



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“ESTUDIO DE LA CINEMÁTICA DE UNA TORRE  
Y TRES CUERPOS BAJOS A INSTRUMENTAR EN  
LA CD. DE MÉXICO”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**ASAEL MARIANO RAMÍREZ DÍAZ**



**ASESOR: M. I. GERARDO RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ**

**MÉXICO, D.F.**

*Te agradezco, a ti padre, grandeza de hombre, que sin palabras me has enseñado los más importantes valores de vida; que has visto por nosotros, tu familia, en prioridad hasta de tus propios intereses; que has estado siempre ahí, con tu cariño, paciencia, respeto y apoyo, motivaciones importantes en el alcance de mis logros.*

*A ti madre, por tu sacrificio, pocas veces reconocido, en mi crianza y educación. Por tus consejos, advertencias y regaños que me han conducido y encauzado hacia el logro de mis metas. Por estar siempre al lado de nosotros, tus hijos, desviviéndote por nuestro bienestar. Por simplemente dar la vida por tu familia.*

*A ti hermano, por tu compañía y tolerancia. Por tu trascendente participación en mi formación como ser humano. Por tu preocupación y apoyo siempre brindado. Por todos aquellos momentos que hemos vivido, los cuales me han llenado de gran felicidad.*

*A ti mi amor, porque contigo  
encontré la dicha de amar.  
Porque a través de tu cariño,  
entusiasmo y alegría has logrado  
darle continuidad a mi felicidad.  
Por ser mi fiel proveedora de  
amor y apoyo. Por siempre  
procurar dar lo mejor ti e  
impulsarme incansablemente a  
concluir este trabajo.*

*A ti bebé, por simplemente  
existir.*

*A ustedes, amigos y familiares, así como a todas aquellas personas que de alguna forma han intervenido en mi desarrollo como persona, y que le han dado chispa a mi vida.*

*A todos ustedes, profesores, que han contribuido en mi formación académica, y a quienes debo gran parte de mi conocimiento.*

*Y con gran afecto, a ti, Ing. Gerardo Rodríguez, que gracias a tu apoyo y motivación fue posible el desarrollo y la conclusión de este trabajo*

## ÍNDICE

	<b>Pág</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>OBJETIVOS Y ALCANCE</b> .....	3
<b>CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO</b>	
1.1 Localización.....	4
1.2 Descripción general.....	5
1.3 El suelo.....	7
1.3.1 Estratigrafía.....	7
1.3.2 Hundimiento regional.....	9
1.4 La estructura.....	10
1.5 La cimentación.....	11
1.5.1 Cimentación original.....	11
1.5.2 Intervenciones.....	12
1.6 Movimientos verticales y desplomos.....	14
<b>CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA</b>	
2.1 El método de vibración ambiental.....	19
2.1.1 Antecedentes.....	19
2.1.2 Objetivo.....	20
2.2 Descripción de una prueba de vibración ambiental.....	20
2.2.1 Equipo.....	20
2.2.1.1 Transductores.....	22
2.2.1.2 Filtros.....	24
2.2.1.3 Medios de captura.....	25
2.2.2 Conexión del equipo.....	26
2.2.3 Calibración de los acelerómetros.....	30
2.2.3.1 Calibración estática.....	31
2.2.3.2 Calibración dinámica.....	34
2.2.3.3 Obtención de la constante de calibración de un acelerómetro.....	38
2.2.4 Colocación de sensores.....	39
2.2.5 Acondicionamiento de las señales.....	41
2.2.6 Captura de las señales.....	42
2.2.7 Procesamiento de la información.....	43

## ÍNDICE

---

<b>CAPÍTULO 3 CINEMÁTICA DEL CONJUNTO</b>	
3.1 Pruebas realizadas.....	44
3.2 Propiedades dinámicas de la Torre.....	50
3.2.1 Frecuencias de vibrar.....	50
3.2.2 Formas modales.....	58
3.2.3 Porcentajes de amortiguamiento.....	61
3.3 Propiedades dinámicas de los Cuerpos Bajos.....	62
3.3.1 Frecuencias de vibrar.....	62
3.3.2 Porcentajes de amortiguamiento.....	63
3.4 Efectos de Interacción Suelo-Estructura (ISE).....	64
<b>CAPÍTULO 4 ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL</b>	
4.1 Sistemas GPS.....	66
4.1.1 Generalidades.....	66
4.1.2 Historia.....	66
4.1.3 Principio de funcionamiento.....	68
4.1.4 Uso del GPS como sincronizador de tiempo.....	70
4.1.5 Uso del GPS como sensor de desplazamiento.....	71
4.2 Inclínómetros.....	81
4.2.1 Generalidades.....	81
4.2.2 Equipo.....	82
4.2.3 Tipos de inclinómetros.....	85
4.3 Sensores de fibra óptica.....	86
4.3.1 Generalidades.....	86
4.3.2 Historia.....	87
4.3.3 Características.....	88
4.3.4 Principio de funcionamiento.....	89
4.3.5 Tipos de fibra óptica.....	89
4.3.6 Fibras para propósitos especiales.....	91
4.3.7 Componentes de la fibra óptica.....	91
4.3.8 Ventajas y desventajas.....	93
4.3.9 Algunos usos de la fibra óptica.....	93
4.3.10 Sensores de fibra óptica.....	94
4.4 Instrumentación inalámbrica.....	96
<b>CAPÍTULO 5 PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN FUTURA</b>	
5.1 ¿Por qué instrumentar al Conjunto con un sistema combinado GPS-acelerómetro?.....	98
5.2 Propuesta de instrumentación.....	99
<b>CONCLUSIONES</b> .....	103
<b>REFERENCIAS</b> .....	105

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el conocimiento sobre el comportamiento estructural ha ganado bastante terreno, sin embargo, este logro no ha sido fácil.

La comprensión del origen y los efectos de los fenómenos naturales de elevado impacto, así como de la respuesta de las estructuras ante estas solicitaciones, ha venido de la mano, a lo largo de la historia, de cuantiosas pérdidas humanas y materiales. Grandes catástrofes, como las suscitadas en México por los sismos de 1957 y 1985, han evidenciado los vacíos del conocimiento humano. No obstante, aunque irónico parezca, el hombre mismo se ha beneficiado de estos sucesos infaustos, pues a través de los estudios posteriores a dichos eventos se ha conseguido nutrir enormemente el conocimiento relativo al comportamiento estructural.

Los actuales reglamentos de diseño y métodos constructivos de nuestro país, son producto de todo el conocimiento ganado a través de los años por medio de estudios experimentales y de investigación. Como es sabido, en la Ciudad de México, debido a las particularidades de su suelo y de su condición tectónica, la mayor parte de estos estudios se han concentrado en el fenómeno sísmico. Por ejemplo, tras el movimiento telúrico de 1985, los estudios relativos a este fenómeno aumentaron considerablemente, lo cual conllevó a entender con mayor claridad la naturaleza y los efectos propiciados por este tipo de fenómeno. A su vez, se comprendió con mayor profundidad la respuesta sísmica de las estructuras mediante la identificación de algunos parámetros dinámicos.

Estos parámetros dinámicos actualmente pueden conseguirse mediante dos métodos: analítico y experimental. El método analítico, por un lado, se basa en modelos matemáticos que representan el comportamiento dinámico de una estructura. Este procedimiento ha adquirido mayor impulso en los últimos años debido a la elevada capacidad de procesamiento de las computadoras, a la disponibilidad de software de análisis estructural, y al desarrollo de nuevos planteamientos teóricos. Sin embargo, para la verificación de los resultados obtenidos a través de esta simulación, los Ingenieros requieren de pruebas experimentales aplicadas sobre modelos a escala, o directamente sobre los prototipos estructurales.

Estas pruebas son realizadas ubicando dispositivos de medición sobre puntos estratégicos de un inmueble en estudio y sobre puntos del terreno aledaño al mismo. Hoy en día, dependiendo del objeto de la medición, de la magnitud de las excitaciones a medir y de las características geométricas y estructurales del inmueble en estudio, se pueden ejecutar distintos tipos de instrumentación: sísmica, de vibración ambiental, de tracción, de vibración forzada, etc.

Una instrumentación o prueba de vibración ambiental, objeto de esta tesis, se sustenta en el registro, procesamiento, análisis e interpretación de señales de un sistema estructural en estudio. Estas microseñales, que permiten definir en forma aproximada la cinemática de una estructura, son producto de excitaciones generadas por la actividad humana, como por ejemplo, aquellas provenientes del funcionamiento de maquinaria industrial, del tráfico de vehículos y de la ocupación misma de los usuarios, o por la incidencia de algunos agentes ambientales como el viento o la marea.

## INTRODUCCIÓN

---

Enunciado lo anterior, en este trabajo se presenta el análisis de los datos recolectados de una prueba de vibración ambiental aplicada sobre un conjunto de edificios, denominado Conjunto Tlatelolco. La instrumentación, comandada a principios de 2006 por el Instituto de Ingeniería, forma parte del estudio sobre la verificación de la seguridad del Conjunto, compromiso que ha adquirido la UNAM al valerse, como donación del Gobierno del Distrito Federal, de los inmuebles que lo conforman y que sirvieron durante años como sede de la Secretaría de Relaciones Exteriores.

Localizado al norte de la Ciudad, este conjunto está conformado por 4 elementos: una torre de 22 niveles de 86.3 m de altura y 3 Cuerpos Bajos de 12 m de elevación. Debido al fenómeno de hundimiento regional que afecta a la Ciudad de México, el Conjunto Tlatelolco, a lo largo de su vida útil, ha presentado diversos problemas estructurales. Actualmente, después de varias intervenciones de rehabilitación, principalmente efectuadas sobre su cimentación, el estado del conjunto es estable, pero con el inconveniente del marcado desplome que padece la Torre.

Finalmente, cabe mencionar que la instrumentación de estructuras civiles alrededor del mundo se ha vuelto una práctica más cotidiana, gracias a la disposición de instrumentos de medición cada vez más sofisticados, a la reducción del costo del equipo utilizado y a los beneficios que día a día se suman a esta práctica, y que hacen que el balance costo-beneficio sea cada vez más equilibrado.

En México, el número de edificios instrumentados se reduce a menos de 30, principalmente localizados sobre la capital. De éstos, el Instituto de Ingeniería se ha encargado de la instrumentación de por lo menos una tercera parte. No obstante, y aunque los estudios foráneos de este tipo resulten provechosos para la comunidad de ingeniería estructural de nuestro país, dadas las particularidades del suelo de la Cd. de México es necesario instrumentar mayor cantidad de estructuras civiles.



## **OBJETIVOS Y ALCANCE**

En este trabajo se determinan, por medio de pruebas experimentales (pruebas de vibración ambiental), las propiedades dinámicas de una Torre y Tres Cuerpos Bajos que yacen sobre el suelo blando de la Cd. de México.

Además, se describen detalladamente las distintas tecnologías hoy disponibles en el mercado para el monitoreo de estructuras civiles, mostrando de cada una de ellas tanto sus beneficios como sus limitantes.

Finalmente se elige la tecnología adecuada para el monitoreo estructural continuo del conjunto de edificios en estudio, y, en función de los recursos disponibles del proyecto, se expone una propuesta estratégica sobre la ubicación que deberán guardar los dispositivos de medición para conseguir toda la información de interés de este proyecto.

## CAPÍTULO 1

### DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

#### 1.1 LOCALIZACIÓN

El Conjunto Tlatelolco se ubica en la Ciudad de México, en el cruce de la Avenida Ricardo Flores Magón y el Eje Lázaro Cárdenas (Fig. 1.1). Este conjunto, a su vez, forma parte del conjunto urbano Nonoalco-Tlatelolco, confinado al norte por la Avenida Manuel González, al oriente por la prolongación del Paseo de la Reforma, al sur por la Calzada Ricardo Flores Magón y al poniente por la Avenida de los Insurgentes Norte. Además, este conjunto es parte integral de una de las plazas más importantes de la ciudad, la Plaza de las Tres Culturas, en la cual se representan arquitectónicamente tres importantes épocas de la historia de nuestro país, prehispánica, colonial y moderna, con grandes pirámides aztecas, un convento y una Torre, edificio principal del Conjunto Tlatelolco.

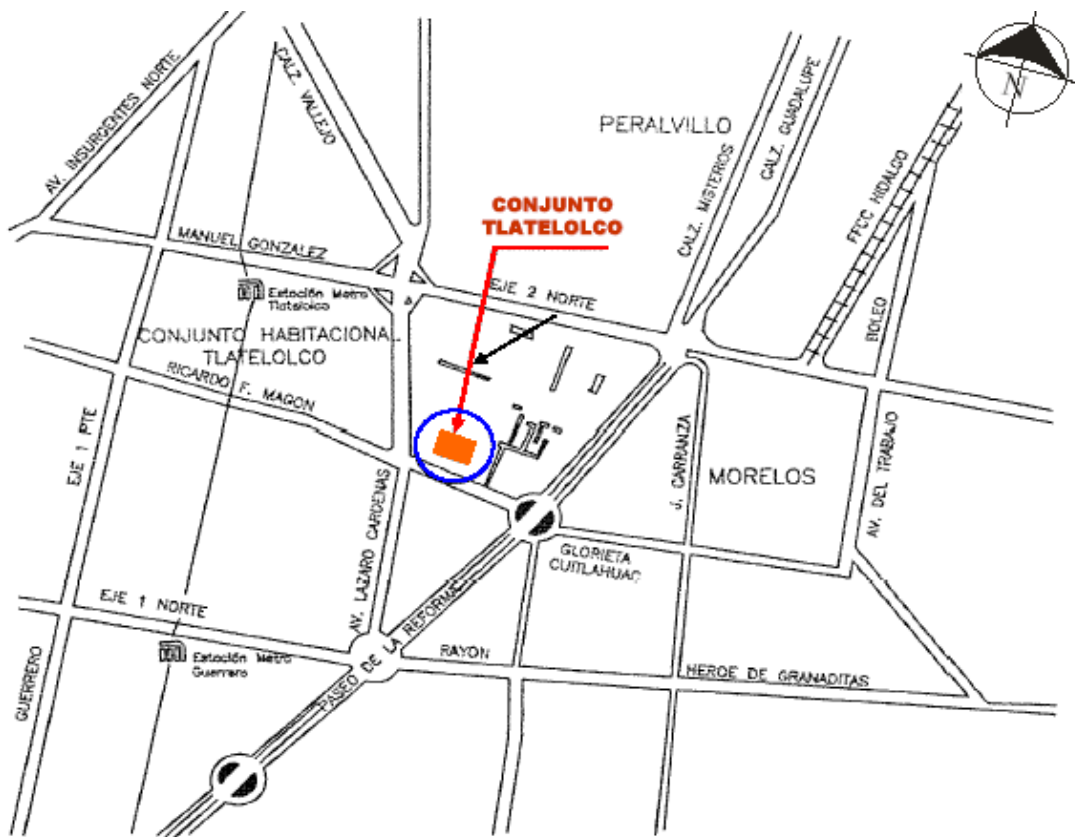


Fig. 1.1 Croquis de localización

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

De acuerdo a la zonificación sísmica señalada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004), el conjunto está contenido dentro de la Zona IIIc o Zona Lacustre (Fig. 1.2), conformada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla.

