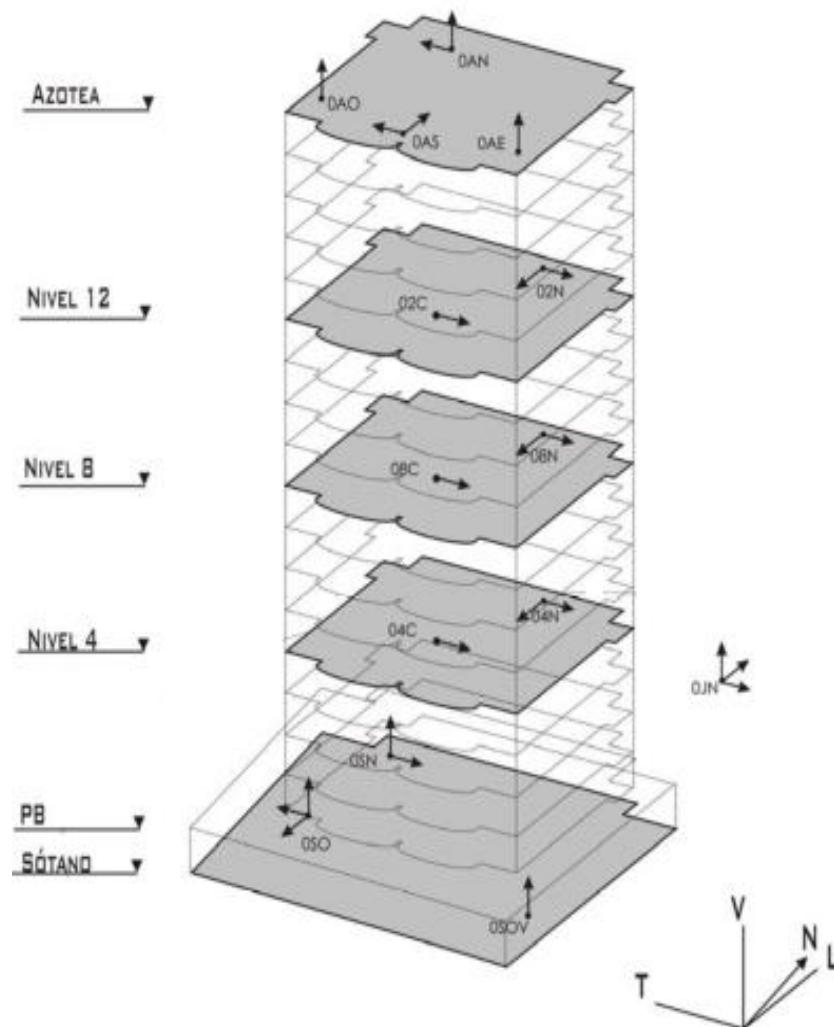


**Fuente:** (Taborda et al., n.d.)

La instrumentación del edificio se completó a finales del año 2001 y quedó integrada por 18 acelerómetros uniaxiales y dos triaxiales, los cuales se encuentran ubicados de la siguiente forma. (Aldama, 2005)

Un sensor triaxial en el jardín en dirección norte, en el sótano del edificio se colocó un sensor triaxial en la base de la columna hacia el este del edificio, y dos sensores uniaxiales en la base de la columna norte, uno en dirección transversal y el segundo en posición vertical. (Ver Figura 3)

**Figura 3.** Croquis de ubicación y dirección de los sensores



**Fuente:** Aldama, 2005.

En los niveles 4, 8 y 12 se encuentran ubicados tres acelerómetros horizontales, dos en dirección transversal y uno en dirección longitudinal, y en la azotea se ubicaron 6 sensores uniaxiales, tres verticales y 3 horizontales. (Ver Figura 3)

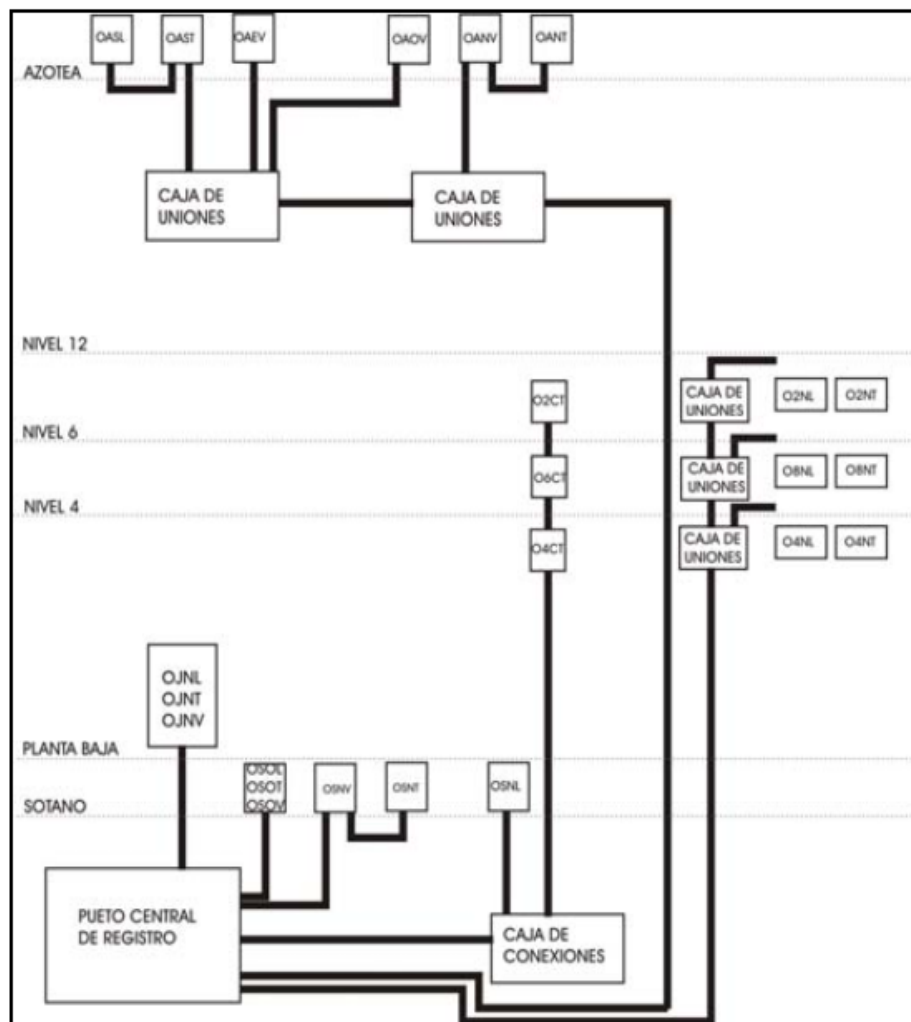
**Tabla 2.** Claves, ubicaciones y orientaciones de los sensores del edificio OASIS

CLAVES DE LOS SENSORES EN EL EDIFICIO OASIS			
SENSORES	CLAVE	DIRECCIÓN	ORIENTACIÓN
AZOTEA	0ASL	L	+
	0AST	T	+
	0ASV	V	+
	0AEV	V	+
	0ANV	V	+
	0ANT	T	-
NIVEL 12	02CT	T	+
	02NL	L	-
	02NT	T	+
NIVEL 8	08NT	T	+
	08CT	T	+
	08NL	L	-
NIVEL 4	04CT	T	+
	04NL	L	-
	04NT	T	+
SOTANO	0SOT	T	-
	0SOL	L	-
	0SOV	V	+
	0SNV	V	+
	0SNT	T	+
	0SEV	V	+
TERRENO	0JNL	L	+
	0JNV	V	+
	0JNT	T	+

Fuente: Aldama, 2005.

La red empleada está integrada por 3 registros digitales de modelo K2 de 12 canales de alta resolución marca Kinematic, 18 acelerómetros uniaxiales modelo FBA-11 y dos acelerómetros triaxiales modelo FBA-23 de la misma marca. Cada uno está conectado por medio de cables Belden tipo multipar resguardado en tubo conduit, desde cada punto de medición al puerto central de registro, para ello se emplean varias cajas de interconexión (Ver Figura 4). El centro de registro está ubicado en el sótano del edificio y la orientación de cada sensor se especifica en la Tabla 2. (ALDAMA, 2005) (ALCANTARA et al., n.d.)