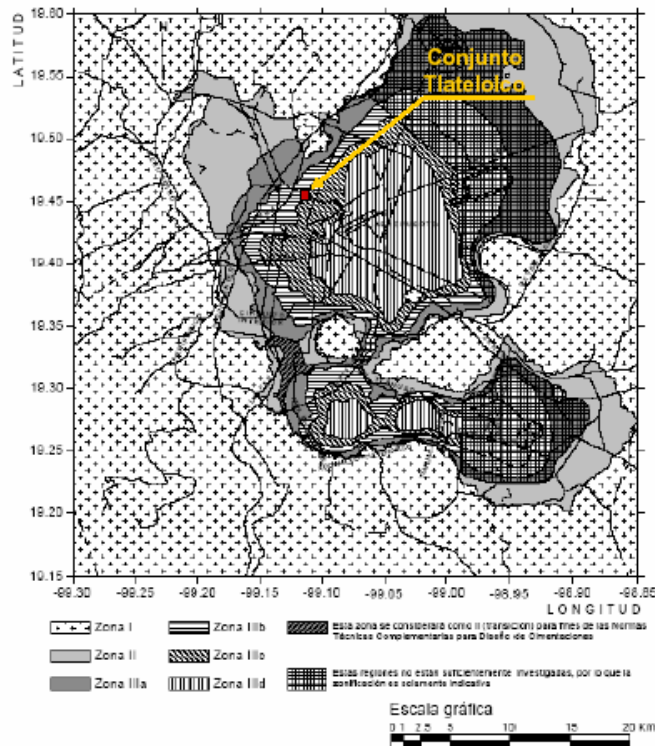


Fig. 1.2 Mapa de zonificación sísmica

## 1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

El Conjunto Tlatelolco yace sobre el sitio que durante la época prehispánica ocupara una fracción del importante mercado de Tlatelolco (Fig. 1.3), centro de intercambio comercial de suma importancia en la economía de la cultura náhuatl.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO



Fig. 1.3 Reconstrucción esquemática México-Tenochtitlán (1325-1519)

A principios de la década de los 60's del siglo pasado, se emprende el gran proyecto para la creación del conjunto urbano Nonoalco-Tlatelolco, que comandado por el renombrado arquitecto mexicano Mario Pani, incluía dentro de sí la construcción del Conjunto Tlatelolco. Para 1966, bajo la supervisión del Arq. Pedro Ramírez Vázquez, la obra del Conjunto Tlatelolco quedaría concluida.

El conjunto está conformado por 4 elementos: una torre (I) y 3 cuerpos bajos (II, III y IV) (Fig. 1.4). La Torre, con dimensiones en planta de 18.35 x 41.87 m, cuenta con 22 niveles, cada uno de ellos con 570 m<sup>2</sup> de superficie útil. Sumados estos niveles, alcanzan una altura total de 86.3 m a partir del nivel de banquetea (N+0.00). Por otro lado, los Cuerpos Bajos, cada uno de dos niveles y con un área total de 8450 m<sup>2</sup>, se erigen hasta una altura de 12 m. Los cuatro elementos incluyen además un sótano compartido de 7 800 m<sup>2</sup>, que se encuentra embebido en el terreno hasta una profundidad de 3.60 m. En él se alojan los servicios y un estacionamiento para 72 vehículos. A este último lo complementa un estacionamiento exterior con una capacidad de 106 vehículos más. El nivel de desplante de la Planta Baja del conjunto es N+0.70.

Durante más de 40 años este conjunto de inmuebles fue destinado a oficinas gubernamentales, sirviendo como sede de la Secretaría de Relaciones Exteriores. Mientras que la Torre daba alojamiento a las oficinas principales de esta Secretaría, en los Cuerpos Bajos se trataban los asuntos consulares y jurídicos, además de dar lugar a salas de recepción y conferencias, así como también a un salón comedor y a una biblioteca. Recientemente, bajo convenio entre la Universidad Nacional Autónoma de México y el Gobierno del Distrito Federal, este Conjunto fue donado a la Máxima Casa de Estudios para convertirse en un centro de desarrollo cultural para los habitantes de la parte norte de la ciudad.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

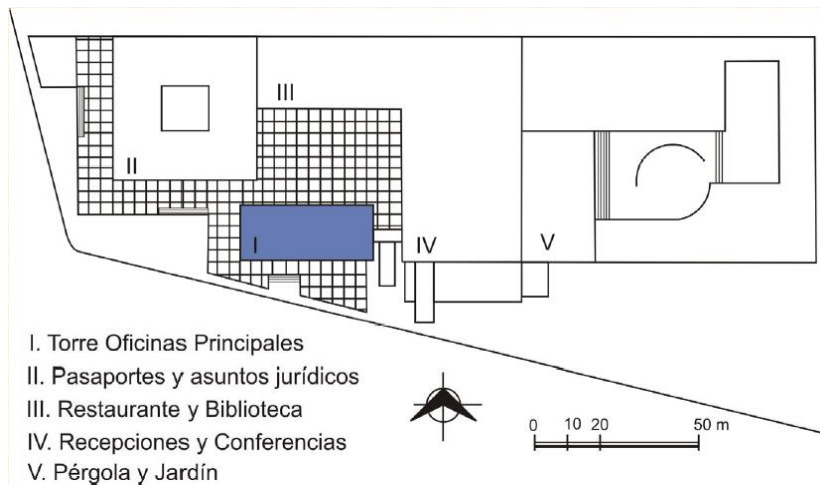


Fig. 1.4 Planta del Conjunto

### 1.3 EL SUELO

#### 1.3.1 Estratigrafía

La estratigrafía del sitio sigue en forma general la configuración siguiente: un estrato de arcilla blanda, altamente compresible, que subyace a una costra endurecida superficial de espesor variable (6 a 10 m), y que descansa hasta una profundidad de 30 m sobre una capa dura, conformada en su mayoría por limo y arena. En este primer bloque de arcilla (serie arcillosa superior) se localizan intersticios rellenos de arena, arcilla de secado y ceniza volcánica de elevada resistencia pero de pobre espesor. Debajo de la capa dura se desprende otro estrato potente de arcilla (serie arcillosa inferior), que, aunque con menor espesor que el primero, conserva casi las mismas propiedades. Éste avanza hasta los 45 m de profundidad para encontrarse finalmente con los depósitos profundos.

A continuación (Fig. 1.5) se presenta una planta del conjunto en estudio con tres secciones a lo largo de las cuales se obtuvieron perfiles estratigráficos. En las figuras inmediatas (Fig. 1.6 – Fig. 1.8) se muestran dichos perfiles.

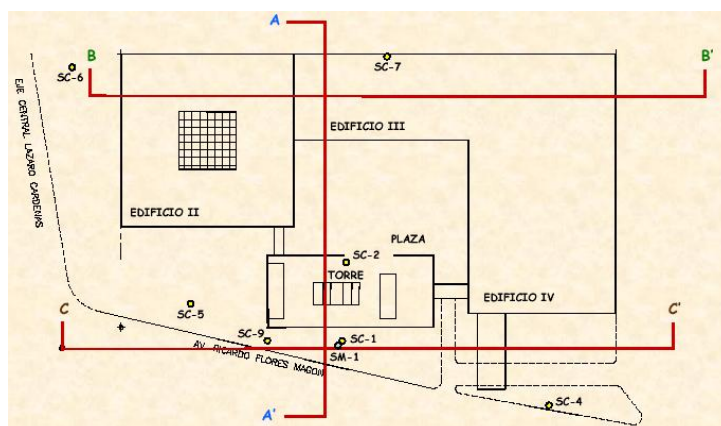


Fig. 1.5 Secciones para perfiles estratigráficos (TGC, 1986)

# 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

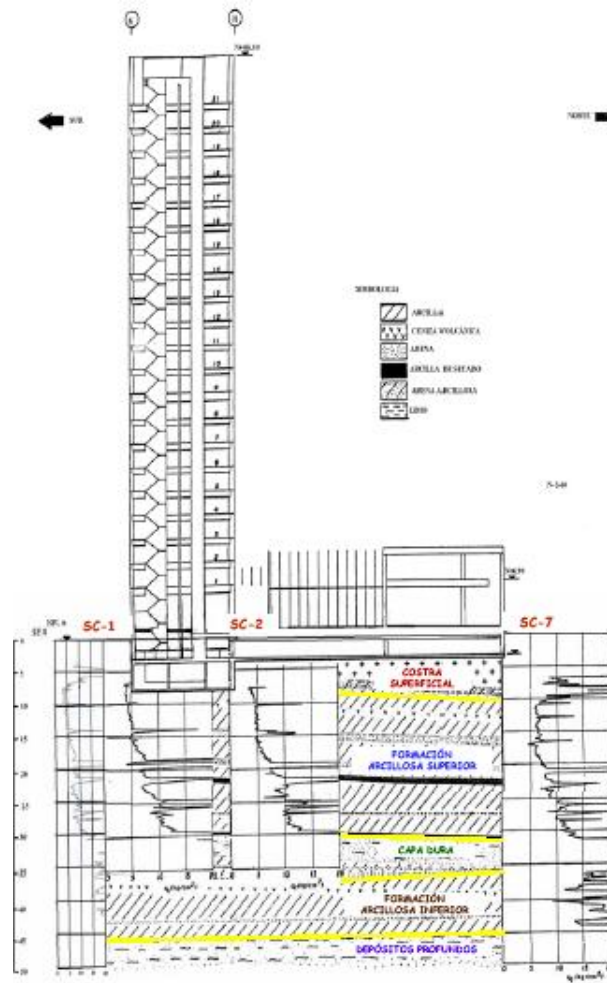


Fig. 1.6 Corte estratigráfico A-A' (TGC, 1986)

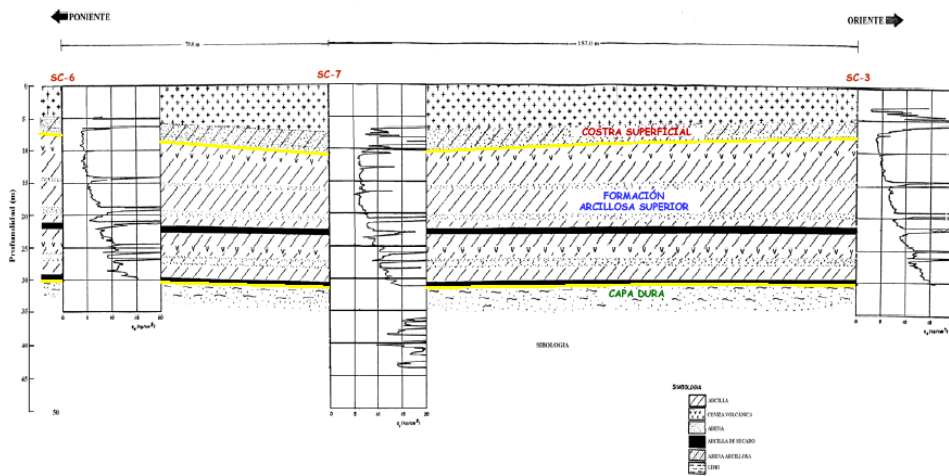


Fig. 1.7 Corte estratigráfico B-B' (TGC, 1986)



## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

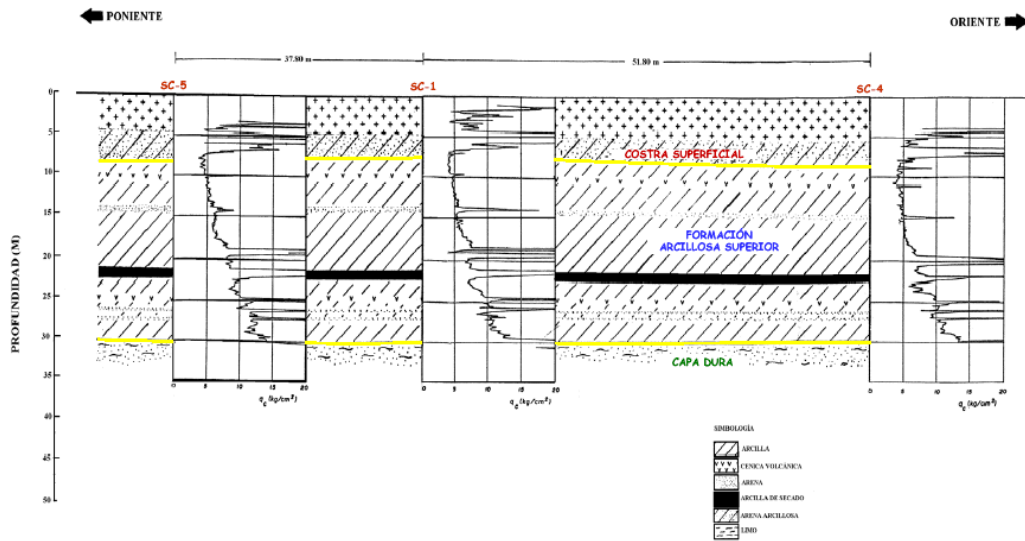


Fig. 1.8 Corte estratigráfico C-C' (TGC, 1986)

Como se puede observar en las tres últimas figuras, las variaciones entre sí de los tres perfiles estratigráficos respecto a la configuración y espesores de los estratos, así como respecto a los espectros del sondeo, resultan minúsculas. Por lo tanto, si así se deseara, cualquiera de estos registros podría considerarse representativo de todo el subsuelo sobre el cual se desplanta el conjunto.

### 1.3.2 Hundimiento Regional

Como es sabido, en la Ciudad de México se padece el grave problema de hundimiento regional debido a la consolidación de las arcillas altamente compresibles del subsuelo. Esta situación de hostilidad para con las estructuras, se ha venido acentuando por efecto de la extracción de agua de los mantos acuíferos del subsuelo para el abastecimiento de agua potable de la ciudad. Coincidentemente, una de las zonas de mayor afectación por este fenómeno es la Zona del Lago, correspondiente al sitio donde se desplanta el Conjunto Tlatelolco.

Según algunos registros de nivelación (Tabla 1a) recogidos del banco de nivel P(N02E01)01, localizado próximo a la esquina sureste de la torre, el hundimiento promedio anual en ese punto, entre el periodo comprendido de 1981 a 2002, fue de 7.6 cm/año.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

EMPRESA QUE NIVELA	FECHA	ELEVACIÓN (m)
A. MADRIGAL	19/01/1981	2232.197
-	01/01/1983	2232.049
CACUSA	26/11/1985	2231.905
IUTSA	01/04/1987	2231.792
EDHIT	22/02/1994	2231.256
IUTSA	10/09/1996	2231.099
S.T.	16/06/1997	2231.044
ORVI	25/09/1998	2230.969
EDHIT	28/09/2000	2230.809
MEF	04/10/2002	2230.606

Tabla 1a Datos de nivelación recogidos del Banco de Nivel P(N02E01)01

### 1.4 LA ESTRUCTURA

La superestructura de la torre se encuentra conformada por columnas ligadas de concreto en las fachadas norte y sur, muros de concreto en las fachadas oriente y poniente, y por núcleos rígidos que alojan las circulaciones verticales y los servicios (Fig. 1.9). Las trabes, que son de acero y de alma abierta, salvan el claro completo de 18 m en el sentido norte-sur.