**Figura 4.** Diagrama de la tubería de conexión del Edificio Instrumentado OASIS



**Fuente:** Aldama, 2005.

## 5.2. INSTRUMENTACIÓN SISMICA EN CHILE

El 16 de Agosto de 1906 poco antes de las 8:00 p.m., la ciudad de Valparaíso presenta el que sería el evento natural más devastador de comienzo de siglo. Un sismo con dos réplicas consecutivas, hace que la ciudad se vea envuelta en el caos. Se presentan destrozos en viviendas y zonas productivas, seguido de un incendio causado por una intensidad de 8.2 en la escala de Richter. (Emol.com)

El entonces rector de la Universidad de Chile, Valentín Leteiler solicita al entonces presidente Pedro Mott la implementación de una estación sismográfica al servicio de todo Chile, la cual se hace realidad en 1908. Para ese entonces, el reconocido ingeniero Hormidas Henríquez, propone ante sus colegas la inmediata necesidad de cambiar los materiales para mitigar el daño colosal en las edificaciones, es ahí donde se implementan las estructuras de hormigón armado para las edificaciones de Chile.

Casi 20 años después del avance logrado en conjunto por catedráticos y Gobierno, se presentan dos eventos telúricos de gran impacto, el primero de ellos el 10 de Noviembre de 1922 en la ciudad de Vallenar, con una intensidad de 8,2 en la escala de Richter acompañado de un tsunami. El segundo evento es seis años después, el 1 de Diciembre de 1928 en la ciudad de Talca, este con una intensidad de 7,6 en la escala de Richter. La secuencia de eventos en menor tiempo y con magnitudes altas, prende la preocupación en las entidades gubernamentales y científicas. Es entonces cuando se crea una Ley y Ordenanza General de Construcción y Urbanización, que fue ampliamente debatida y por fin aprobada en 1935. Chile ahora cuenta con las que serían las primeras normas de diseño y construcción antisísmicas para todo el territorio.

Para (Calderón, 2007) en un estudio de tipologías estructurales de hormigón armado en Chile, se evidencia el uso común del sistema de muros estructurales

que por ser usado con eficacia y preferencia lo denomina "*edificio chileno*". En la introducción del capítulo 1 de su investigación, resume los antecedentes históricos para empezar a llamarlo así.

El edificio chileno se caracteriza por tener abundantes muros estructurales que le han dado buenos resultados, teniendo en cuenta que estos restringen considerablemente los desplazamientos totales y relativos entre cada piso, logrando así una mayor rigidez. (Flores, 1999) En los últimos 40 años en edificios menores a 40 pisos, se pudieron identificar las siguientes tipologías estructurales: muros de rigidez, muros con marco de fachada y marcos con muros ubicados en la caja de la escalera y/o ascensor.

El auge de la alta densidad de muros en las edificaciones, aparece en la década del 80, donde se hace evidente la exigencia de divisiones entre los apartamentos (Ordenanza General de Urbanismo y Construcción).

Las metodologías usadas para el monitoreo sísmico en Chile tiene como fundamento, la recopilación, administración, investigación y análisis de información relevante de una estructura que involucre su estado, edad, funcionalidad, geometría, tipo de sistema estructural, tipo de materiales usados y características dinámicas.

Estas metodología además, deben suministrar una gama de posibles problemas que presenta la edificación, indicando cual sería más probable que se estuviese presentando, los beneficios sociales que conlleva una reparación y por último una base de datos que haga el papel de historial sísmico del edificios para futuras eventualidades. En cuanto a la clasificación de estas metodologías, Chile propone tres tipos o niveles: monitoreo general, monitoreo especializado y monitoreo eventual. Esta clasificación tiene como objetivo puntualizar los diferentes casos y darles un mejor tratamiento proporcionando mayor agilidad.

**5.2.1 Monitoreo general.** Es una inspección visual por todas las partes del edificio. Este tipo de monitoreo se hace sin ningún tipo de instrumentación y puede ser hecho por parte de un evaluador con un mínimo grado de instrucción en estructuras. Este proceso de observación debe realizarse cada cierto tiempo y debe ser capaz de incluir calificaciones y recomendaciones en caso de presentarse anomalías.

Las fichas de información son formatos por lo general hechos a mano que agrupan todas las características visuales que puedan tomarse de una estructura. Para el caso de las edificaciones en altura de Chile, este tipo de fichas no tienen ninguna base normativa y la cantidad de información que se pretende obtener depende del criterio de cada evaluador.

Para (Molina, 2012) este sistema de fichas deben proveer suficiente información para una correcta administración de recursos en el caso de mantenimiento o rehabilitación de manera óptima en relación a su nivel de importancia o de valor histórico.

El uso de estas fichas es conocido en el ámbito internacional y están fundados en artículos técnicos, investigaciones y manuales de otro tipo de estructuras. Sin embargo, estas muchas veces no suministran la información necesaria o por el contrario proveen de información irrelevante como es el estrato, daños en acabados, situación financiera y legal del edificio que no articula en el correcto procedimiento de diagnóstico según expone (Aragón, Flores, & López, 2011).

En caso de encontrar una anomalía, el monitoreo general debe convertirse en el punto de partida para una inspección más detallada e instrumentada, evitando así que aumente progresivamente el daño. Durante esta etapa se pretende al menos registrar los siguientes datos (INN, 2009):

- Evaluador.
- Dimensiones generales.
- Fecha.
- Zonificación sísmica.
- Nombre del edificio.
- Tipo de suelo. Terreno y entorno.
- Dirección y propietario.
- Irregularidades en planta.
- Uso del inmueble y número de niveles.
- Irregularidades en elevación u otras.
- Irregularidades.

**5.2.2 Monitoreo especializado.** Esta fase del monitoreo se hace indispensable cuando ya se han encontrado grietas, corrosión o inestabilidad en algún elemento, por ende el uso de instrumentos que suministren datos cuantitativos y más objetivos se hace vital. La metodología usada está íntimamente ligada al tipo de información que se busca.

Existen de manera general dos metodologías en la etapa especializada para la detección de características y propiedades de los materiales: ensayos destructivos y ensayos no destructivos.

Se recomiendan de manera general los ensayos no destructivos y por este motivo se hace un recuento en la Tabla 3 de aquellos métodos que permiten monitorear la salud estructural de un edificio sin afectar las propiedades físicas, químicas y mecánicas.

**Tabla 3.** Comparación de diversas características en métodos de ensayos no destructivos

Método	Aplicaciones	Fiabilidad	Portabilidad equipos	Destreza operario	Dificultad interpretación datos
Velocidad ultrasonido	1,3,4,5	MEDIA	sí	MEDIO	MEDIO
	2	DUDOSA			
Pulso – Eco	1	M/ ALTA	sí	ALTO	ALTO
	4	ALTA			
	6	ALTA			
Impacto – Eco	7	MEDIA			
Radar	1	DUDOSA	sí	ALTO	ALTO
	4	MEDIA			
	6	ALTA			
	7	M/ ALTA			
Termografía de Infrarrojos	1,4	DUDOSA	sí	MEDIO / ALTO	MEDIO
	7	MEDIA			
	8	ALTA			
Emisión acústica	2	DUDOSA	sí	ALTO	ALTO
<sup>(1)</sup> Aplicaciones:					
1. Detección de grietas		4.Presencia de oquedades		7.Localización de armaduras y/o conducciones	
2. Evolución de grietas en el tiempo		5.Propiedades elásticas del hormigón		8.Detección de humedades	
3. Detección de capas de hormigón dañadas		6.Medida de grosores			

**Fuente:** Cañas, 2011.

Los parámetros más utilizados para conocer el estado real de una estructura corresponden al periodo de vibración, razones de amortiguamiento y formas modales u operacionales. Estas variables son analizadas en tres edificios emblemáticos: Cámara Chilena de la Construcción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y, por último, el Edificio Titanium. (Boroschek K, Núñez A, & Larraín V, 2010)

**Tabla 4.** Nombres y características de edificios chilenos instrumentados

Nombre del Edificio	Características
Cámara Chilena de la Construcción (CCHC)	Estructura basada en muros y marcos de hormigón. Cuenta con 20 pisos.
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile	Estructura basada en muros de hormigón. Cuenta con 9 pisos.
Titanium	Estructura basada en muros de hormigón. Cuenta con 56 pisos.

**Fuente:** Elaboración propia.

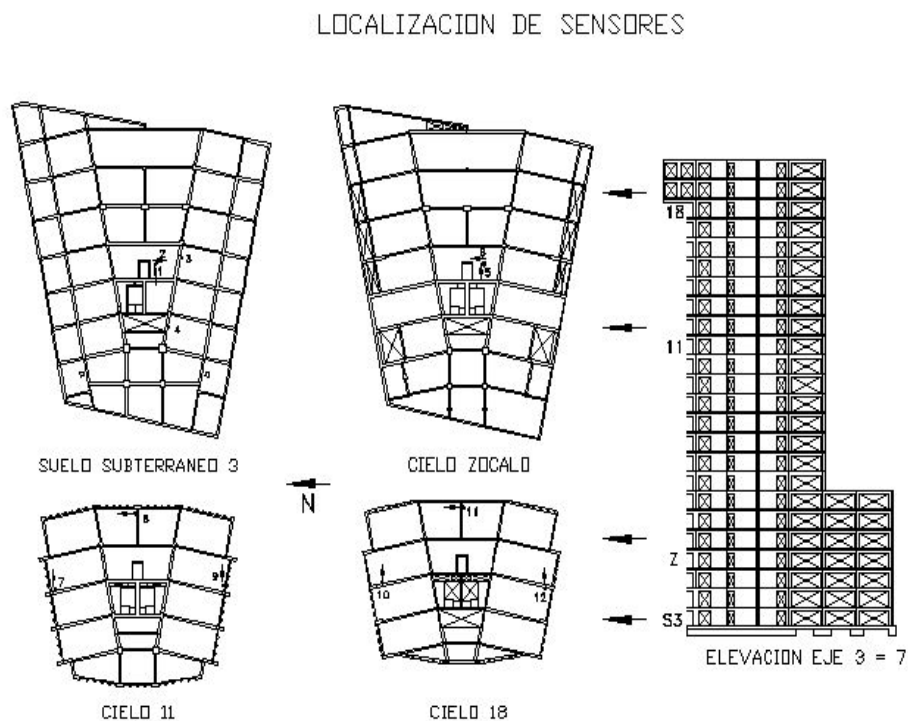
**Figura 5.** Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción



**Fuente:** (Boroschek K, Núñez A, & Larraín V, 2010)

El ejemplo de monitoreo con instrumentación sísmica se realiza con el edificio de la Cámara Chilena de la Construcción que cuenta con un sistema de muros y marcos de hormigón, tiene 20 pisos, 4 subterráneos y una altura de 85,5 metros. Queda ubicado en la comuna de Providencia en Santiago y tiene alrededor de 65 años.

**Figura 6.** Localización de sensores en CHCC



**Fuente:** (Boroschek K, Núñez A, & Larraín V, 2010)

Desde el año 1989 mantiene un sistema de monitoreo sísmico gracias al apoyo de FONDECYT, la Cámara Chilena y la Universidad de Chile. El sistema está compuesto por 12 sensores uniaxiales de aceleración Kinematics FBA-11 conectados a una central de registro, este sistema de obtención de datos permite registrar desde micro-vibraciones ambientales hasta eventos sísmicos de consideración. Los sensores se encuentran distribuidos de tal manera, que se puede obtener el movimiento espacial de la estructura, los desplazamientos, distorsiones del piso, torsión, rotación de muros, entre otros.

### 5.3 INSTRUMENTACIÓN SISMICA EN JAPON

La necesidad de un seguimiento de estructuras en Japón fue influenciado inicialmente por sus condiciones geográficas. Debido a los hechos de que Japón es propenso a los desastres naturales como los terremotos, son algunos de los principales preocupación por la construcción de ingeniería civil y de mantenimiento. (Taylor & Francis, 2006)

Desde 1970 al 2004, la pérdida total de la infraestructura debido a los desastres naturales es de aproximadamente US \$ 165 mil millones o el 15% de las pérdidas de infraestructura totales del mundo causados por desastres naturales.

El nacimiento de la sismología en Japón dio origen en el año de 1880; el establecimiento de la ciencia moderna en una de las zonas más sísmica del mundo y la idea iniciada por el gobierno japonés de traer expertos extranjeros a Japón, entre ellos profesores bien entrenados en los métodos más modernos de la física y la ingeniería. De éstos, los más importantes para la sismología fue John Milne, quien llegó a Japón en 1876 para ser profesor en el Colegio Imperial de Ingeniería de Tokio. Hizo de la sismología su principal interés después del terremoto del 22 de febrero de 1880, que también llevó a la fundación de la Sociedad Sismológica de Japón, la cual financio la elaboración de sismógrafos mejorados para detectar y medir terremotos, con Milne como su líder eficaz, de la mano con James Alfred Ewing y Thomas Gray, todos científicos británicos. (Agnew, 2002)

Los tres hombres trabajaron en equipo para realizar mejoras a los sismógrafos, un aparato que había sido inventado en 1842 por el físico James David Forbes. A John Milne generalmente se le acredita el diseño del sismógrafo de péndulo horizontal, realizado en 1880. Su fundación marcó el inicio de un período de rápido crecimiento de la sismología en Japón. Casi dos décadas

después, Milne había de ser en gran parte responsable de que los sismógrafos similares creados en las estaciones de todo el mundo, con el fin de recopilar datos que podrían ser evaluados en un observatorio central. Las propias investigaciones de Milne eran bastante más observacional que teórico. Aunque Milne ideó varios instrumentos importantes, su importancia principal de este documento es en el uso que se le puso a sus dos propios y otros instrumentos. (ABOUT.COM)

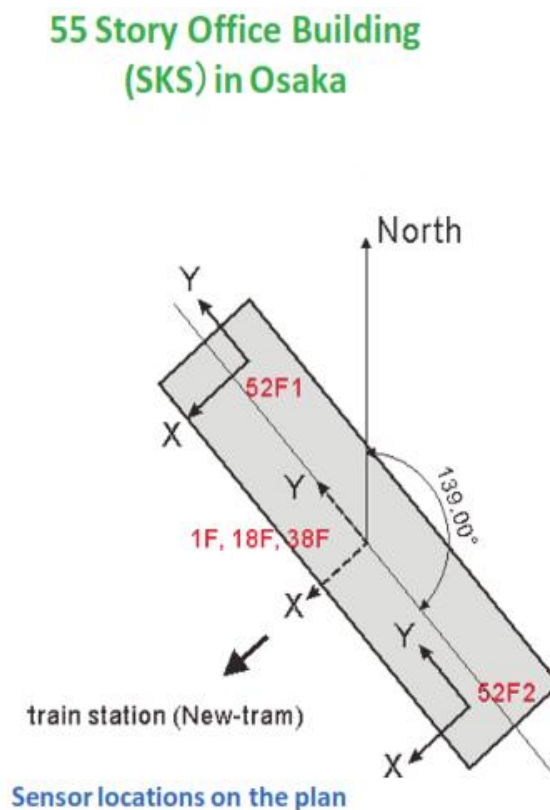
Los principales avances en la instrumentación vinieron de dos físicos que se habían vuelto a la sismología. El primero fue E. Wiechert, quien (después de un estudio de los instrumentos italianos) presentó en 1904 su sensor de péndulo invertido, el primer sismómetro para estar debidamente amortiguada. El segundo era BB Golicyn (Galitzin), que a partir de 1906, aplicó sensores electrodinámicos y galvanómetros de grabación fotográficamente para crear instrumentos de alta sensibilidad y precisión. (Agnew, 2002)

La construcción de edificios de hormigón armado en Japón fue promovida por el profesor Toshikata (Riki) Sano (1880-1956) de la Universidad de Tokio después de la investigación de daños en edificios a raíz del terremoto del 1906 San Francisco. Toshikata destacó el buen comportamiento de edificios de hormigón armado contra incendios y también los temblores. La Ley de Derecho y la de Edificios Urbanos fue el primer código de construcción en Japón, se promulgó en 1919 para regular los edificios y planificación de seis grandes ciudades (Tokio, Yokohama, Nagoya, Kyoto, Osaka y Kobe), limitaba la altura de los edificio a 100 metros, hasta 1963 se realiza una revisión de la Ley de Normas de Construcción y se retira la limitación de altura, pero requiere que el diseño y construcción de los edificios de gran altura deberían ser aprobados por el Ministro de la Construcción a causa de su importancia en la sociedad. (OTANI, 2004). Los edificios altos de hormigón armado se realizaron a mediados de 1970 con la demanda de la alta calidad de condominios y edificios de apartamentos en las zonas urbanas. Los

Reglamentos de diseño basados en el rendimiento y la instrumentación sísmica fueron introducidos en la revisión de la Ley de Normas de Construcción 1998.