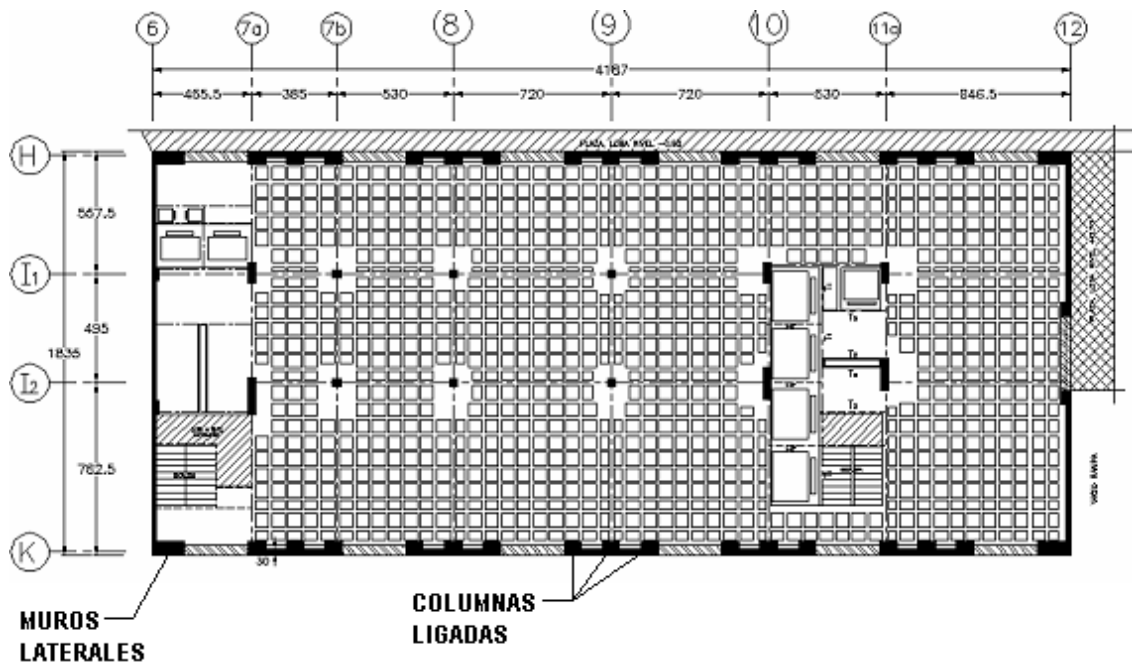


Fig. 1.9 Planta Baja (N+0.70 m)



## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

Respecto a los cuerpos bajos, la estructuración del Cuerpo Bajo I es a base de columnas de concreto, con losas reticulares de entrepiso y azotea también de concreto, mientras que los Cuerpos Bajos II y III, que alojan a las áreas de conferencias y biblioteca, poseen una estructura a base de columnas y traveses de acero, con losas de concreto en entrepisos y azotea (Uribe, 2005).

### 1.5 LA CIMENTACIÓN

#### 1.5.1 Cimentación original

Dadas las características del terreno y la diferencia abismal entre las presiones que transmitirían hacia el terreno, por un lado la torre, y por otro los cuerpos bajos, el proyecto original de la cimentación del conjunto se dividió en dos partes. Por un lado, la cimentación de la torre se resolvió con una de tipo parcialmente compensada: cajón de cimentación desplantado a 7 m de profundidad y complementado con 156 pilotes de fricción de 50 cm de diámetro, hincados hasta 25 m de profundidad. Por otro lado, los cuerpos bajos se erigieron a partir de un cajón de cimentación inmerso a 4 m de profundidad, que, por medio de contratraveses, se encuentra ligado estructuralmente al cajón de la Torre (Fig. 1.10 – Fig. 1.11).

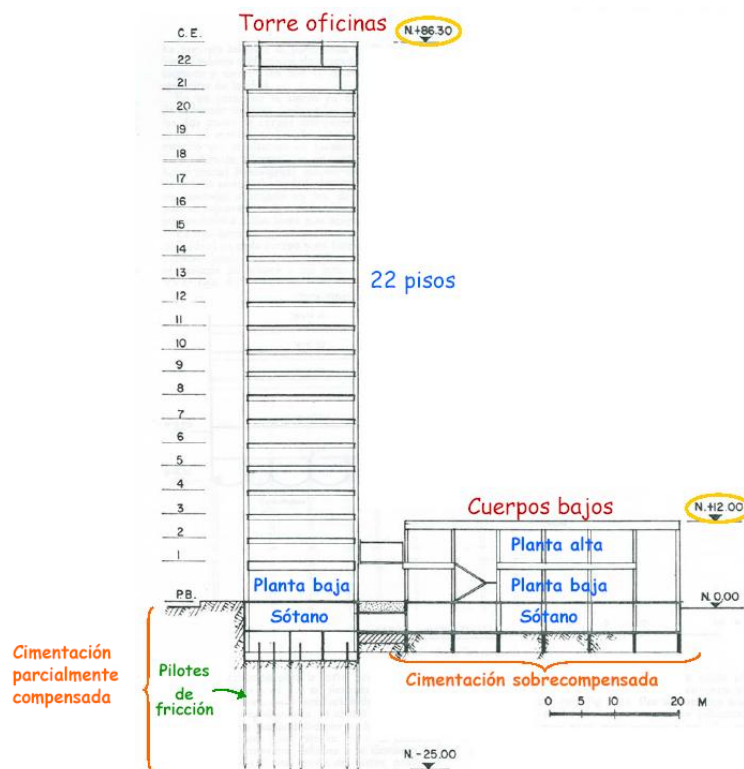


Fig. 1.10 Corte transversal del Conjunto

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

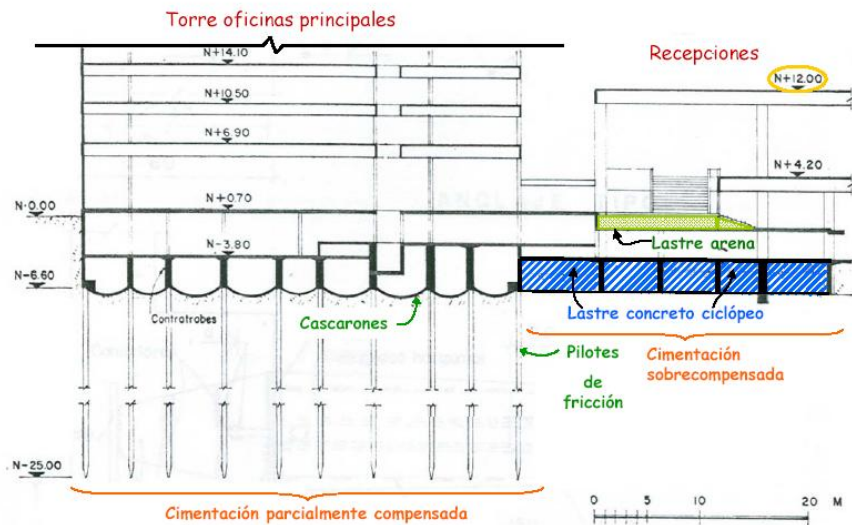


Fig. 1.11 Corte longitudinal del Conjunto

### 1.5.2 Intervenciones

Como consecuencia de los diversos hundimientos irregulares que la torre ha experimentado a lo largo de su vida útil, y de las emersiones acaecidas en los cuerpos bajos, todo ello como resultado de la naturaleza hostil del suelo, y notoriamente de un diseño global deficiente, el Conjunto Tlatelolco ha sido intervenido en considerables ocasiones, principalmente sobre su cimentación, con el fin de detener y controlar los movimientos indeseables del sistema y reestablecer así su funcionalidad.

Los primeros trabajos de refuerzo sobre la cimentación del conjunto, iniciados al año de dar inicio a su construcción, cuando la torre había llegado a su octavo piso, consistieron en la adición de 25 pilotes electromecánicos de 2 pulgadas de diámetro, llevados hasta 30 m de profundidad. Tal medida resulta ineficaz, teniendo que ser complementada al año siguiente, durante el cual se incorporan a la cimentación de la torre 48 pilotes más de las mismas características, y se retira lastre de la parte suroeste de la torre. La distribución de los pilotes agregados sobre la planta de cimentación de la torre en esta primera fase es en forma de L, ubicados sobre los lados poniente y sur de este inmueble.

La segunda recimentación tuvo lugar en 1983, cuando a propuesta del Ing. Manuel González Flores (PICOSA) se añaden 52 pilotes de control de 50 cm de diámetro, desplantados a la misma profundidad que los anteriores, pero con un arreglo cargado sólo hacia el extremo sur del edificio.

Cuatro años más tarde, al advertir que las medidas previamente tomadas no interrumpen el problema, se opta por ampliar el cajón de cimentación en 6 m de ancho con 4 m de profundidad hacia el extremo sur de la torre; esto con el fin de realizar una mejor distribución de la carga aumentando el área de contacto cimentación-suelo, y para dar alojamiento a los pilotes que pudieran instalarse en la posteridad. En ese mismo año, al volverse cada vez más notable el efecto ascendente de los cuerpos bajos, a estos últimos se les coloca lastre a la altura de su cimentación, con cuyo peso se pretende inducir el hundimiento de la estructura en esa zona para contrarrestar tal efecto.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

En la figura siguiente (Fig. 1.12) se puede observar la disposición de los pilotes sumados a la planta de cimentación de la torre, así como la ampliación del cajón de cimentación hacia el extremo sur del edificio.

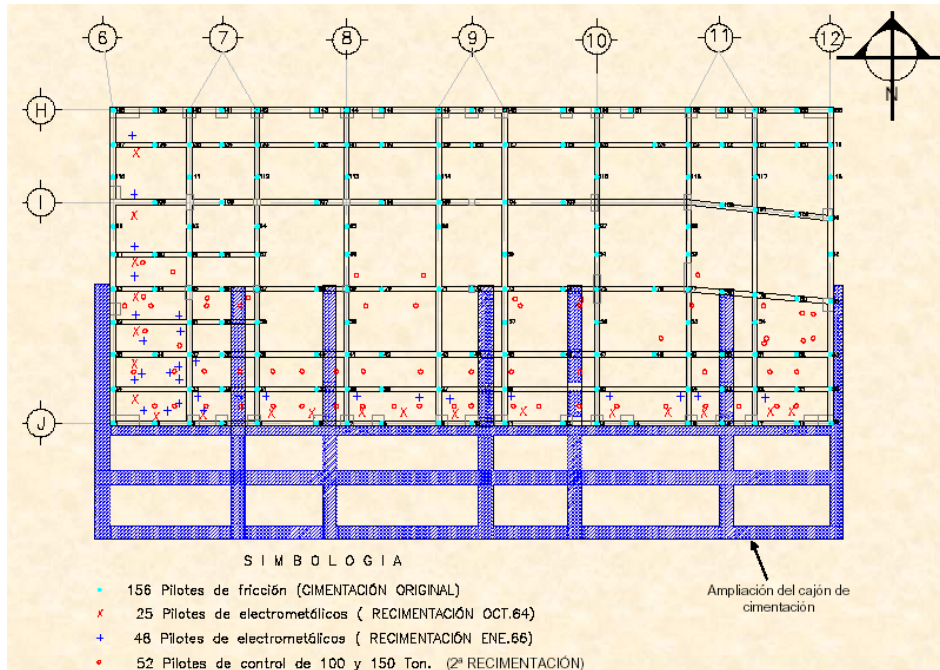


Fig. 1.12 Planta de cimentación de la torre

El plano siguiente (Fig. 1.13) muestra la localización y distribución de los distintos tipos de lastre que sobre la cimentación del conjunto han sido añadidos.

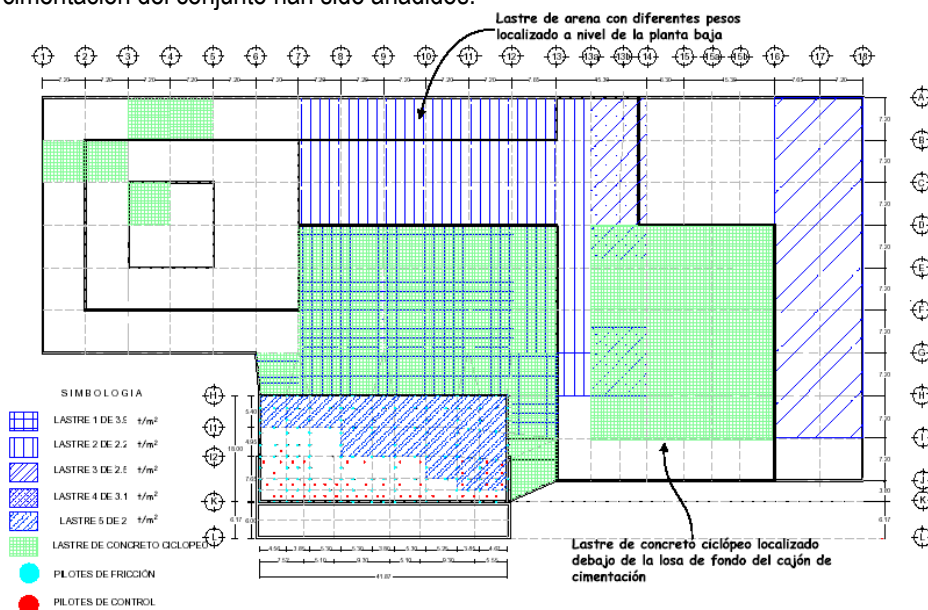


Fig. 1.13 Planta de localización y distribución de lastre

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

Finalmente, iniciada la década de los 90's, a iniciativa del Ing. Germán Figueroa, TGC instala 21 pozos de extracción y 13 de infiltración (Fig. 1.14), medida con la cual se pretenden controlar los movimientos de todo el sistema.

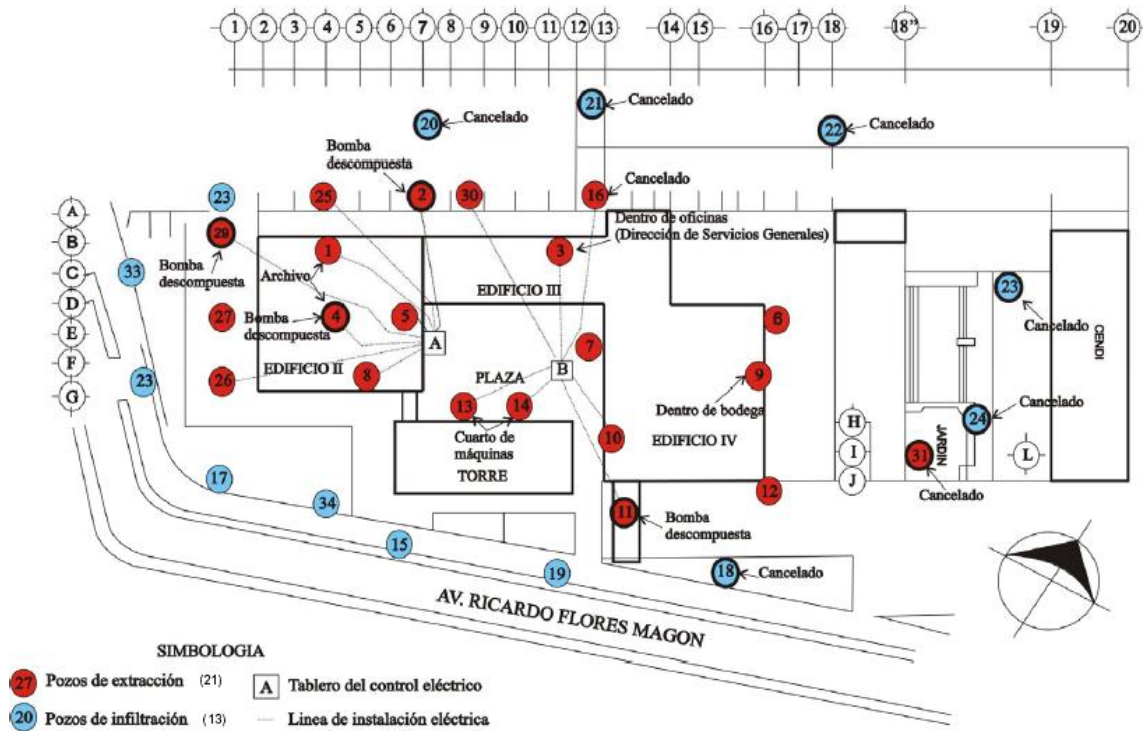


Fig. 1.14 Planta de localización de pozos de extracción e infiltración

### 1.6 MOVIMIENTOS VERTICALES Y DESPLOMOS

Los movimientos verticales del sistema propiciados por el hundimiento irregular del terreno (Fig.1.15 y Fig. 1.16), han cobrado mayor importancia sobre el entorno de la cimentación del conjunto que en el área abarcada por el mismo. En otras palabras, los asentamientos han sido mayores en la periferia que en interior del sistema. Esto resulta más evidente en las inmediaciones de la fachada sur de la torre, donde los desniveles, según el registro comprendido entre 1994 y 1998, alcanzan valores mayores a 2 cm (Fig. 1.16). Por el contrario, la zona de menor afectación a causa de este fenómeno ha sido la ocupada por los cuerpos bajos, lo cual resulta asimismo poco presumible, pues dicha tendencia ha resaltado el efecto de emersión de estos elementos.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

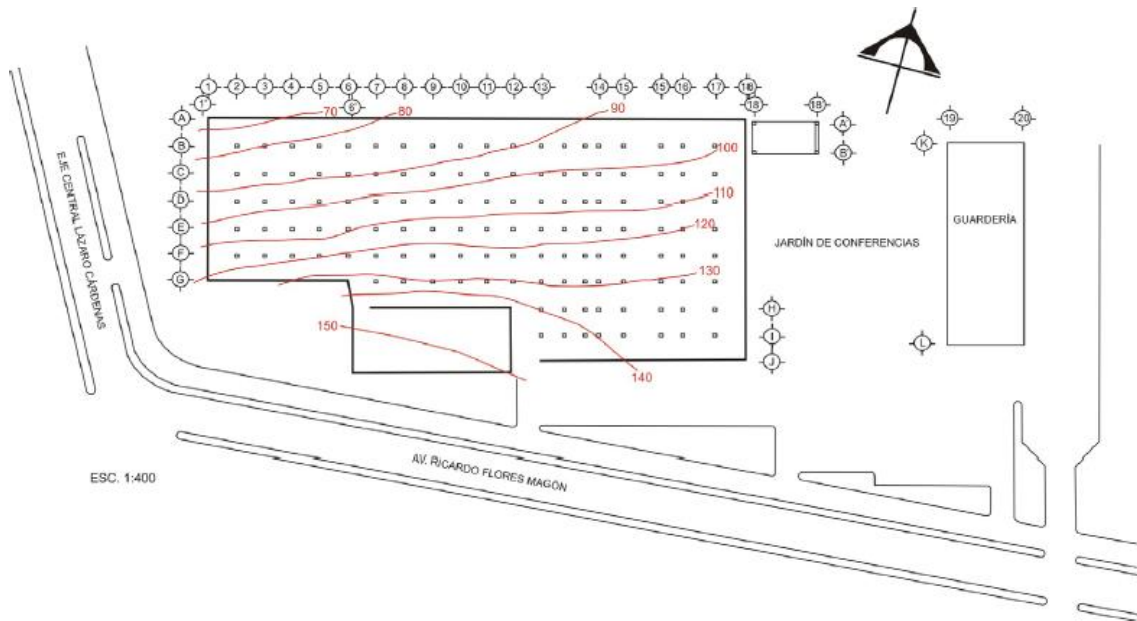


Fig. 1.15 Movimientos verticales (1985-1992). Cotas en mm.

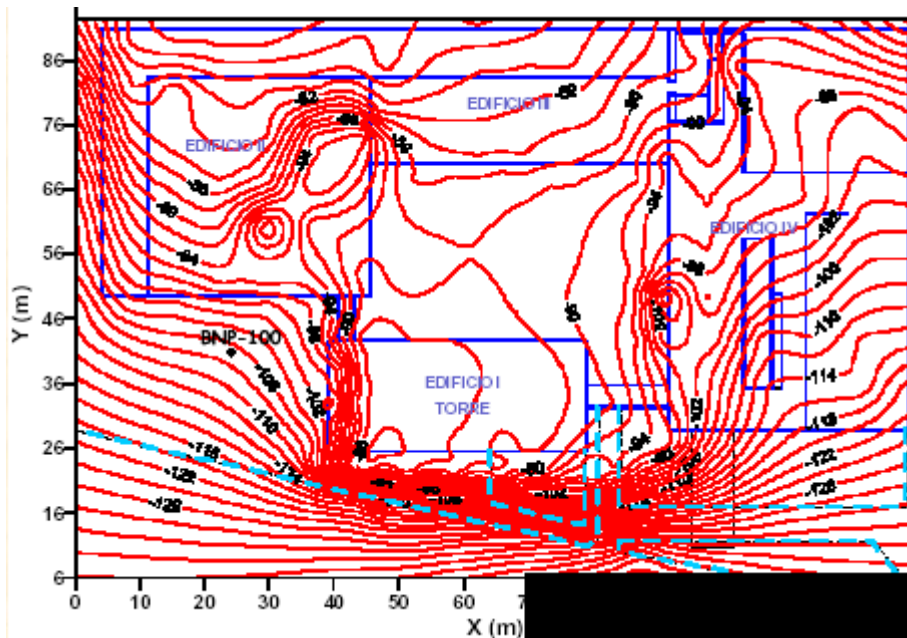


Fig. 1.16 Movimientos verticales (1994-1998) Cotas en mm.



## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

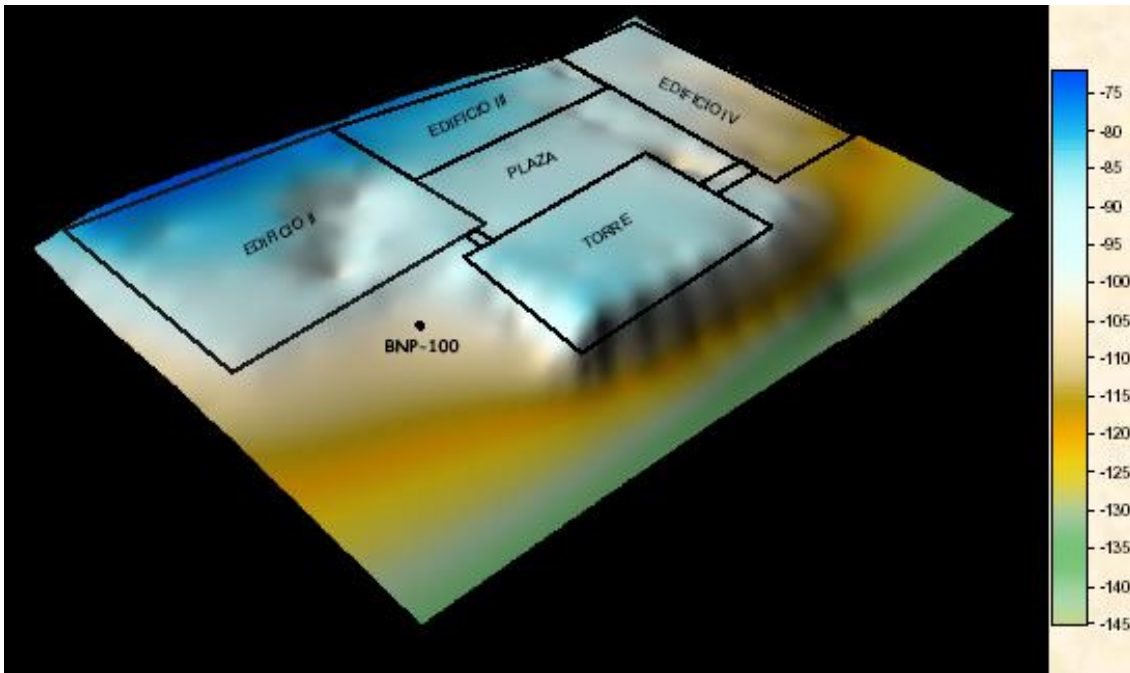


Fig. 1.17 Esquema superficial de desniveles a causa de hundimientos irregulares. Cotas en mm.

Los daños materiales concernientes a este tipo de movimientos saltan a la vista. Como se puede observar en las figuras 1.18 y 1.19, éstos daños han sido pagados primordialmente por los mosaicos de la banqueta que se alinean sobre el perímetro de la cimentación del conjunto, los cuales, obedeciendo a los desniveles del terreno, han perdido su horizontalidad, y, en casos más extremos, como los ubicados en los alrededores de la torre, han sufrido fracturas y resquebrajamientos.

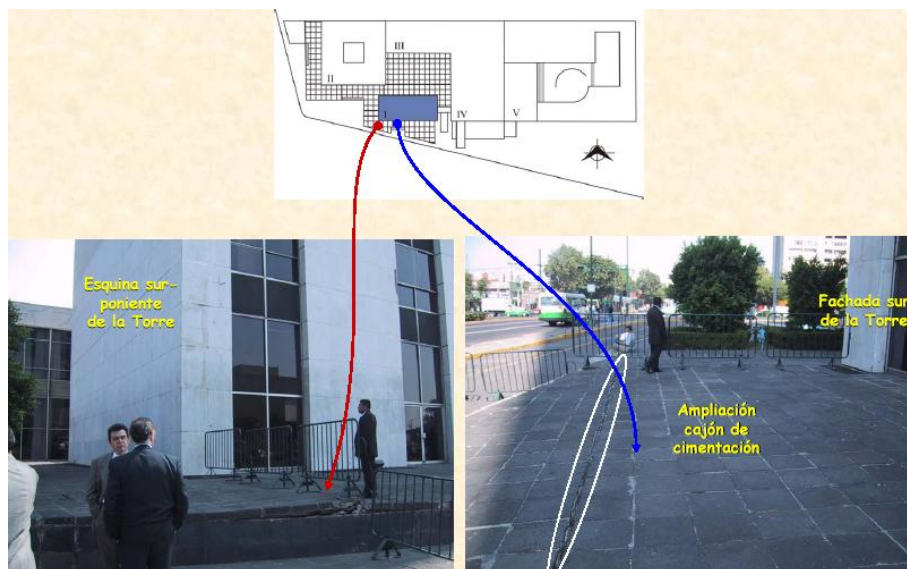


Fig. 1.18 Daños ocasionados por movimientos verticales en la torre

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

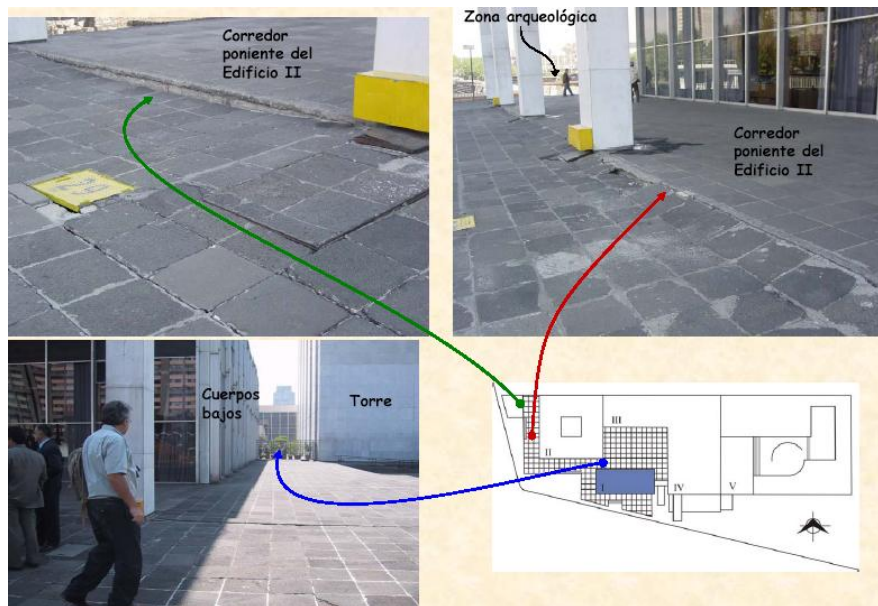


Fig. 1.19 Daños ocasionados por movimientos verticales en cuerpos bajos

Por supuesto, las afectaciones debidas a las deformaciones irregulares del terreno se han proyectado directamente hacia los inmuebles, siendo la torre la principal víctima. Este edificio ha sufrido desplomos desde el comienzo de su historia, los cuales, sumados, han alcanzado una magnitud cercana al metro (Fig. 1.20). Actualmente la torre permanece inclinada, con las incomodidades correspondientes, sin embargo el sistema de bombeo corrige lenta y gradualmente esta condición.

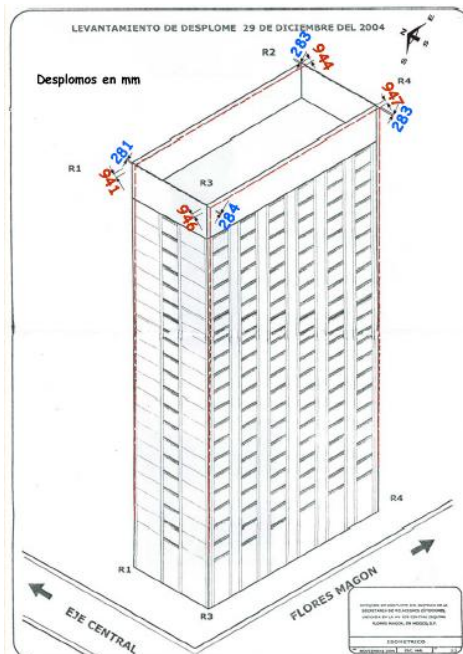


Fig. 1.20 Desplomos de torre (Diciembre de 2004)

## 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

---

Si bien en la actualidad el estado de la torre es estable, su recuperación, debida a todos los trabajos de rehabilitación, es cada vez más lenta. Por este motivo, hoy en día se ha elaborado un nuevo plan de acción para reforzar la cimentación, con lo cuál se evitarán correcciones geométricas futuras.



## CAPÍTULO 2

### METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

#### 2.1 EL MÉTODO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

##### 2.1.1 Antecedentes

Las primeras aplicaciones del método de vibración ambiental se remontan al año de 1936, cuando la Comisión para la investigación de Costas y Geodesia de los Estados Unidos emprende pruebas de vibración ambiental sobre ciertos edificios para determinar sus periodos fundamentales de vibración. Más tarde, gracias al progreso tecnológico y a la evolución de las técnicas de análisis espectral, el empleo de este tipo de pruebas permitió conocer frecuencias y modos de vibración superiores. A finales de la década de los 90's del siglo pasado, se descubre que el análisis espectral derivado de las pruebas de vibración ambiental también arroja información importante sobre la contribución que tienen los efectos de interacción suelo-estructura a la respuesta dinámica de los sistemas estructurales. Recientemente, la ejecución de estas pruebas se ha extendido a otro tipo de estructuras, como monumentos históricos, puentes, iglesias y plataformas marinas, con el fin de evaluar su comportamiento (CAMARGO, José y CRUZ, Carlos, 2004) Actualmente, su aplicación ha dejado de ser sólo tarea de centros de investigación, convirtiéndose ya en un servicio de tipo comercial ofrecido por diversas empresas privadas.

Los estudios de vibración ambiental se gestan como consecuencia de la innovación tecnológica de instrumentos de medición de alta sensibilidad, computadoras digitales y del resto del equipo requerido para la ejecución de una prueba de esta especie. La sofisticación tecnológica del equipo de medición, y la mejor comprensión y aprovechamiento de la información recavada de una prueba de vibración ambiental, han dado lugar a la obtención de información altamente confiable sobre la cinemática de estructuras civiles.

A pesar de que en la actualidad existen otros métodos, tales como las pruebas de vibración forzada, con los cuales es también posible conocer las propiedades dinámicas de una estructura, casi todos los especialistas en el ramo aún recurren a las pruebas de vibración ambiental por las grandes ventajas que ofrecen:

- Eficiencia
- Sencillez
- Bajo costo, en relación a otras pruebas más complejas como la vibración forzada
- No se requiere de un personal numeroso para efectuar las pruebas
- No se perturba en lo más mínimo el funcionamiento normal del edificio

No obstante, las pruebas de vibración ambiental también poseen sus limitantes. Por ejemplo, cuando se pretender determinar las propiedades dinámicas de estructuras sumamente rígidas, la información que puede recavarse a través de estas pruebas por lo regular es pobre.