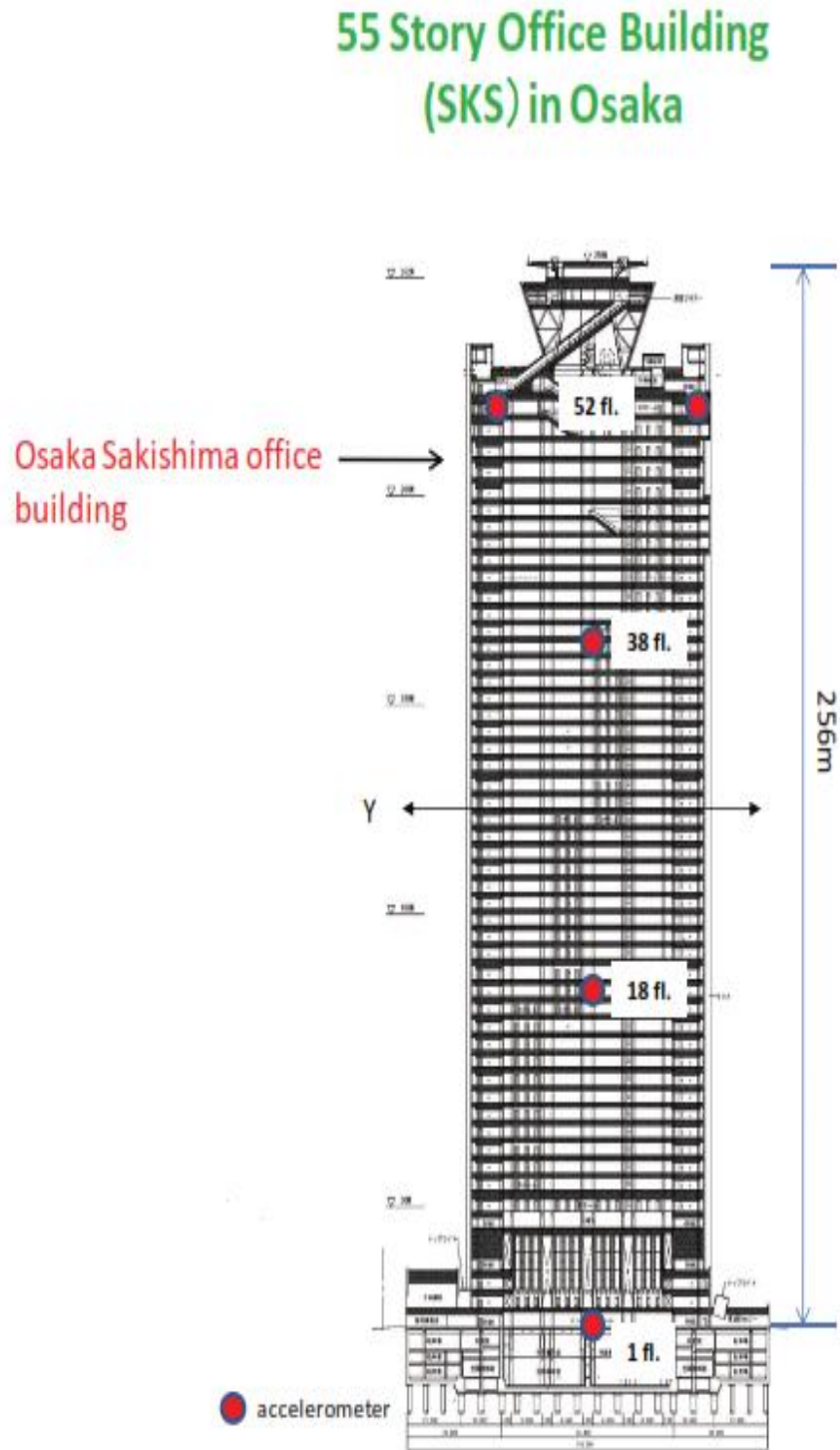
El Instituto de Investigación de Edificio (BRI) de Japón, realiza observación de fuertes movimientos de edificios en las principales ciudades de Japón. Cuando ocurrió el terremoto de la Costa del Pacífico de Tohoku en el 2011 (el terremoto de Gran Oriente de Japón, en lo sucesivo como el terremoto de Tohoku), 54 estaciones de monitoreo de entre un total de 79 edificio situado en Hokkaido a Kansai. Unos 30 edificios experimentaron temblor con intensidad sísmica 5 o mayor en la escala JMA. (La escala sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón)(Okawa, Kashima, Koyama, Iba, & Celebi, 2012)

**Figura 7.** Ubicaciones de los sensores del Edificio de Oficinas (SKS) de Osaka Sakishima



**Fuente:** Okawa et al., 2012.

**Figura 8.** Ubicaciones de los sensores del Edificio de Oficinas (SKS) de Osaka Sakishima



**Fuente:** Okawa et al., 2012.

Los edificios instrumentados incluyen diversos tipos de materiales de construcción de acero o de hormigón armado, alturas (baja, media altura, altos y rascacielos), diseño bajo los estándares de construcción más antiguos o actuales o con nuevas tecnologías, como dispositivos de base-de aislamiento o de control de respuesta. En la actualidad, el inventario de los edificios incluye nueve edificios súper gran altura más alta de 60 metros de altura y seis edificios de base aislada.(Okawa et al., 2012)

Como ejemplo de instrumentación sísmica, tomamos el edificio SKS en Osaka, este edificio fue construido en 1995 en la costa de la bahía de Osaka en la costa de la bahía de Osaka y es el más alto en el oeste de Japón en el momento del terremoto de Tohoku. El edificio tiene 55 pisos con 3 plantas subterráneas, cuenta con cinco acelerómetros tri-axiales están instalados en cuatro niveles (1F, 18F, 38F y 52F). Hay un acelerómetro triaxial en cada una de las dos alas en el suelo 52F como se muestra en las Figuras 7 y 8.(Okawa et al., 2012)

#### **5.4 INSTRUMENTACIÓN SISMICA EEUU**

Inicialmente no existían códigos sísmicos en la mayoría de partes del mundo, fue durante la primera mitad del siglo XX que hubo un aumento en la frecuencia de eventos sísmicos llevando a la comunidad de Ingeniería Civil a implementar fuerzas laterales en los edificios con el objetivo de contrarrestar la oportunidad de colapso. (Fierro & Bertero, 2010).

Desde el año 1900, el sistema de las normas de construcción en los Estados Unidos se basa en códigos modelos de tres regiones como muestra la Tabla 5. Estos códigos no tenían el fundamento suficiente para englobar todos los estados y en su mayoría no estaban supervisados por alguna entidad o grupo de personas ni establecidos en un código como los de ahora (International Building Code).

**Tabla 5.** Códigos modelos en las tres regiones

Región de E.U.	Nombre del Código
Coste Este y todo el Medio Oeste	Código de construcción internacional de funcionarios administrativos (BOCA)
Sur Este	Edificio sur del congreso –código internacional (SBCCI)
Costa Oeste y	Conferencia internacional de oficiales de construcción (ICBO)

**Fuente:** (International Building Code)

**Tabla 6.** Listado de códigos hechos por la UBC

UBC 1927	UBC 1935	UBC 1937	UBC 1940	UBC 1943	UBC 1946
UBC 1949	UBC 1952	UBC 1955	UBC 1958	UBC 1961	UBC 1964
UBC 1967	UBC 1970	UBC 1973	UBC 1976	UBC 1979	UBC 1982
UBC 1985	UBC 1988	UBC 1991	UBC 1994	UBC 1997	IBC 2000
IBC 2003					

**Fuente:** (Fierro & Bertero, 2010)

En U.S.A., se comienzan a publicar códigos sísmicos para 1927 cortesía del *Uniform Building Code* o (UBC) por sus siglas en inglés. El UBC fue originalmente un código de construcción utilizado principalmente en el oeste de U.S.A que tenía la intención de proveer la seguridad pública y los requisitos normalizados para una construcción segura que no variara de ciudad a ciudad como se hacía antes de los

terremotos ocurridos en 1926 y 1927. El UBC fue reemplazado en el 2000 por el Código Internacional de Construcción (IBC) por sus siglas en inglés. Este nuevo código ha sido adoptado por la mayoría de estados excepto Chicago que aún sigue utilizando el Código Municipal de Chicago.

Estados Unidos ha sido afectado por varios sismos en su historia, sin incluir a Canadá, el sismo más devastador fue el 18 de Abril de 1906 en San Francisco, tuvo una magnitud de 7,8 en la escala de Richter. Por razones políticas y económicas el gobierno camufla el sismo en un gran incendio para evitar que la gente evite ir a San Francisco y desconozca la falta de códigos sísmicos para ese entonces. La Tabla 3 muestra algunos sismos ocurridos en E.U.

**Tabla 7.** Listado de los mayores sismos ocurridos en E.U.

<b>Fecha</b>	<b>Magnitud en escala Richter</b>	<b>Ubicación</b>
1904	7.3	Alaska
1906	7.8	San Francisco
1922	7.3	California
1923	7.2	California
1932	7.2	Nevada
1938	8.2	Alaska
1957	9.1	Alaska
1964	9.2	Alaska
1980	7.2	California
1986	8	Alaska

**Fuente:** (Terremotos del siglo XX)

En Estados Unidos, los dos mayores programas de instrumentación estructurales son manejados y operados por el Programa de California Sísmica Instrumentación (CSMIP) del Servicio Geológico de California y el ANSS (USGS.gov)

Hasta hace poco, estos programas se han dirigido a facilitar los estudios de respuesta a fin de mejorar nuestra comprensión del comportamiento y potencial de daño a las estructuras bajo las cargas dinámicas de los terremotos. El objetivo principal ha sido la medición cuantitativa de la respuesta estructural a los movimientos de tierra fuerte y posiblemente perjudiciales a los efectos de mejorar los códigos de diseño sísmico y las prácticas de construcción. Sin embargo, hasta la fecha, no ha sido un objetivo de cualquier programa de instrumentación para crear un ambiente de vigilancia de la salud de las estructuras. (Çelebi, 2009)

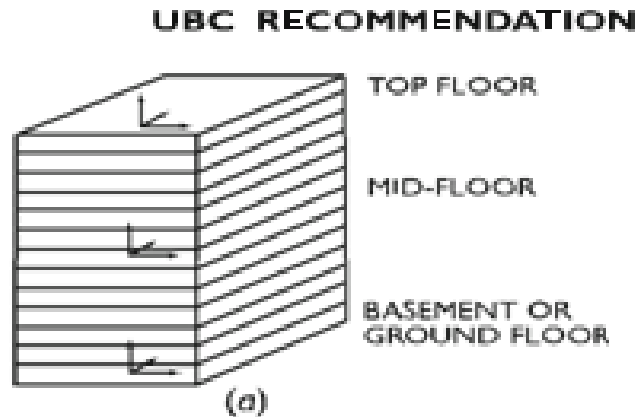
El código más utilizado en los Estados Unidos, el Código de Construcción Uniforme (UBC- 1997 y ediciones anteriores), recomienda, para zonas sísmicas 3 y 4, un mínimo de tres acelerógrafos ser colocado en todos los edificios de más de seis pisos con una superficie construida total de 60.000 metros cuadrados o más, y en todos los edificios de más de diez pisos, independientemente de la superficie (Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, 1997). El propósito de este requisito de la UBC era monitorear en lugar de analizar la completa cantidad de modos y características de respuesta. El código UBC de instrumentación recomendada se ilustra en la Figura 1. Después de 1971 terremoto de San Fernando, en 1982, en Los Angeles, el requisito del código se redujo a un acelerómetro triaxial en el techo (o piso) de un edificio de reunión y con los requisitos de tamaño antes mencionados.

En general, el código de instrumentación se enfatiza en el fuerte deseo de la comunidad de ingeniería estructural en reunir más datos de estructuras instrumentadas para realizar estudios de respuesta estructurales más detallados de forma natural.

Las experiencias de terremotos pasados muestran que los lineamientos mínimos establecidos por la UBC para tres acelerógrafos triaxial en un edificio no son suficientes para llevar a cabo las verificaciones modelo significativas. Por ejemplo,

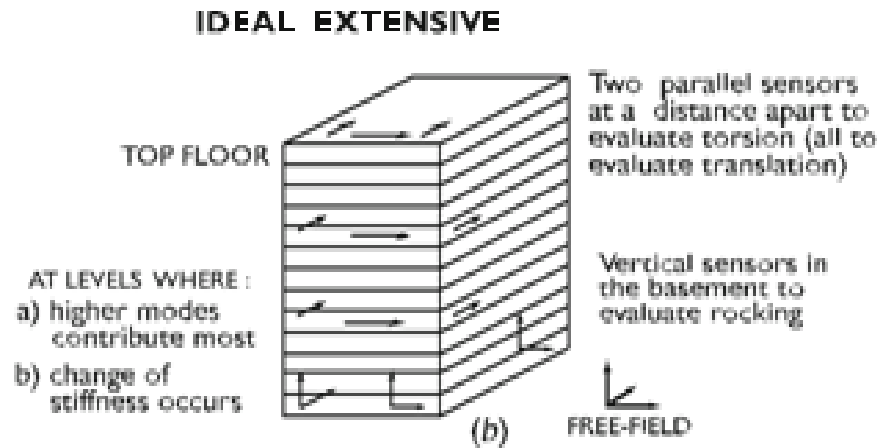
se requieren tres acelerómetros horizontales para definir los movimientos horizontales de un piso (dos de traslaciones ortogonales y una torsión).

**Figura 9.** (a) Ubicación de instrumentos sísmicos recomendada por UBC



**Fuente:** (Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, 1997)

**Figura 10.** b) Modelo ideal extensivo



**Fuente:** (Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, 1997)

El Programa de Instrumentación de Movimiento Fuerte de California o conocido por sus siglas en inglés (CSMIP) es la entidad encargada de instrumentación sísmica en California que para 2004 contaba con 180 edificios instrumentados y alrededor de 80 más para una instrumentación futura (Naeim, Lee, Bhatia, Hagie, & Skliros, 2004)

Esta entidad provee eventualmente toda la información respecto a la instrumentación de los edificios a toda la comunidad de ingeniería estructural. Este programa cumple con la función de la visualización de la respuesta dinámica, las instalaciones de los instrumentos sísmicos en los edificios y la descarga de datos a la red sísmica integrada de California (CISN) (CISN.org). En Tabla 1 se muestra una serie de edificios con monitoreo instrumentado realizado por el CSMIP.

**Tabla 8.** Nombre de los edificios y características

Nombre del edificio	Características
Edificio Tipo	Marcos de acero con 22 pisos
Edificio Tipo	Estructura de acero con 39 pisos
Edificio ING	Estructura de acero con 9 pisos
Edificio RC (VN7SH)	Concreto Reforzado con 7 pisos
Los Angeles	Concreto Reforzado con 54 pisos

**Fuente:** (Naeim, Lee, Bhatia, Hagie, & Skliros, 2004) (Porter, y otros, 2004)

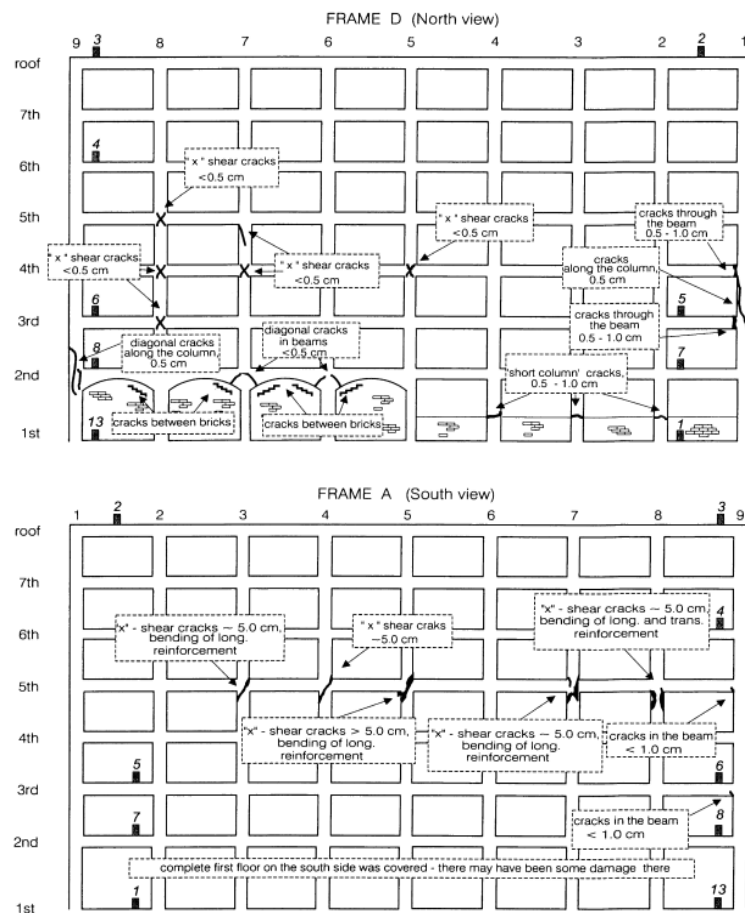
**Figura 11.** Edificios instrumentados sísmicamente por CISN. Edificio VN7SH de 7 pisos



**Fuente:** (Naeim, Lee, Bhatia, Hagie, & Skliros, 2004)

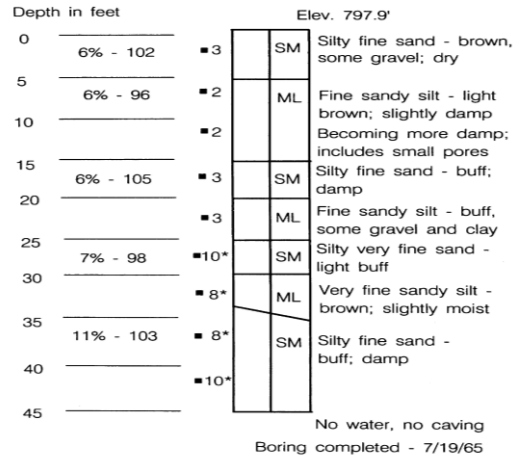
Para el ejemplo de monitoreo con instrumentación sísmica se elige el edificio (VN7SH) que está ubicado en la ciudad de Van Nuys en la zona metropolitana de Los Ángeles, fue diseñado en 1965 y construido en 1966 y sirvió como hotel durante el sismo de 1994. El edificio es de 7 pisos, cuenta con una altura de 65 ft (alrededor de 20 metros) y es de concreto reforzado. El sistema está compuesto por cuatro guardabosques SS-1 y dos sismómetros Ranger (sensores de aceleración Kimetrics). Los sensores son ubicados en el terreno y a lo largo de algunas columnas en altura en tres dimensiones: longitudinal, transversal y vertical.