Por otro lado, la metodología para la detección de daños estructurales antes efectuada con la información recogida de estas pruebas, hoy en día ya está en desuso, pues las conclusiones a las que pueden llegarse pueden estar seriamente equivocadas.

### 2.1.2 Objetivo

El método de vibración ambiental se sustenta en el registro, procesamiento, análisis e interpretación de señales de un determinado sistema estructural en estudio. Estas microseñales son producto de excitaciones generadas por la actividad humana, como por ejemplo, aquellas provenientes del funcionamiento de maquinaria industrial, del tráfico de vehículos y de la ocupación misma de los usuarios, o por la incidencia de algunos agentes ambientales como el viento o la marea.

A pesar de su pequeña amplitud (aceleraciones del orden de 1/100 veces la gravedad), estas excitaciones, por su variedad y cantidad, permiten definir de forma muy aproximada la cinemática de ciertas estructuras dentro del rango elástico lineal (SILVA LANG, 2005), a través de sus frecuencias fundamentales de vibración, formas modales, porcentajes de amortiguamiento y efectos de interacción suelo-estructura.

La meta de todo estudio de vibración ambiental es entonces, conocer la respuesta dinámica de una determinada estructura que se encuentra sujeta a diversas sollicitaciones ambientales de carácter ordinario. Sin embargo, el objeto de un estudio respecto a otro, sí puede diferir. Puede enfocarse a verificar la calidad de una obra, comparando los valores teóricos prescritos en el diseño con los valores obtenidos de forma experimental. O puede concentrarse, aunque este procedimiento ya es poco usado en la actualidad, en determinar la existencia de daños estructurales debidos a eventos sísmicos, al envejecimiento de los materiales, a asentamientos del subsuelo, o a modificaciones realizadas en la estructura. Para este último, habrá de contarse con registros previos al evento que se presume a afectado el comportamiento de la estructura en estudio, como referente de comparación.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE UNA PRUEBA DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

### 2.2.1 Equipo

El equipo empleado en pruebas de vibración ambiental generalmente consta de los siguientes componentes:

- Transductores (Acelerómetros)
- Restauradores
- Filtros
- Medios de captura (Tarjetas de Adquisición de Datos o Convertidores Analógicos Digitales)
- Analizador de espectros (opcional)
- PC o computadora portátil

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

En la Fig. 2.1 se muestra el diagrama del funcionamiento del equipo empleado en pruebas de vibración ambiental. En la Fig. 2.2 se muestra la misma secuencia pero ilustrada con imágenes.

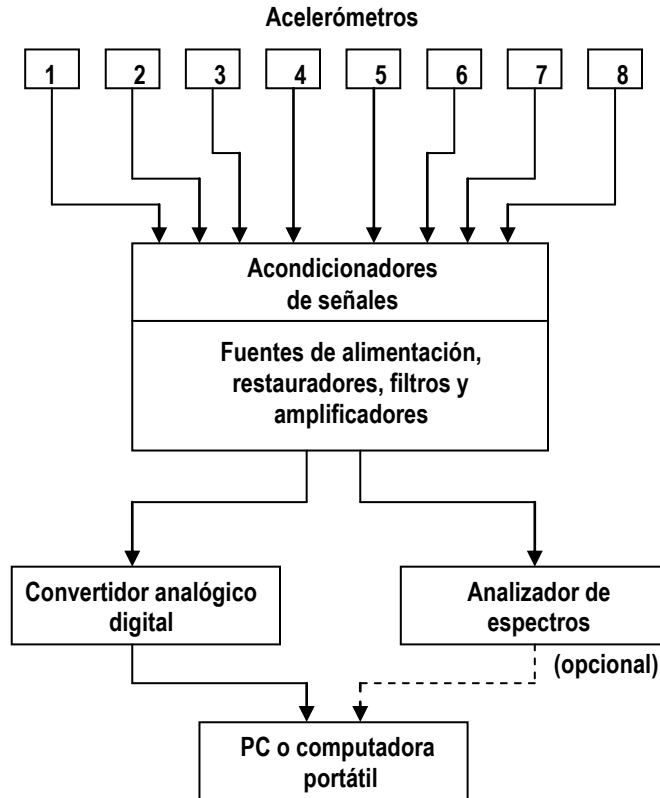


Fig. 2.1 Diagrama del funcionamiento del equipo empleado en pruebas de vibración ambiental (CAMARGO, José y CRUZ, Carlos, 2004)

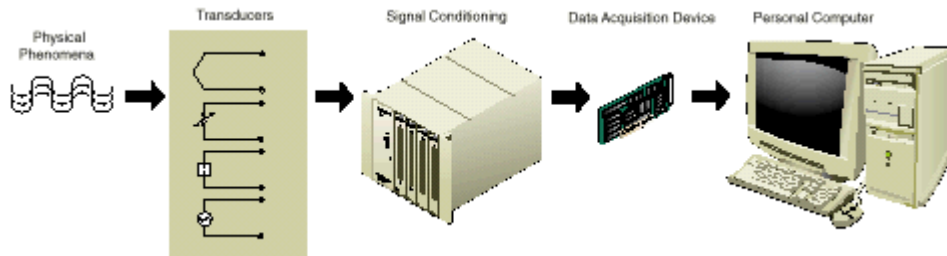


Fig. 2.2 Esquema del funcionamiento del equipo empleado en pruebas de vibración ambiental (LÓPEZ MORALES, 2003)

### 2.2.1.1 Transductores

Estos componentes pueden definirse en forma general como dispositivos que convierten una magnitud física como temperatura, fuerza, presión, distancia, movimiento, etc., en otra distinta. Más específicamente, hablando de sistemas de medición, un transductor se define como un dispositivo que provee una salida usable, en respuesta a una medida especificada. En la mayoría de las aplicaciones de ingeniería se utilizan transductores de tipo eléctrico, ya que ello permite un mejor tratamiento de la información (LÓPEZ MORALES, 2003).

Las características más importantes de los transductores que deben tomarse en cuenta tanto para su selección como para su uso, son las siguientes:

- *Rango*: Debe ser lo suficientemente amplio para adquirir todas las magnitudes esperadas del efecto a medirse.
- *Sensibilidad*: La respuesta del transductor deberá tener correspondencia con el número de entradas.
- *Efectos de carga*: Es importante investigar si la energía consumida por el transductor del efecto físico que se está probando es despreciable, o si debe considerarse aplicando factores de corrección para compensar las lecturas por pérdidas.
- *Respuesta de la frecuencia*: El transductor debe ser capaz de responder a la velocidad máxima de cambio en el efecto que se está observando.
- *Formato de salida eléctrica*: La forma eléctrica de salida del transductor debe tener un valor que lo haga compatible con el resto del sistema de medición.
- *Impedancia de salida*: La impedancia de salida del transductor debe tener un valor que pueda ser leído en las siguientes etapas eléctricas del sistema.
- *Requerimiento de potencia*: Si se emplean transductores pasivos, deberá verificarse de que se dispongan de las suficientes y adecuadas fuentes de poder eléctricas para poder operarlos.
- *Medio físico*: El transductor debe resistir las condiciones ambientales a las que estará expuesto durante el transcurso de la prueba, como lo son: temperatura, humedad, sustancias corrosivas, etc.
- *Errores*: Los errores inherentes a la operación del mismo transductor o aquellos errores originados por las condiciones del ambiente en la medición deben ser lo suficientemente pequeños o controlables para que permitan tomar datos significativos.

Respecto a las clases de transductores, se pueden mencionar dos: pasivos y activos. Mientras que los pasivos requieren ser alimentados externamente para efectuar la medida, los activos son capaces de generar por sí mismos una fuerza electromotriz sin recibir alimentación externa.

Concretamente, un acelerómetro es un transductor mecánico, cuyo mecanismo de funcionamiento se reduce a convertir la aceleración de un cuerpo a una señal de corriente o voltaje proporcional a dicha aceleración. En el caso de una prueba de vibración ambiental, las aceleraciones provenientes de las vibraciones de una estructura en un punto específico son captadas tal cual por un elemento sensor (masa sísmica), que yace en el interior del acelerómetro. El desplazamiento de la masa sísmica toma la dirección del eje sobre cuya aceleración se desea medir.

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

En la Fig. 2.3 se muestra el principio básico del funcionamiento de un transductor de aceleración. Obsérvese que al acelerar el acelerómetro, la masa se mueve en relación a éste. Al detenerse el acelerómetro, la masa regresa a su posición original.

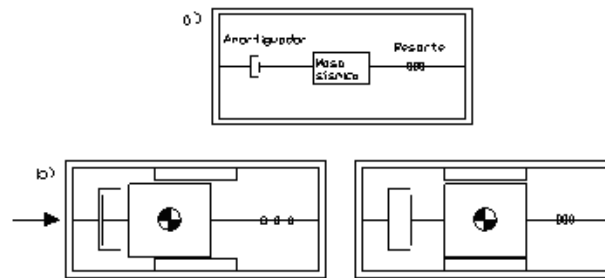


Fig. 2.3 Principio básico de funcionamiento de un transductor de aceleración: (a) Sistema masa-resorte, (b) Desplazamiento de la masa sísmica: con aceleración (izquierda); y con aceleración eliminada (derecha). (LÓPEZ MORALES, 2003)

En el mercado se pueden encontrar distintos tipos de acelerómetros, como los son los del tipo giroscopio, piezométrico, capacitivo, potenciométricos, reluctivos, de galga extensométrica, de cable vibrante, así como los servo-acelerómetros. En el presente trabajo nos concretaremos a hablar únicamente de estos últimos, pues fueron los empleados en nuestras pruebas.

Los servo-acelerómetros son transductores de lazo cerrado de equilibrio de fuerzas, de equilibrio de pares o de equilibrio nulo. Estos transductores tienen dos elementos fundamentales, un galvanómetro con un péndulo y un detector de posición. El desplazamiento de la masa sísmica de su interior es detectado por el sensor de posición, usualmente reluctivo o capacitivo, cuya salida es la señal de error en el servosistema. Esta señal es amplificada y realimentada a una bobina de par o de reposición, de modo tal que la fuerza de reposición es igual y opuesta a la fuerza inductiva por la aceleración. La bobina de par está fijada a la masa sísmica, y, cuando la corriente de realimentación es suficiente, la devuelve a su posición original de tal modo que la señal de error de posición se reduce a cero. La corriente, que es proporcional a la aceleración, pasa a través de una resistencia. La caída IR en la resistencia es la tensión de salida del acelerómetro, proporcional a la aceleración (LÓPEZ MORALES, 2003).

Los servo-acelerómetros empleados en nuestras pruebas, no obstante fueron diseñados para funcionar únicamente en su eje horizontal, gracias a una inyección de corriente éstos también pueden funcionar en posición vertical. Por lo tanto, con estos dispositivos es posible obtener mediciones en tres direcciones ortogonales, vertical (V), transversal (T) y longitudinal (L), de una estructura en estudio. En la Fig. 2.4 se muestra un acelerómetro de este tipo.



Fig. 2.4 Servo-acelerómetro

### 2.2.1.2 Filtros (LÓPEZ MORALES, 2003)

Estos componentes (Fig. 2.5) se conforman por una amplia gama de circuitos que son selectivos en frecuencia. Su función radica en restringir el paso de las frecuencias que no son útiles para el análisis. Éstos se ocupan para una infinidad de cosas como la eliminación de ruido en señales, la selección de frecuencias útiles, la eliminación de frecuencias indeseables y de armónicos, entre otras.



Fig. 2.5 Filtros

Un filtro se considera ideal cuando permite el paso (sin atenuación) de todas las frecuencias comprendidas en su rango de paso, y cuando retiene (con atenuación infinita) todas las frecuencias pertenecientes a su rango de supresión.

Los filtros pueden clasificarse en función de los siguientes criterios:

- Por la función que llevan a cabo.
- Por la tecnología empleada.
- Por la función matemática utilizada para conseguir la curva de respuesta.

*Por la función que llevan a cabo.*

Esta clasificación de filtros tiene lugar dependiendo de las frecuencias que deja pasar y de las que detiene.

Así podemos mencionar 5 tipos:

- Paso bajas
- Paso altas
- Paso banda
- Supresor de banda
- Pasa todo

*Por la tecnología empleada.*

De acuerdo a los elementos que componen los circuitos de los filtros, que hacen austero o sofistican el funcionamiento global del sistema, los filtros se pueden clasificar en:

- Pasivos
- Activos
- Digitales

*Por la función matemática utilizada*

Los tipos más comunes de aproximaciones son los siguientes:

- Butterworth
- Chebyshev
- Bessel
- Cauer (Elípticos)

### 2.2.1.3 Medios de captura (LÓPEZ MORALES, 2003)

Son los encargados de llevar las señales adquiridas y acondicionadas a un medio o instrumento donde se puedan interpretar mediante algún sistema. Estos medios o instrumentos pueden ser osciloscopios, analizadores de espectros, computadoras personales, entre otros. A continuación se describen dos de los medios de captura más usuales.

**Tarjetas de adquisición de datos:** Estos dispositivos pueden ser externos o conectarse por USB, GPIB, o de la forma más general, por la ranura del bus interno de la computadora por el cual van a pasar las señales para que ésta las pueda procesar. Estas tarjetas necesitan de controladores, los cuales son diferentes para cada una de ellas. La calidad de las tarjetas depende de los canales entrada/salida, si son digitales o análogos, resolución, velocidad de muestreo, contadores, además de otras características adicionales.

**Convertidores analógico–digital:** Un convertidor analógico/digital (CAD) es un elemento que recibe información de entrada analógica y la transforma a señal digital en forma de una palabra de “n” bits. Cada uno

de los niveles lógicos de tensión de entrada es convertida en combinaciones binarias de salida. Las características de los convertidores son: resolución, posibilidad de conversión unipolar o bipolar, código utilizado en la información de salida (binario o BCD), el tiempo de conversión y tensión de referencia (interna o externa). La entrada analógica puede ser voltaje o corriente, la salida digital puede ser cualquier código digital. Existe una gran diversidad de métodos para convertir señales analógicas a la forma digital, algunas de las más comunes son: aproximaciones sucesivas, doble rampa, flash, escalera y voltaje a frecuencia.

### 2.2.2 Conexión del equipo

El procedimiento para conectar los diversos componentes del sistema resulta bastante sencillo. La misma conexión del equipo se respeta tanto para ejecutar la calibración de los sensores como para iniciar las pruebas ya formales, con la única discrepancia de que para la primera acción todos los acelerómetros a utilizarse se congregan en un solo punto, mientras que para la segunda acción los acelerómetros se sitúan en diversos puntos, según el arreglo correspondiente a cada prueba. A continuación se enumeran cada uno de los pasos a seguir para efectuar el enlace entre un acelerómetro con el resto del equipo. La conexión de cada acelerómetro adicional se consigue obedeciendo el mismo procedimiento.

- 1) Conectar el cable blindado saliente del acelerómetro a la entrada del restaurador que le corresponda. Esta entrada se encuentra ubicada al centro del panel posterior del restaurador (Fig. 2.6). Con frecuencia, dadas las enormes distancias existentes entre los puntos de medición y el centro de captura, se hace necesario ligar el cable blindado proveniente del acelerómetro, que por lo general es de longitud corta, con otro cable de la misma especie pero de mucha mayor longitud.

En la Fig. 2.7 se observa, por un lado, el extremo del cable blindado proveniente del acelerómetro, y el extremo compatible de otro cable de la misma clase pero de mayor longitud. Por otro lado, se observan los extremos de dichos cables ya conectados.