**Figura 12.** Diferentes vistas del VN7SH. (a) y (b) Vista frontal que muestra las grietas y daños presentes en el edificio y la ubicación de 13 sensores



**Fuente:** (Ivanovic, Trifunac, Novikova, Gladkov, & Todorovska, 2000) (Todorovska, Ivanovic, & Trifunac, 2001)

**Figura 13.** Izq. Sección transversal típica del Suelo perforado para la construcción

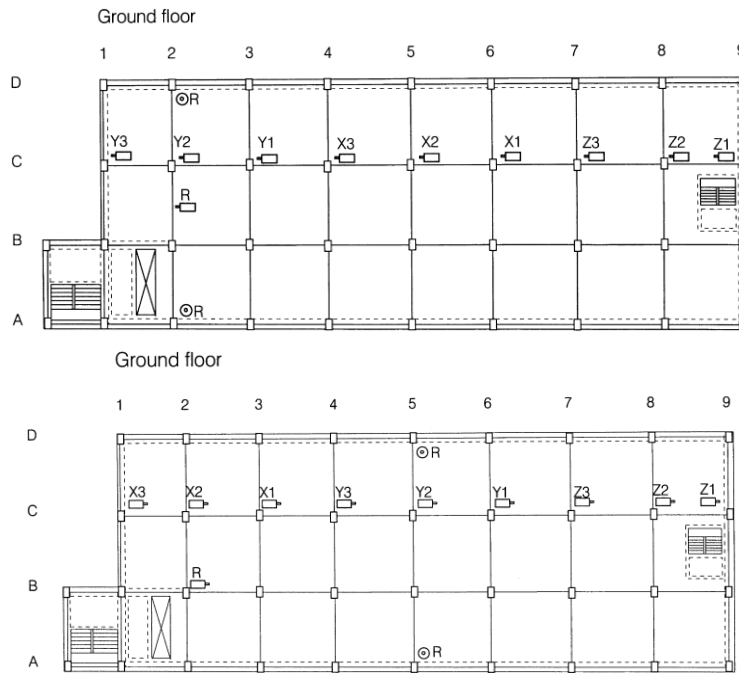


LEGEND :

- A Field moisture expressed as a percentage of the dry weight soil.
  - B Dry density expressed in pounds per cubic foot.
  - C Blows per foot of penetration using a 2000 pound hammer dropping 12"
  - \* - a 1200 pound hammer was used.
- d) ■ Depth at which undisturbed sample was extracted

**Fuente:** (Ivanovic, Trifunac, Novikova, Gladkov, & Todorovska, 2000); (Todorovska, Ivanovic, & Trifunac, 2001)

**Figura 14.** Posicionamiento de los sensores antes y durante el sismo de 199



**Fuente:** (Ivanovic, Trifunac, Novikova, Gladkov, & Todorovska, 2000); (Todorovska, Ivanovic, & Trifunac, 2001)

## 5.5. INSTRUMENTACIÓN SISMICA EN COLOMBIA

A lo largo de la historia han ocurrido grandes terremotos que causaron efectos secundarios como tsunamis, deslizamientos, erupciones volcánicas, avalanchas, además de catastróficas pérdidas humanas, el primer evento sísmico en el país, del cual se tiene registro escrito ocurrió en 1541, se cree que el terremoto más destructivo que se ha presenciado en Colombia fue el de 1827 que alcanzo magnitudes de 9 grados en la escala de Richter. El terremoto de Armenia en 1999 considerado como el más mortífero en la historia de Colombia causando así más de 2000 muertes y el terremoto de Ecuador y Colombia en 1906 el 31 de enero de magnitud 8.8, ha sido el más fuerte durante el siglo XX provoco un tsunami que mato por lo menos a 500 en la costa de Colombia.

Las experiencias de los desastres que se vivieron en el país fue la principal motivación para desarrollar una forma de mitigar el impacto de estos fenómenos, a raíz del terremoto de Popayán el 31 de Marzo de 1983 y con los registro de eventos sísmicos más recientes se da origen a la creación del primer Código Colombiano de Construcción Sismo resistente (expedida por el Gobierno Nacional por medio del Decreto 1400 del 7 de junio de 1984)

Con el paso del tiempo esta norma demostró tener muchas falencias y se consideró conveniente ser actualizada teniendo en cuenta las nuevas tendencias de la ciencia y técnicas de cálculo para la evaluación de amenazas sísmicas, así como la existencia de mayor evidencia de registros sísmicos y necesidades de nuevos diseños de infraestructuras; esto ayudó a optar por nuevos esquemas de seguridad.

Es así que desde 1992 grupos de investigaciones, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, y la participación de un amplio grupo de profesionales de la ingeniería, arquitectura, y funcionarios del estado relacionados con la

construcción vinieron trabajando en la actualización de las Normas Sismo Resistente cuyo resultado fue el reglamento NSR-98 expedida por medio del Decreto 33 de 9 de enero de 1998, y más adelante una segunda actualización del reglamento NSR-10 expedida por el Decreto 926 del 19 de marzo de 2010.

Estas normas presentan requisitos mínimos de diseño que garantizan el cumplimiento primordial de salvaguardar las vidas humanas ante la ocurrencia de un sismo fuerte además de la protección de la propiedad teniendo en cuenta que la mayoría de la población Colombiana casi un 87% se encuentra viviendo en zonas de amenazas sísmica alta o intermedia.

La NSR-10 incluye un capítulo que está basado en la instrumentación necesaria para el registro de los datos sísmicos los cuales deben ser obligatorios para ciertos tipos de edificaciones. En el título A capítulo 11 se indican cuando deben colocarse estos instrumentos sísmicos, en donde deben localizarse y quien corre con los costos de los instrumentos para edificaciones.

INGEOMINAS es la entidad gubernamental encargada de aprobar los tipos de instrumentos que se deben colocar en las edificaciones y de todos los requisitos mínimos impuestos por este capítulo. (NSR-10, 2010)

Además de esto, encontramos recomendaciones para la localización de los equipos de instrumentación, el cual está basado en el criterio y conocimiento del ingeniero que realice el diseño estructural del proyecto.

### **5.5.1 Criterios para instrumentar un edificio según la NSR-10.**

**5.5.1.1 Localización.** Para determinar la localización de los equipos de instrumentación sísmica en una edificación, debe ser basado en el criterio y conocimiento del ingeniero que realice en diseño estructural del proyecto teniendo

en cuenta los requisitos y parámetros que se encuentran estipulados en la NSR-10, título A, capítulo 11.

Para la instrumentación en altura, se dispone un mínimo de tres instrumentos sísmicos en la edificación, de tal manera que exista al menos uno en su base, uno aproximadamente a media altura de la edificación y uno a nivel superior. En este caso el instrumento colocado en la base debe tener tres sensores triaxiales con dos componentes horizontales ortogonales y una componente vertical y los otros dos instrumentos pueden tener solo dos sensores horizontales ortogonales. En todas las edificaciones donde se coloquen instrumentos sísmicos, se deben realizar un estudio geotécnico cuyo alcance permita definir las propiedades dinámicas del suelo en el sitio.

Además, el espacio donde se debe colocar el instrumento debe tener al menos un área de dos metros cuadrados con una dimensión mínima en planta de un metro y una altura libre mínima de dos metros, debe estar alejado de las zonas de alta circulación y de maquinarias y equipos que introduzca vibraciones. (NSR-10, título A, capítulo 11)

**5.5.1.2 Colocación de instrumentos sísmicos.** La colocación de estos instrumentos sísmicos depende de la zona de amenaza sísmica en donde se encuentre ubicada la edificación, además del área construida y la cantidad de pisos que tenga.

Según la NSR-10, título A, capítulo 11; dependiendo de la zona sísmica y el área construida donde se encuentre la edificación, se establece la cantidad de sensores que requiere para instrumentar.