Fig. 2.6 Enlace acelerómetro-restaurador





Fig. 2.7 Extremos compatibles de cables blindados

- 2) Insertar un cable a la salida de voltaje del restaurador, localizada al lado derecho de su cara posterior, y llevarlo hasta la entrada (IN) del canal designado en el filtro correspondiente (Fig. 2.8).



Fig. 2.8 Enlace restaurador-filtro

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

---

- 3) Enlazar a continuación el filtro con la interfase. Para ello, dirigir otro cable a partir de la salida (OUT) del canal correspondiente del filtro hacia alguna entrada disponible de la interfase (Fig. 2.9).

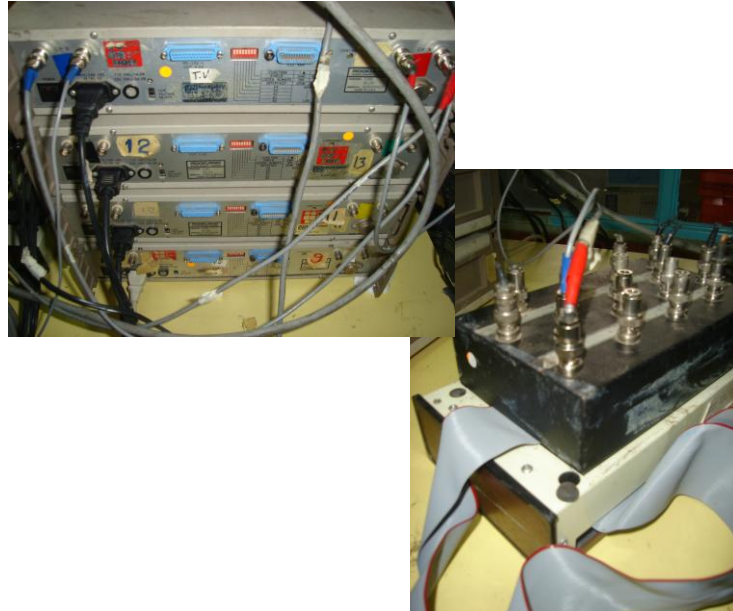


Fig. 2.9 Enlace filtro-interfase.

- 4) Enseguida, establecer la conexión entre la interfase y la microcomputadora, insertando por el lado de del primer componente el extremo libre de la banda, y por el lado de la microcomputadora el extremo que incluye la tarjeta de adquisición de datos (Fig. 2.10).

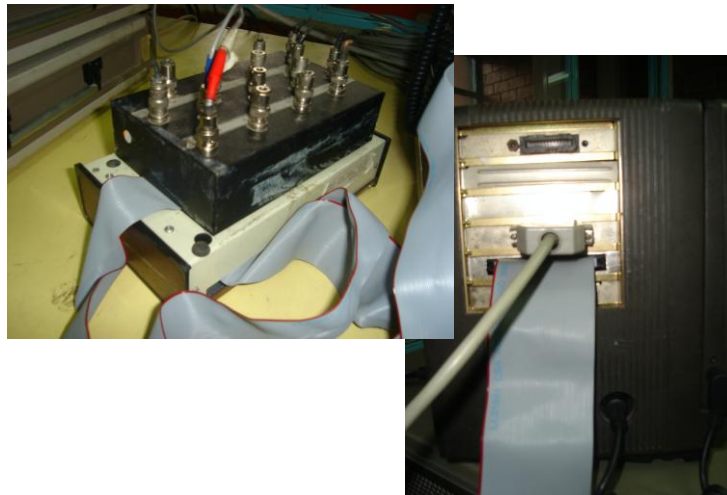


Fig. 2.10 Enlace interfase-microcomputadora

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

---

- 5) Conectar el controlador de canales, dirigiendo su cable hacia la entrada respectiva de la microcomputadora, localizada a un costado de la misma (Fig. 2.11).

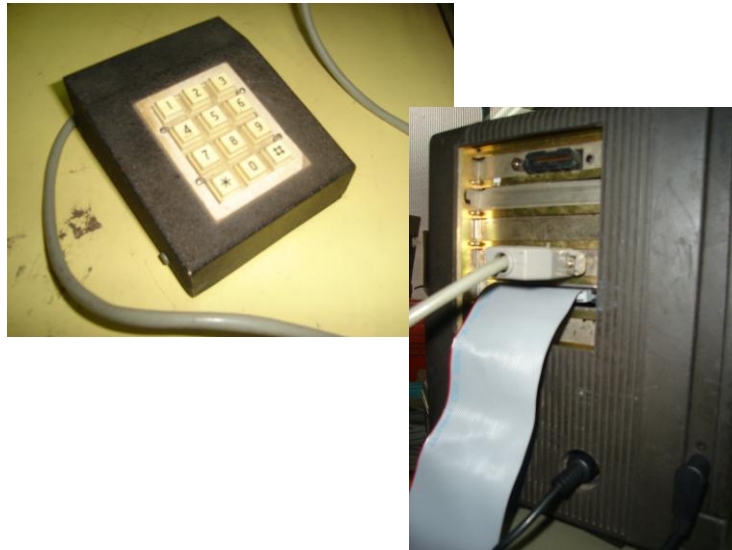


Fig. 2.11 Enlace controlador de canales-microcomputadora

- 6) Si se cuenta con un analizador de espectros, establecer su conexión con el equipo enviando un cable desde la otra salida (OUT) del canal respectivo en el filtro, localizada en el panel frontal de este componente, hasta las entradas (INPUT) del canal correspondiente en el analizador (Fig. 2.12).



Fig. 2.12 Enlace filtro-analizador de espectros

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

---

- 7) Por último, enchufar el cable de alimentación del restaurador, del filtro, del analizador de espectros y de la microcomputadora a alguna fuente eléctrica.

En la figura siguiente se muestra el diagrama de conexión del equipo.

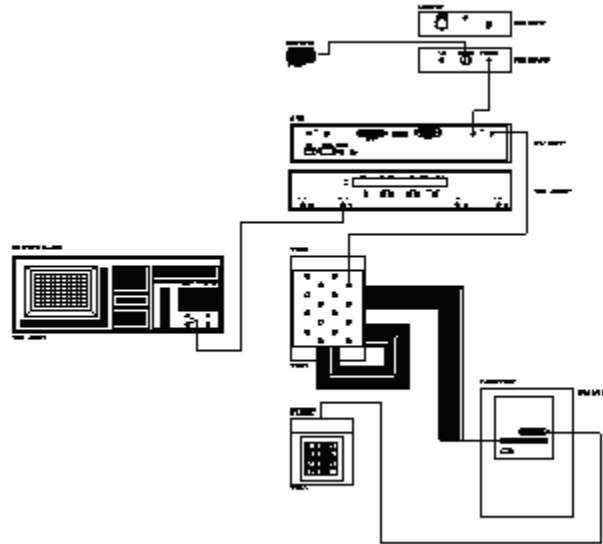
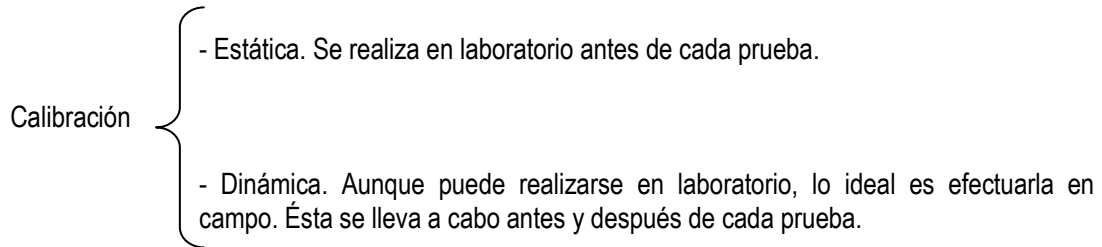


Fig. 2.13 Diagrama de conexión del equipo

### 2.2.3 Calibración de los acelerómetros

La calibración de los sensores de medición previa a cada prueba de vibración ambiental, es un proceso imprescindible pero de relativa sencillez. Apegándose al supuesto de que en un mismo punto de medición los registros obtenidos de cada uno de los acelerómetros localizados en éste debieran ser idénticos, este procedimiento no tendría cabida. Sin embargo, muchos factores pueden afectar el adecuado funcionamiento de un instrumento de esta índole, y hacer variar su respuesta con respecto a la de otros, como por ejemplo, el deterioro del instrumento por su uso prolongado, por las posibles averiaciones y consecuentes intervenciones de reparación a las que haya sido sometido, por sus posibles daños actuales procedentes de su mal manejo, etc. Por tal motivo, la ejecución de un proceso de calibración previo a cada prueba de vibración ambiental es plenamente justificable.

Existen dos maneras, complementarias entre sí, para efectuar la calibración de estos dispositivos:



### 2.2.3.1 Calibración estática

El objetivo de esta forma de calibración es conocer la respuesta de cada sensor ante condiciones estáticas; es decir, cuando no existe excitación alguna que incida en el funcionamiento del sensor. Con base en esto, y empleando herramientas matemáticas simples, es posible determinar constantes estáticas para cada uno de los sensores a utilizar en las pruebas, las cuales intervendrán más tarde en la etapa de procesamiento de la información.

A continuación se presenta el procedimiento que debe seguirse para efectuar la calibración de los acelerómetros bajo esta forma.

- 1) Conectar el equipo como se ha descrito en el punto anterior.
- 2) Fijar uno por uno los acelerómetros sobre una placa metálica superpuesta al anteojo de un teodolito (Fig. 2.14). De acuerdo con la precisión deseada, hacer variar el ángulo del anteojo (Fig. 2.15), guiándose por medio de los limbos (discos graduados), desde 0 hasta un determinado ángulo (por lo regular, 45° ó 60°). Los incrementos dados a dichos ángulos pueden ser variables, sin embargo se recomienda que sean más estrechos al inicio y con mayor amplitud conforme se avanza hacia el ángulo límite superior. Para cada ángulo, registrar su voltaje correspondiente proporcionado por el filtro. Una vez alcanzado el ángulo límite superior, realizar, pero ahora de manera regresiva el mismo procedimiento. Al llegar nuevamente a cero, repetir el proceso en vaivén pero en sentido contrario, esto es, hacia el ángulo con magnitud igual al del límite superior pero de signo contrario. De esta manera se obtendrán dos valores de voltaje relativos a cada ángulo estipulado entre el rango seleccionado.



Fig. 2.14 Acelerómetro fijado al teodolito



Fig. 2.15 Variación del ángulo del anteojo del teodolito

- 3) Graficar para cada acelerómetro los diversos puntos obtenidos mediante el procedimiento anterior, colocando como eje de las ordenadas al seno del ángulo, y como eje de las abscisas al voltaje.
- 4) Realizar una aproximación de todos los puntos valiéndose del método de mínimos cuadrados. Aquel acelerómetro entre todos que contenga el menor error de aproximación deberá seleccionarse como el “acelerómetro de referencia”, o sea, el que posee el funcionamiento más confiable.

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

La pendiente de la curva de aproximación del “acelerómetro de referencia” representará la constante de calibración estática.

En la figura siguiente (Fig. 2.16) se muestra una tabla tipo con su gráfica, resultantes de efectuar el procedimiento anterior.

SERIE (+/- IG)				
$\alpha$ (°)	$\alpha$ (rad)	SEN $\alpha$	VOLTAJE (V)	PENDIENTE 6.9939
				ERROR 0.0248
0	0.0000000	0.0000	0.01	
5	0.0872665	0.0872	0.62	
15	0.2617994	0.2588	1.85	
30	0.5235988	0.5000	3.50	
45	0.7853982	0.7071	4.91	
30	0.5235988	0.5000	3.52	
15	0.2617994	0.2588	1.84	
5	0.0872665	0.0872	0.61	
0	0.0000000	0.0000	0.01	
-5	-0.0872665	-0.0872	-0.60	
-15	-0.2617994	-0.2588	-1.82	
-30	-0.5235988	-0.5000	-3.49	
-45	-0.7853982	-0.7071	-4.92	
-30	-0.5235988	-0.5000	-3.50	
-15	-0.2617994	-0.2588	-1.85	
-5	-0.0872665	-0.0872	-0.62	

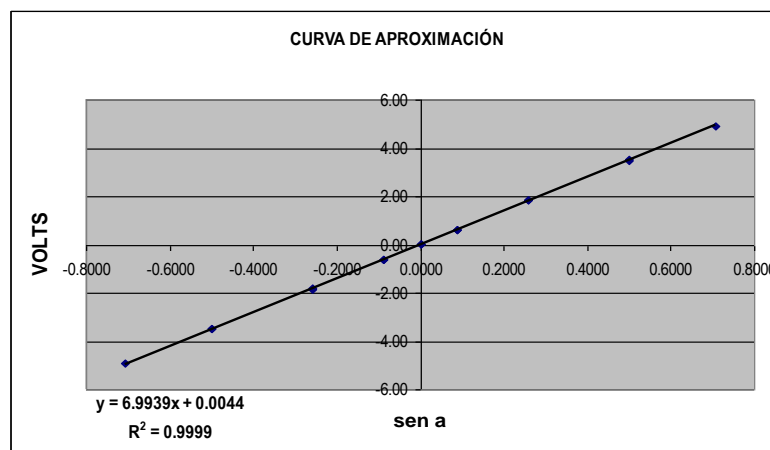


Fig. 2.16 Tabla y gráfica tipo de una calibración estática



### 2.2.3.2 Calibración dinámica

El objetivo de esta forma de calibración se centra en conocer la respuesta de cada sensor bajo condiciones dinámicas; es decir, cuando los dispositivos de medición se encuentran bajo la influencia de algún tipo de excitación. Como se ha mencionado, la práctica idónea de este tipo de calibración es en campo, donde se tienen las condiciones reales a las que estarán sometidos los acelerómetros una vez instalados para las pruebas. Sin embargo, en muchas ocasiones por falta de tiempo, esta calibración suele ejecutarse en laboratorio simulando las condiciones lo más próximas a las reales.

La excitación que se induce a los acelerómetros puede ser de dos tipos: *controlada* (empleando una mesa vibradora) o *no controlada* (mediante una excitación aleatoria artificial, o en su caso, propia del ambiente, si la calibración se ejecuta en campo). En ambos casos debe procurarse estimular a los sensores con ruido blanco, esto es, con excitaciones que comprendan toda la gama de frecuencias a la que pudieran estar sometidos los dispositivos de medición durante las pruebas formales. Para el caso de pruebas de vibración ambiental ejecutadas sobre edificios, este ruido blanco suele tener un rango entre 0 y 30 Hz.

A continuación se enumeran los pasos que deben seguirse para efectuar la calibración dinámica de los dispositivos de medición.

- 1) Conectar el equipo obedeciendo el procedimiento descrito en el punto 2.2.2.
- 2) Montar todos los acelerómetros a usar en las pruebas, incluidos los de repuesto y el “acelerómetro de referencia” (ver Calibración Estática), sobre una misma base metálica, tal como se ilustra en la Fig. 2.17. El acomodo de los acelerómetros sobre la base metálica no debe efectuarse siguiendo algún criterio en particular, sino más bien deberá realizarse como mejor convenga su conexión; esto para evitar el cruzamiento o enredo de los cables blindados que parten de los transductores hacia los acondicionadores.



Fig. 2.17 Montaje de acelerómetros sobre base metálica

- 3) A continuación, ubicar la base metálica con los acelerómetros en el punto seleccionado, de donde se obtendrán las mediciones para ejecutar la calibración.



## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

---

- 4) Preparar el equipo, ajustando los filtros al rango de frecuencias de interés (30Hz) y con ganancia igual a cero.
- 5) Estimular a los sensores mediante el medio seleccionado.
- 6) Registrar los espectros derivados de cada sensor. Usualmente se acostumbra tomar de 30 a 60 eventos por cada instrumento.
- 7) Ya en la fase de procesamiento de la información recogida del procedimiento anterior, obtener el espectro representativo de cada sensor. Este espectro corresponde al promedio de todos los espectros registrados en los diferentes eventos realizados.
- 8) Finalmente, obtener la constante dinámica de cada transductor, comparando, mediante herramientas matemáticas como la función de transferencia y la coherencia, cada uno de sus espectros representativos de cada sensor, con el espectro representativo del “acelerómetro de referencia”.

En la Fig. 2.18 se muestra una porción de una tabla tipo elaborada a partir del registro de dos acelerómetros, 10 y 15, útil para efectos de una calibración dinámica. Además, debajo de la tabla, se presentan dos gráficas: la primera, relativa al registro en el dominio de la frecuencia de los dos acelerómetros; la segunda, correspondiente a la función de transferencia y la coherencia de ambos espectros. En este caso, el transductor identificado con el número 15 corresponde al “acelerómetro de referencia”, mientras que el etiquetado con el número 10 es el acelerómetro del cual se desea obtener su constante de calibración dinámica. Obsérvese que la primera columna de la tabla, contiene toda la gama de frecuencias, producto de la excitación inducida. Si esta tabla se mostrara completa, esta columna se extendería hasta la frecuencia igual a 30 Hz. Las dos siguientes columnas incluyen las amplitudes correspondientes a cada frecuencia de los dos acelerómetros tratados. En la quinta columna se opera la función de transferencia, obtenida a través del cociente de la amplitud del acelerómetro a comparar entre la amplitud del “acelerómetro de referencia”. Finalmente, en la penúltima y última columna se determina la fase y la coherencia de ambos registros para cada frecuencia dada.

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

---

Frec (Hz)	Gxx	Gyy	Gxy/Gxx	Gyy/Gxx	FASE	COHERENCIA
	15	10		COCIENTE 10/15		
0	0.002441	0.003665	0.937	1.501	0	0.39
0.049	0.0017994	0.0021402	0.371	1.189	4	0.1
0.098	0.0015605	0.002259	0.362	1.448	3	0.06
0.146	0.0027923	0.0052013	1.512	1.863	-5	0.66
0.195	0.0037958	0.0077984	1.892	2.054	-3	0.85
0.244	0.0062717	0.0135464	2.106	2.160	-2	0.95
0.293	0.0087975	0.0190103	2.129	2.161	1	0.97
0.342	0.0109931	0.024253	2.182	2.206	1	0.98
0.391	0.0117132	0.0255111	2.157	2.178	1	0.98
0.439	0.0121908	0.0259813	2.117	2.131	1	0.99
0.488	0.0120977	0.0257392	2.113	2.128	1	0.99
0.537	0.0135805	0.0295609	2.162	2.177	1	0.99
0.586	0.0137557	0.0295422	2.135	2.148	0	0.99
0.635	0.0123314	0.0259874	2.089	2.107	0	0.98
0.684	0.0136821	0.0298581	2.171	2.182	-1	0.99
0.732	0.01184	0.0260756	2.183	2.202	1	0.98
0.781	0.0138069	0.0299325	2.153	2.168	0	0.99
0.83	0.0142607	0.0309641	2.156	2.171	-1	0.99
0.879	0.0136866	0.0299038	2.171	2.185	1	0.99
0.928	0.0115439	0.0252931	2.170	2.191	0	0.98
0.977	0.012487	0.0269747	2.144	2.160	-1	0.99

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

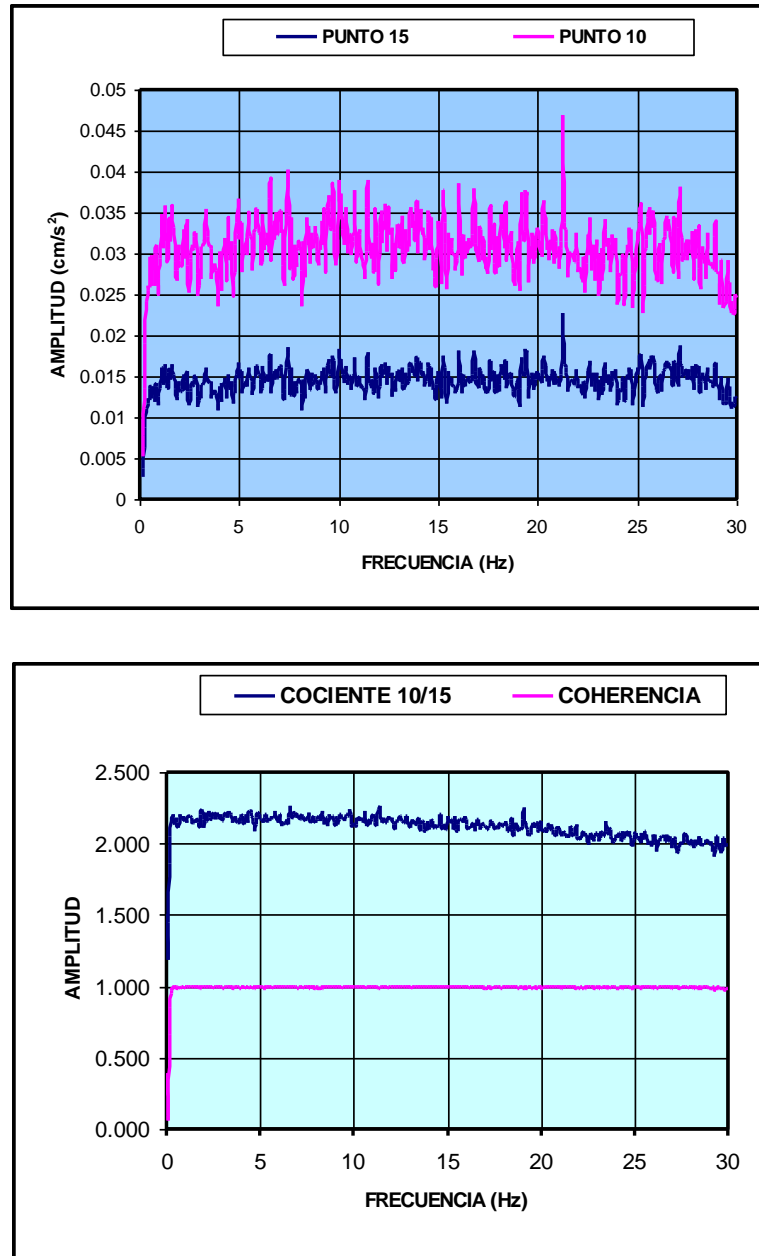


Fig. 2.18 Tabla y gráficas tipo obtenidas para efectos de una calibración dinámica

### 2.2.3.3 Obtención de la constante de calibración de un acelerómetro

Una vez obtenidas la constante de calibración estática del “acelerómetro de referencia”, y las constantes de calibración dinámicas del resto de los acelerómetros, se procede a elaborar una tabla donde intervienen cada una de estas cantidades para conseguir finalmente una constante única de cada acelerómetro, ver figura 2.19.

A continuación se describe el procedimiento necesario para el llenado de esta tabla.

- 1) Completar la primera columna con los números de canal a los cuales estuvo dirigido cada acelerómetro durante el proceso de calibración dinámica, ubicando en el primer renglón el canal vinculado al “acelerómetro de referencia”.
- 2) Añadir en la segunda columna los números de serie de cada acelerómetro. Recordar que el primer renglón deberá ser completado con los datos relativos al “acelerómetro de referencia”.
- 3) Asentar en la tercera columna los colores con los cuales fueron identificados cada uno de los canales.
- 4) En la cuarta columna agregar el rango de operación de cada sensor.
- 5) Completar la siguiente columna con la ganancia asignada a cada sensor durante el proceso de calibración dinámica. Como se ha mencionado, por lo regular, para este efecto, se trabaja con ganancias nulas.

Nota: El llenado de estas primeras columnas tiene como finalidad la identificación exacta de los transductores y el reconocimiento de las condiciones a las cuales operaron estos dispositivos.

- 6) A continuación, colocar en la columna siguiente las constantes de calibración dinámicas previamente obtenidas de cada acelerómetro. Al “acelerómetro de referencia”, por su condición, le corresponderá una constante dinámica igual a la unidad.
- 7) Situar en la primera casilla de la columna siguiente la constante de calibración estática del “acelerómetro de referencia”.
- 8) Obtener la constante de calibración única del acelerómetro subyacente al “acelerómetro de referencia”, multiplicando la constante de calibración estática de este segundo por la constante de calibración dinámica del primero. Proseguir la misma operación para el resto de los acelerómetros, siempre haciendo interactuar la constante de calibración dinámica del acelerómetro del cual se desea obtener su constante única, con la constante estática del acelerómetro que le antecede en la tabla.

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA

- 9) Una vez determinada la constante única de cada acelerómetro en unidades [volt/g], convertir tales magnitudes a unidades [gal/volt], elevando dichas cantidades a la -1 y multiplicándolas por 981, valor relativo a la aceleración de la gravedad.
  
- 10) Dependiendo de la ganancia que será aportada en los filtros ya en las pruebas formales, las constantes únicas obtenidas para cada sensor deberán dividirse, o multiplicarse, según sea el caso, por el factor estipulado a cada ganancia. Los valores resultantes de esta operación representarán las constantes de calibración de cada acelerómetro, las cuales intervendrán en la fase de procesamiento de la información del estudio de vibración ambiental a efectuarse.

En la siguiente figura se muestra la tabla tipo que resume el procedimiento anterior.

HORIZONTAL Referencia 15							constantes	10db	20db	30db	40db	50db	(-10db)
CANAL	SENSOR No	COLOR	g	db	gfactor	volts/g	gal/vol	3.16	10	31.6	100	316	*3.16
15	24005	ROJO	1	0	1.000	8.761	111.968	35.433	11.197	3.543	1.120	0.354	353.820
14	24006	AZUL	1	0	1.052	9.217	106.430	33.680	10.643	3.368	1.064	0.337	336.318
13	24065	VERDE	½	0	2.079	18.217	53.851	17.041	5.385	1.704	0.539	0.170	170.169
12	24067	NEGRO	½	0	2.128	18.645	52.614	16.650	5.261	1.665	0.526	0.166	166.259
11	316	AMARILLO	1	0	0.778	6.816	143.919	45.544	14.392	4.554	1.439	0.455	454.784
10	310	GRIS	1	0	0.870	7.620	128.746	40.742	12.875	4.074	1.287	0.407	406.838
9	17724	BLANCO	1	0	0.990	8.670	113.149	35.807	11.315	3.581	1.131	0.358	357.549
8	24086	CAFÉ	½	0	2.175	19.059	51.471	16.288	5.147	1.629	0.515	0.163	162.648

Fig. 2.19 Tabla tipo para la obtención de las constantes únicas de calibración de los acelerómetros

### 2.2.4 Colocación de sensores

Cabe señalar, antes que nada, que debido a que los acelerómetros son instrumentos muy delicados a causa de su alta sensibilidad, su manejo debe efectuarse con gran cuidado. Cualquier golpe o manipulación indebida, como ya se mencionó anteriormente, puede estropear su buen funcionamiento, lo cual conducirá a obtener registros erróneos de las mediciones que se pretendan realizar.

Se recomienda, por otra parte, fijar los acelerómetros sobre bases metálicas (Fig. 2.20), e instalarlos fuera del tránsito de los usuarios, a fin de evitar su movilidad durante las pruebas. En caso contrario, los registros podrían ser malogrados, situación que propiciaría la repetición de la(s) prueba(s).

## 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE LA CINEMÁTICA



Fig. 2.20 Acelerómetro montado sobre base metálica

Atendiendo estos preliminares, se puede proceder a ubicar y orientar cada uno de los sensores en la dirección de interés a medir, transversal (T), longitudinal (L) o vertical (V), sobre los puntos de la estructura previamente seleccionados. La elección de las posiciones de los sensores, proceso de suma importancia, pues la confiabilidad de los registros y su interpretación dependen estrechamente de ello, se hace en función de la propiedad que se desee determinar, y de la configuración y características de la estructura en estudio. Para el caso de edificios, la localización de los sensores se aconseja de la siguiente manera (Tabla 2a).

PROPIEDAD A DETERMINAR	UBICACIÓN DE SENSORES
FRECUENCIAS FUNDAMENTALES EN TRASLACIÓN	Uno, en el nivel más bajo de la estructura; otro, en el nivel más elevado de la misma; el resto, en los niveles intermedios, distribuidos a lo largo de la altura del edificio. Estos dispositivos, además deberán estar alineados entre sí, y, preferentemente, también con el centro de rotación del inmueble que regularmente coincide con el centro geométrico del mismo. Fig. 2.21 (a).
FRECUENCIAS FUNDAMENTALES EN TORSIÓN	Existen dos arreglos convenientes. El primero es colocar un sensor al centro, y otro en una de las esquinas de cada nivel instrumentado. Fig. 2.21 (b1). El segundo, y con el cuál se podrán comprobar los resultados obtenidos con el primer arreglo, es ubicar los sensores en dos puntos opuestos de cada nivel por instrumentar. Fig. 2.21 (b2).
PORCENTAJES DE AMORTIGUAMIENTO	Si se considera una estructura empotrada, situar un sensor en el centro de la parte más baja de la estructura, usualmente el sótano, y otro en el centro del nivel más elevado de la misma. Fig. 2.21 (c1). Si se considera un sistema suelo-estructura, localizar un sensor en el centro del nivel más elevado de la estructura y otro fuera de la estructura, sobre algún punto del terreno aledaño a la misma. Fig. 2.21 (c2).
EFFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA	Instalar un acelerómetro en el centro del nivel más elevado de la estructura; otros, en diversos puntos del nivel más bajo de la misma; y, un último, fuera del inmueble, dentro de las inmediaciones del mismo. Fig. 2.21 (d)

Tabla 2a Ubicación de acelerómetros según la propiedad a determinar

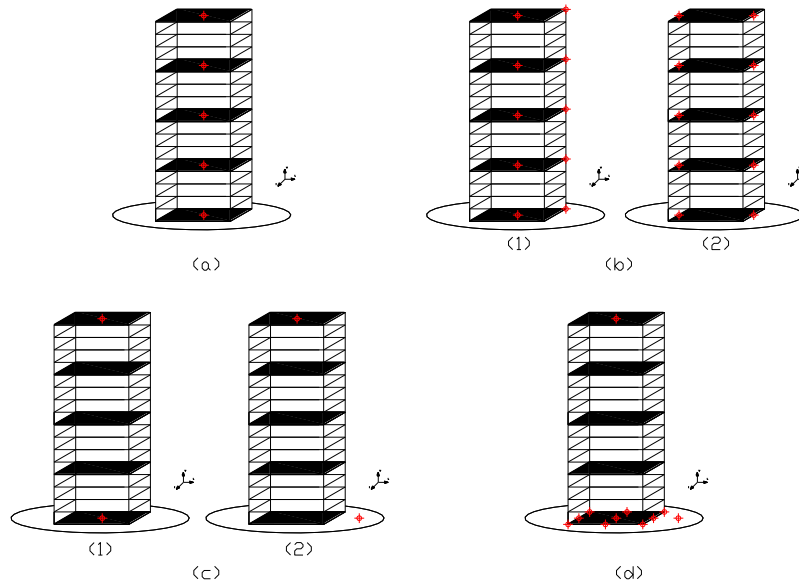


Fig. 2.21 Ubicación de acelerómetros según Tabla 2a

Debido a la restricción que usualmente se tiene en cuanto al número de acelerómetros con los que se cuenta en un estudio de esta índole, comúnmente se opta por formular un programa de pruebas con diferentes arreglos, con los cuales puede obtenerse toda la información requerida del estudio.