**Tabla 9.** Colocación de instrumentos según la NSR-10 zona sísmica alta

<b>ZONA DE AMENAZA SISMICA ALTA</b>			
<b>N° de Pisos</b>	<b>Área Construida</b>	<b>N° Instrumentos</b>	<b>Ubicación</b>
3 y 10	> 20.000 m <sup>2</sup>	1	Inferior
11 y 20	> 20.000 m <sup>2</sup>	2	Inferior y cubierta
más de 21		3	Inferior, intermedio, cubierta

**Fuente:**

Si se encuentra ubicado en una zona de amenaza sísmica intermedia:

**Tabla 10.** Colocación de instrumentos según la NSR-10 zona sísmica intermedia

<b>ZONA DE AMENAZA SISMICA INTERMEDIA</b>			
<b>N° de Pisos</b>	<b>Área Construida</b>	<b>N° Instrumentos</b>	<b>Ubicación</b>
5 y 15	> 30.000 m <sup>2</sup>	1	Inferior
16 y 25	> 30.000 m <sup>2</sup>	2	Inferior y cubierta
más de 25		3	Inferior, intermedio, cubierta

**Fuente:** NSR-10, Título A, Capítulo 11.

Si se encuentra ubicado en una zona de amenaza sísmica baja no hay obligación de colocar instrumentos sísmicos.

**5.5.1.3 Costos.** Los costos para la instrumentación de edificaciones difieren dependiendo de ciertos parámetros como mantenimiento, equipos, localización etc. (NSR-10, 2010)

Los equipos de instrumentación pueden ser adquiridos por la persona cuyo nombre se expida en la licencia de construcción de la edificación quien además debe costear su instalación. Independientemente de quien sea el propietario del instrumento, la Red Sismológica Nacional y quien designe la autoridad municipal o distrital donde esté ubicado el edificio debe recibir una copia sin costo alguno de los registros obtenidos por medio de los instrumentos.

Los propietarios de la edificación deben dar libre acceso a los funcionarios de INGEOMINAS o a quienes ellos deleguen, para efectos de instalación, mantenimiento y retiro de los registros del instrumento.

El costo del mantenimiento y de vigilancia de los equipos corre por cuenta del propietario o propietarios de la edificación, la persona que preste el servicio de mantenimiento de equipo, debe estar aprobado por INGEOMINAS, este mantenimiento se debe realizar con una periodicidad no mayor a un año. Además deben adquirir una póliza de seguro la cual debe cubrir el costo de la reposición del instrumento en caso hurto, substracción u otra eventualidad.

**5.5.1.4 Colocación de instrumentos sísmicos.** La colocación de estos instrumentos sísmicos depende de la zona de amenaza sísmica en donde se encuentre ubicada la edificación, además del área construida y la cantidad de pisos que tenga.

Según la NSR-10, título A, capítulo 11; dependiendo de la zona sísmica y el área construida donde se encuentre la edificación, se establece la cantidad de sensores que requiere para instrumentar.

## 6. PROPUESTA CASO DE APLICACIÓN

La propuesta de instrumentación sísmica se hace en la ciudad de Bucaramanga con un edificio tipo que cuenta con las siguientes características:

**Tabla 11.** Características generales del edificio tipo

<b>Nombre del inmueble</b>	Edificio tipo
<b>Ubicación</b>	Bucaramanga
<b>Número de pisos</b>	18
<b>Altura estimada(m)</b>	62.55
<b>Número de sótanos</b>	3
<b>Material</b>	Concreto reforzado
<b>Año de construcción</b>	Marzo 2007

**Fuente:**

**Figura 15.** Diferentes enfoques del edificio tipo



**Fuente:** Empresa constructora del edificio tipo.

## 6.1. CRITERIO NORMATIVO PARA INSTRUMENTAR UN EDIFICIO TIPO SEGÚN LA NSR-10

**Tabla 12.** Criterios normativos relevantes en el edificio tipo

<b>Tipo de perfil de suelo</b>	S2
<b>Grupo de uso</b>	Grupo I- Estructuras de ocupación normal
<b>Aa</b>	0.25
<b>Av</b>	0.25
<b>Zona de amenaza sísmica</b>	Alta
<b>Sistema estructural</b>	Combinado
<b>Método de análisis</b>	
<b>Disipación de energía</b>	
<b>Tipo de cimentación</b>	Zapatas centradas

Fuente: NSR-10

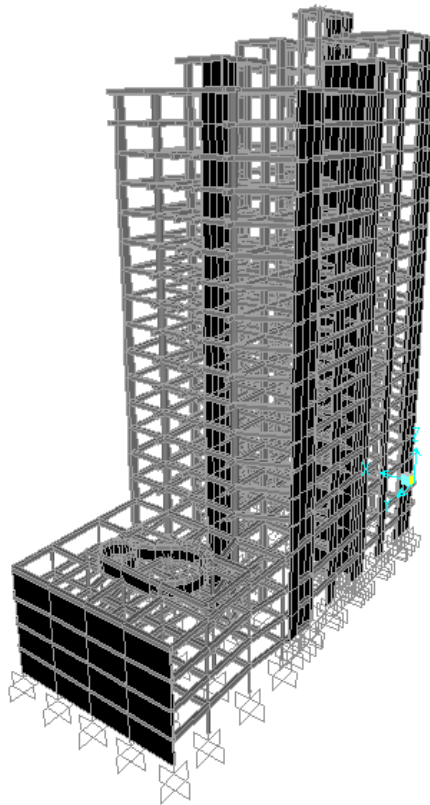
Siguiendo con los requisitos establecidos por la NSR-10, Capítulo A.11, inciso A.11.2.1 b) toda edificación con un área superior a 20.000m<sup>2</sup> que tenga entre 11 y 20 pisos debe contar mínimo con 2 acelerógrafos digitales de movimiento fuerte. Uno de estos debe ser triaxial y ubicado en la base, el otro puede ser biaxial y ubicado en la cubierta.

Para fines de diseño, la NSR-10 en su capítulo A.2.7 exige un mínimo de 3 distintos acelerogramas, pero en caso de usar más, los resultados deberán promediarse. Para nuestra propuesta se inicia planteando 2 acelerógrafos tal cual como lo recomienda la norma, sin embargo, basándonos en la respuesta dinámica obtenida por un análisis modal, se ratificar o amplía el número de acelerógrafos.

**6.1.1 Propuesta alternativa de instrumentación para el edificio tipo.** La propuesta de instrumentación aquí presentada, pretende, además de cumplir con

los mínimos requisitos establecidos por la norma de la cantidad de instrumentos sísmicos en una edificación, ubicar quipos adicionales que permita obtener una información más precisa en cuanto a la respuesta estructural y la transmisión de la onda en la altura del edificio.

**Figura 16.** Diferentes enfoques del edificio tipo



**Fuente:** Enfoque del edificios desde el software.

Procedemos a realizar un análisis dinámico de la estructura en el programa SAP 2000 para la obtención de los modos de vibración, lo que nos permite determinar el comportamiento de la edificación y poder estipular la cantidad de instrumentos sísmicos que se deben implementar y su localización. A continuación se muestran los 10 primeros modos de vibración de la estructura:

**Tabla 13.** Modos de vibración de la estructura

TABLE: Modal Periods And Frequencies					
StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
Mode	1	2.589191	0.38622	2.4267	5.8889
Mode	2	2.230066	0.44842	2.8175	7.9382
Mode	3	1.851545	0.54009	3.3935	11.516
Mode	4	0.722148	1.3848	8.7007	75.702
Mode	5	0.606761	1.6481	10.355	107.23
Mode	6	0.519774	1.9239	12.088	146.13
Mode	7	0.351224	2.8472	17.889	320.03
Mode	8	0.292004	3.4246	21.517	463
Mode	9	0.253036	3.952	24.831	616.59
Mode	10	0.251137	3.9819	25.019	625.95
Mode	11	0.238009	4.2015	26.399	696.91
Mode	12	0.226908	4.4071	27.69	766.76
Mode	13	0.216934	4.6097	28.964	838.89
Mode	14	0.214663	4.6585	29.27	856.74
Mode	15	0.212978	4.6953	29.502	870.34
Mode	16	0.211153	4.7359	29.757	885.45
Mode	17	0.210712	4.7458	29.819	889.16
Mode	18	0.209134	4.7816	30.044	902.63
Mode	19	0.205963	4.8552	30.506	930.64
Mode	20	0.201412	4.965	31.196	973.17

**Fuente:** Software especial en estructuras.

El uso de un tercer acelerógrafo o más, se hace necesario, debido a que la mayoría de los modos de vibración que presenta la estructura son rotacionales. Se ofrece la posibilidad de la instalación de tres acelerógrafos, un triaxial ubicados en la base, 2 biaxiales en la cubierta y dos biaxiales en la parte media de la edificación. Los sensores recomendados por la NSR-10, son los mismos que ofrece INGEOMINAS.

**Tabla 14.** Distintos acelerógrafos en el mercado y cotización verbal con el proveedor Kinematics

<b>Empresa fabricante</b>	<b>Nombre del Acelerógrafo</b>	<b>Costo</b>
EQMet	iDAS-TSA	+/- 100 millones
EQMet	TSA-SMA	+/- 22millones c/u

**Fuente:** Cotización verbal con el proveedor Kinematics.

## CONCLUSION Y RECOMEDACIONES

Este documento muestra las bases teóricas y las directrices para la implementación de un sistema de monitoreo con instrumentos sísmicos en edificaciones de Colombia, dando un primer paso hacia la investigación y ejercicio en esta temática.

La información detallada y completa de una edificación, incluyendo parámetros generales y sísmicos, así como la inspección periódica, facilita el diagnóstico, las medidas y el mantenimiento de una edificación, que al hacerse durante todo su ciclo de vida se verá reflejado en evitar costos de daños.

A lo largo de los distintos eventos sísmicos ocurridos en todo el mundo, algunos países han instaurado códigos sísmicos de prevención, mitigación e incluso de restauración post-sismo que pretenden llenar la necesidad del hombre por conservar sus obras y su integridad. Para que este tipo de prácticas tengan una réplica en la mayoría de países se deben tener otra serie de aspectos además de los sísmicos en cuenta, como son: factores políticos, legales, económicos, operativos y técnicos. Todos de la mano de las entidades públicas o privadas relacionadas con la infraestructura.

La inspección tanto general como especializada debe ser realizada por parte de personal especializado y competente con ayudas computacionales para un rápido y completo estudio. Se recomienda la implementación de una base de datos estructurales de libre y fácil acceso para cualquier entidad con el objetivo de incentivar estas prácticas.

Los diferentes países consultados en este trabajo, difieren en cuanto a desarrollo humano con Colombia y esto se ve reflejado en sus normativas. Este documento

pretende replicar las experiencias en monitoreo con instrumentación sísmica de aquellos países que ya estén experimentados en el tema del monitoreo y de aquellos que se asemejen un poco a nuestro desarrollo.

## REFERENCIAS

ABOUT.COM. El Desarrollo del sismógrafo en Japón - Instrumentos Terremoto [Disponible en]: <http://inventors.about.com/library/inventors/blseismograph7.htm>

AGNEW, D. C. (2002). History of seismology. International handbook of earthquake and engineering seismology, 81, 3-11.

ALCANTARA, L.; ALMORA, D.; VELASCO, J.M.; TORRES, M.; VAZQUEZ, R.; AYALA, M.; CATRO, G.; YLIZALITURRI, J.; VAZQUEZ; MACIAS, M.A. Sistema de monitoreo de una red sísmica en un edificio instrumentado en la ciudad de Acapulco. SOMI XVIII Congreso de instrumentación. Universidad Nacional Autónoma de México.

ALDAMA, B.D. (2005). Propuesta para el análisis de información en edificios con instrumentacion sísmica. Universidad Nacional Autónoma de México.

AMBHER INGENIERÍA. Monitoreo de la salud estructural. [Disponible en]: <http://www.ambher.com/monitoreo-de-la-salud-estructural/> [Consultado en]: Septiembre 20 de 2014.

ARAGÓN, J.; FLORES, L.; LÓPEZ, O. (2011). Manual del formato de captura de datos para evaluación estructural. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres Red Nacional de Evaluadores. 100 p.

BOROSCHEK, R.; NUÑEZ, T.; CARREÑO, R.; LARRAIN, A. (2010). Diagnóstico e identificación de daño estructural: Edificios emblemáticos. Revista BIT. (73): 70-74.

CALDERÓN, J. (2007). Actualización de tipologías estructurales usadas en edificios de hormigón armado en Chile. Tesis de Pregrado. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 86 p.

CAÑAS, I; J FUENTES. Métodos de ensayo no destructivos en estructuras de hormigón (Disponible en: <http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20CIVIL%20Y%20PLANEAMIENTO/HE01.htm>. Consultado el 22 de septiembre de 2014)

ÇELEBI, M. (2009). Seismic Monitoring to Assess Performance of Structures in Near-Real Time: Recent Progress. In *Seismic Risk Assessment and Retrofitting* Springer Netherlands. p. 1-24.

CISN.org. California Integrated Seismic Network. [Disponible en]: <http://cism.org/>

DIAZ, A. (2013). Bases para la generación de un sistema de inspección estructural de edificios en Chile. Tesis de Pregrado. Valdivia: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 125 p.

EMOL.COM. Grandes terremotos de Chile. [Disponible en]: <http://www.emol.com/especiales/terremotos/chile.htm> [Consultado en]: Agosto 15 de 2014.

ESCOBAR, J. A. GALIOTE, J. M. (2006). Una aplicación de la instrumentación sísmica de edificios. Universidad Nacional Autónoma de México.

FIERRO, E.; BERTERO, V. (2010). Evolución de los códigos sísmicos y el efecto de estos códigos en el diseño y construcción. Crítica a la ingeniería sísmica moderna. [Disponible en]: <http://www.desastre.org/home/data/pdf/risk/esp/Cronica%20de%20un%20desastre%20anunciado.pdf> [Consultado en]: Octubre 1 de 2014.

FLORES, R. (1999). Ingeniería sísmica en Chile, Conferencia de ingeniería sísmica presentada en la Academia de Ciencias. (Original no consultado, citado por: CALDERON, J. 2007. En: Actualización de tipologías estructurales usadas en edificios de hormigón armado en Chile. Tesis de Pregrado. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 86 p.

IBC (U.S.A). (2000). Código Internacional de Construcción. Norma IBC.

INN (CHILE). (2009). Diseño sísmico de edificios. Norma NCH 433.Of1996 modificada en 2009. 55 p.

IVANOVIĆ, S.S.; TRIFUNAC, M.D.; NOVIKOVA, E.I.; GLADKOV, A.A.; TODOROVSKA, M.I. (2000). Ambient vibration tests of a seven-story reinforced concrete building in Van Nuys, California, damaged by the 1994 Northridge earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(6), 391-411.

MENDOZA, M.A. (2011). Instrumentación para el monitoreo de obras civiles. 148 p.

MOLINA, N. 2012. Diseño de un Sistema de Gestión de Puentes Bajo Enfoque de Priorización de la Inversión. Tesis de Pregrado. Valdivia: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias. 152 p.

MURIA VILA, D. (2007). Experiencias mexicanas sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados.

NAEIM, F.; LEE, H.; BHATIA, H.; HAGIE, S.; SKLIROS, K. (2004). CSMIP Instrumented Building Response Analysis And 3-D Visualization System (CSMIP-3DV). In *Proceedings of the SMIP-2004 Seminar*.

NSR-10. Norma Sismoresistentes Colombiana (2010). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). INGEOMINAS.

OKAWA, I.; KASHIMA, T.; KOYAMA, S.; IIBA, M.; CELEBI, M. (2012). Summary of recorded building responses during the 2011 off the pacific coast of tohoku earthquake with some, 1049–1060.

OTANI, S. (2004). Japanese seismic design of high-rise reinforced concrete buildings- an example of performance-based design code and state of practices, (5010).

PORTER, K.A.; BECK, J.L.; CHING, J.; MITRANI-REISER, J.; MIYAMURA, M.; KUSAKA, A.; HYODO, Y. (2004). Real-time loss estimation for instrumented buildings.

TABORDA, R.; MURIA VILA, D.; MACIAS, M.; ESCOBAR, J.A. (n.d.). Instrumentación de un edificio alto en la ciudad de Acapulco.

TAYLOR & FRANCIS. (2006). Wireless Sensor and Instrument Applications, 235–283.

TODOROVSKA, M.I.; IVANOVIĆ, S.S.; TRIFUNAC, M.D. (2001). Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building: II. Observed wavenumbers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(3), 225-236.

UNIFORM BUILDING CODE, INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS, Whittier, CA, 1970, 1976, 1979, 1982, 1985, 1988, 1991, 1994, 1997 editions.

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA (2009-2013). El código sísmico y la instrumentación de edificios. [Disponible en]: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=663>

USGS.gov. An assessment of seismic monitoring in the United States – requirement for an advanced national seismic system (1999) U.S. Geological survey, Circular 1188. [Disponible en]: <http://earthquake.usgs.gov/monitoring/anss/documents.php> [Consultado en]: Octubre 1 de 2014.

ZEEVAERT, L. (1960), "Base Shear in tall Buildings During Earthquake July 28, 1957 in Mexico City", *Proc. II World Conference Earthquake Engineering*, Tokio, Japón, Julio.

ZEEVAERT, L. (1963). "Mediciones y cálculos sísmicos durante los temblores registrados en la ciudad de México en mayo de 1962", *Boletín de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*.