### 2.2.5 Acondicionamiento de las señales (LÓPEZ MORALES, 2003)

Difícilmente un diseñador conecta un transductor directamente a la parte de procesamiento o de despliegue de un sistema, ya que la señal enviada por el transductor por lo general es muy débil o contiene ruido y componentes que no se desean. Por este motivo, se efectúan etapas de acondicionamiento de señales, las cuales adecuan la señal a un valor o rango que puede ser leído por el instrumento que interpretará las señales.

#### Tipos de acondicionamiento de señales

**Amplificación:** Se utiliza cuando las señales de voltaje a medir son muy pequeñas. Para tener una mayor efectividad, las señales pueden ser amplificadas al máximo rango de voltaje de acondicionamiento de señal, equivalente al intervalo de entrada del convertidor analógico-digital, con lo cual se mejora la precisión y resolución de la medición.

**Aislamiento:** Se utiliza cuando las señales de voltaje son muy grandes, por lo que puede dañar al sistema de medición y ser peligrosas para el operador. Por esta razón, normalmente es preciso tener el aislamiento y la atenuación para proteger al sistema y al usuario de voltajes de alta tensión o de picos. También se puede necesitar aislamiento si el sensor está en un plano de tierra diferente al del sensor de medición. Los métodos comunes para el aislamiento, son el aislamiento capacitivo, óptico o magnético.

**Filtrado:** Se utiliza cuando se requiere remover cualquier componente de frecuencia no deseada (como lo es el ruido), así como prevenir el aliasing. Las señales de vibración ambiental requieren un filtro antialiasing, el cual es un filtro paso bajas pero con un corte muy brusco que elimina totalmente las señales de mayor frecuencia que la máxima a medir, ya que si no se eliminan aparecerían superpuestas a la señal medida. Otra manera de filtrar una señal es mediante software, el cuál filtra digitalmente las lecturas adquiridas.

**Linealización:** Se utiliza cuando la relación entre la variable de entrada al transductor y su señal no es lineal. Debido a que las no-linealidades causan errores, se realiza una linealización a la salida del transductor como parte del acondicionamiento o mediante software.

**Excitación:** Se utiliza cuando el transductor requiere de una fuente de poder para llevar a cabo la medición. Esta excitación puede ser voltaje o corriente.

### 2.2.6 Captura de las señales (LÓPEZ MORALES, 2003)

Para la captura de los datos es necesario tomar en cuenta los siguientes conceptos:

**Frecuencia de muestreo:** Es la velocidad a la que se realiza la conversión de la señal. Esta velocidad está ligada a la frecuencia de la señal que obtengamos según nos lo indica el teorema de muestreo de Nyquist, en donde la frecuencia de muestreo debe ser por lo menos dos veces superior a la frecuencia máxima de la señal muestreada para poder regenerar la señal analógica a partir de los datos digitales capturados.

**Efecto aliasing:** Este se presenta cuando la frecuencia de muestreo no es lo suficientemente grande debido a que la señal muestreada contiene frecuencias mayores de las esperadas, por lo que al realizar un análisis espectral presenta frecuencias que en realidad no existen, sino que fueron creadas por el efecto aliasing o alias. La forma de calcular una frecuencia alias producida por una señal es simple; se resta la frecuencia de Nyquist (la mitad de la de muestreo) de la frecuencia de la señal a muestrear y se le resta un armónico que sea mayor a la frecuencia de Nyquist. Así, si la frecuencia de Nyquist es 24Hz y el armónico es 25Hz, entonces la frecuencia de alias se presenta en  $25 \text{ Hz} - 24 \text{ Hz} = 1 \text{ Hz}$ . La solución al alias es filtrar las señales por arriba de la frecuencia de Nyquist antes de ser muestreadas. A esto se le conoce como anti-aliasing.

**Tipo de la señal:** Las señales pueden ser analógicas o digitales. Las señales digitales sólo tienen dos valores discretos posibles, alto y bajo. En tanto que la señal analógica contiene valores variables con respecto al tiempo, por lo que pueden tomar cualquier valor dentro de un intervalo.

**Referencia de la señal:** Fuente de señal de tipo flotante (baterías, transformadores, algunos sensores) o aterrizada (generadores de funciones, fuentes de poder, etc).



Resolución: Es el número de bits usados para representar una señal analógica determinada por la resolución del CAD. Entonces, podemos decir que la resolución es la mínima variación de la magnitud de la señal que puede apreciarse. Entre más bits ocupe para representar la señal, más confiable será el valor de la señal. Un CAD de 3 bits sólo tendrá 8 posibles valores, mientras que un CAD de 16 bits tendrá 65, 536 posibles valores. Entonces, entre mayor resolución de bits tenga un CAD, es mejor la representación de la señal convertida.

Intervalo de voltajes: Este valor también viene limitado por el CAD, y es el nivel mínimo y máximo que el convertidor puede digitalizar. Este intervalo puede ser manipulado para poder capturar una señal con mayor precisión. Por ejemplo, si tenemos una señal de  $\pm 5V$ , un intervalo de voltaje a  $\pm 10$  y un CAD de 3 bits, entonces sólo estaríamos usando 4 de los 8 valores posibles, con lo que nuestra señal sería convertida con una mayor calidad.

Modos de operación

Se presentan por lo regular tres tipos:

Modo diferencial: Ninguna entrada es conectada para una referencia fija como lo es la tierra. Estos sistemas idealmente sólo miden la diferencia entre las entradas (+) y (-) y no miden el voltaje en modo común.

Terminal simple referenciada: La medición se realiza con respecto a tierra.

Terminal simple no referenciada: Todas las mediciones son hechas a una tierra común.

### 2.2.7 Procesamiento de la información (LÓPEZ MORALES, 2003)

El software es una parte muy importante en el desarrollo de adquisición de datos, así como en los sistemas de control para instrumentos. El software es quien proporciona el acceso a todas las herramientas de análisis disponibles y la forma de presentar los datos adquiridos de manera comprensible, útil y fácil de manejar; ya que no sólo es importante coleccionar datos, sino también es necesario darles un proceso analítico.

La calidad y flexibilidad del software empleado en las aplicaciones de los sistemas de instrumentación se reflejan en el desempeño total del sistema de adquisición de datos.

Algunas de las características más importantes que podemos tomar en cuenta al seleccionar un software de adquisición de datos para que se ajuste mejor al sistema, son: funcionalidad, desempeño, confiabilidad, plataforma de trabajo, tipo de sistema operativo que utiliza, versión requerida, frecuencia, tiempo de muestreo, tipo de análisis (matemático, estadístico, gráfico, etc.), conectividad, compatibilidad con otros lenguajes de programación, uso de otro software para análisis posterior, especificaciones de software con el que funciona para obtener un adecuado funcionamiento del sistema, costo, entre otras muchas características relevantes que cada software en particular posee.

## CAPÍTULO 3

### CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de realizar un análisis de tipo espectral, efectuado a los datos recolectados en las pruebas de vibración ambiental ejecutadas sobre el Conjunto Tlatelolco. Se identifican las principales frecuencias de vibración en translación (direcciones T y L) y rotación (R) de la Torre y los Cuerpos Bajos. Además, para el caso de la Torre, gracias a su posible instrumentación en niveles intermedios, se trazan las configuraciones modales correspondientes a dichas frecuencias. Finalmente se determinan los porcentajes de amortiguamiento crítico, y se muestra la injerencia de los efectos de interacción suelo-estructura sobre las frecuencias fundamentales de los edificios que conforman a dicho Conjunto.

#### 3.1 PRUEBAS REALIZADAS

Como se mencionó en el Capítulo I, el Conjunto Tlatelolco se encuentra conformado por una torre y tres cuerpos bajos. Esta división es pertinente en cuanto al uso que recibían cada uno de estos inmuebles, al servir como sede del organismo gubernamental. Sin embargo, para fines de nuestro estudio, hablaremos únicamente de tres elementos: la Torre (TOR); el Cuerpo Bajo (CUA), correspondiente al previamente reconocido con el número II romano; y el Cuerpo Bajo (L), integrado por los cuerpos bajos señalados anteriormente con los números romanos III y IV (Fig. 3.1).

Para la ejecución de nuestras pruebas se valieron de 8 servoacelerómetros, 8 restauradores de señales, 4 filtros, un convertidor analógico-digital, un analizador de espectros y una computadora portátil; remontarse al Capítulo II para una descripción más detallada de cada uno de estos dispositivos.

Los acelerómetros fueron ubicados obedeciendo al programa de pruebas que se exhibe en la Fig. 3.2. Como se puede observar, dicho programa contiene el número de pruebas ejecutadas sobre el conjunto, cada una de ellas con su respectivo arreglo de dispositivos. Además, se indica la dirección a medir de cada acelerómetro y el número de canal, con su color asociado, al cual es dirigida la señal.

Cabe añadir que la distribución de los acelerómetros en las distintas pruebas está fundamentada en el parámetro o parámetros que se desean determinar, siguiendo en forma general las recomendaciones proporcionadas en la Tabla 2ª del capítulo anterior. En la Fig. 3.3 se presentan los esquemas de los arreglos convenidos en las quince pruebas que se llevaron a cabo.

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

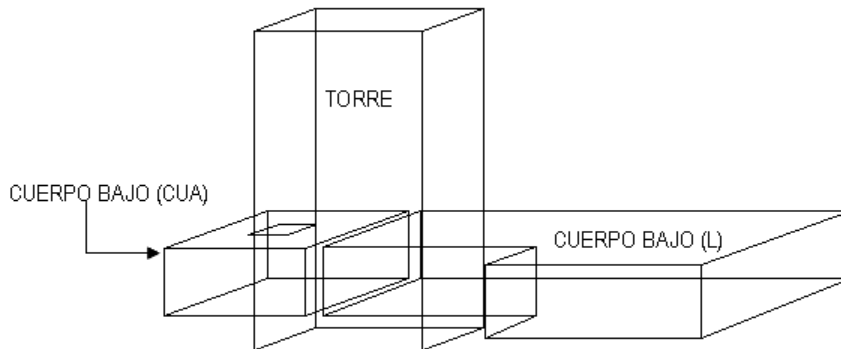


Fig. 3.1 Asignación de nombres a edificios para fines del estudio

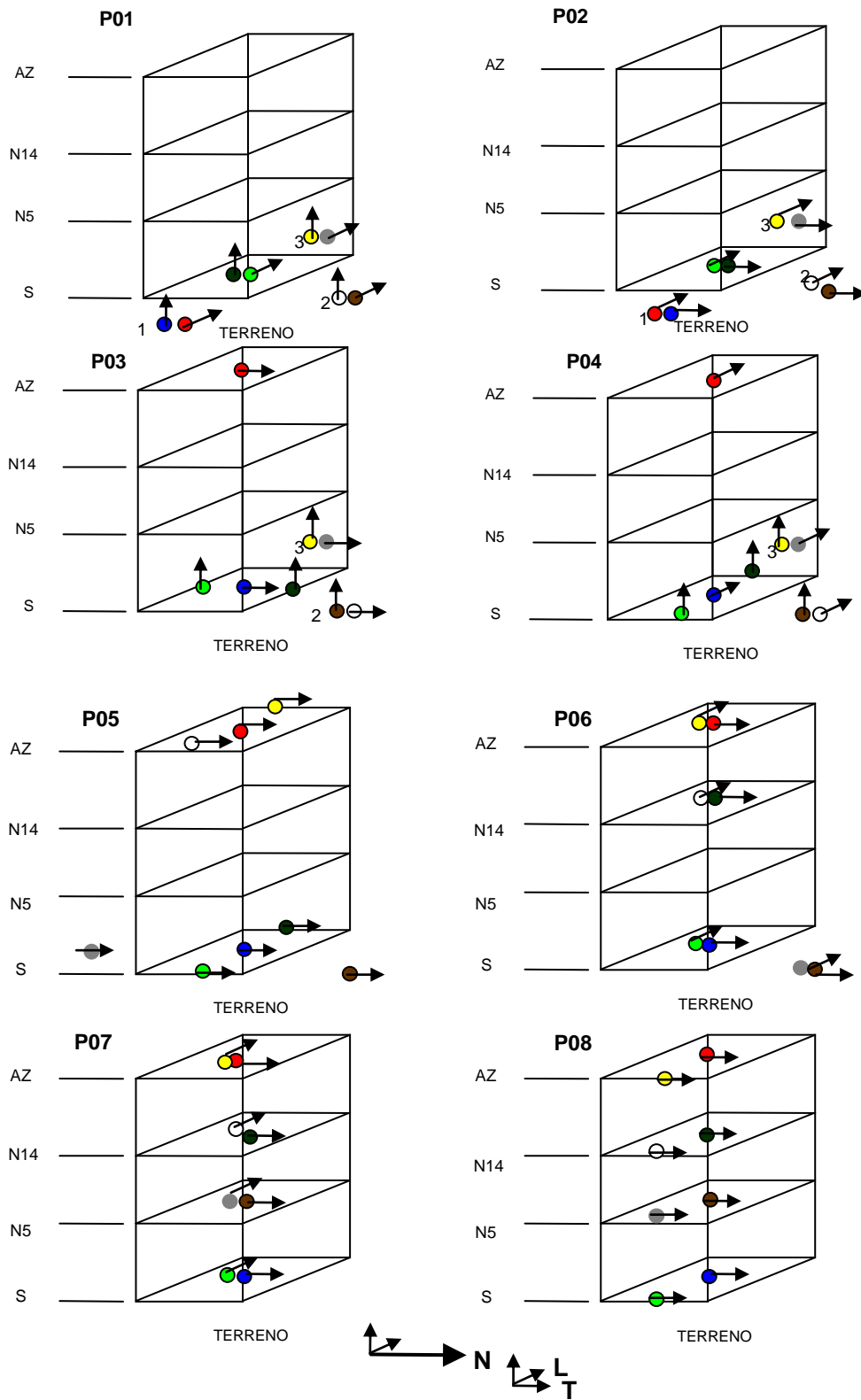
PRUEBA	PUNTO	DIRECCIÓN	CANAL	PRUEBA	PUNTO	DIRECCIÓN	CANAL
1	C1	L	15	8	AZC (TOR)	T	15
	C1	V	14		SC (TOR)	T	14
	SC (TOR)	L	13		SE (TOR)	T	13
	SC (TOR)	V	12		N14C (TOR)	T	12
	C3	V	11		AZE (TOR)	T	11
	C3	L	10		N5E (TOR)	T	10
	C2	V	9		N14E (TOR)	T	9
2	C2	L	8	N5C (TOR)	T	8	
	C1	L	15	9	AZC (TOR)	L	15
	C1	T	14		SC (TOR)	L	14
	SC (TOR)	L	13		SE (TOR)	T	13
	SC (TOR)	T	12		N14C (TOR)	L	12
	C3	L	11		AZE (TOR)	T	11
	C3	T	10		N5E (TOR)	T	10
C2	L	9	N14E (TOR)		T	9	
3	C2	T	8	N5C (TOR)	L	8	
	AZC (TOR)	T	15	10	AZO (TOR)	T	15
	SC (TOR)	T	14		SO (TOR)	T	14
	SS (TOR)	V	13		SE (TOR)	T	13
	SN (TOR)	V	12		N14O (TOR)	T	12
	C3	V	11		AZE (TOR)	T	11
	C3	T	10		N5E (TOR)	T	10
C2	T	9	N14E (TOR)		T	9	
4	C2	V	8	N5O (TOR)	T	8	
	AZC (TOR)	L	15	11	AZC (TOR)	L	15
	SC (TOR)	L	14		C	L	14
	SE (TOR)	V	13		C	T	13
	SO (TOR)	V	12		AZC (L)	-L	12
	C3	V	11		AZC (TOR)	T	11
	C3	L	10		AZC (CUA)	T	10
C2	L	9	AZC (L)		T	9	
4	C2	V	8	AZC (CUA)	L	8	

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

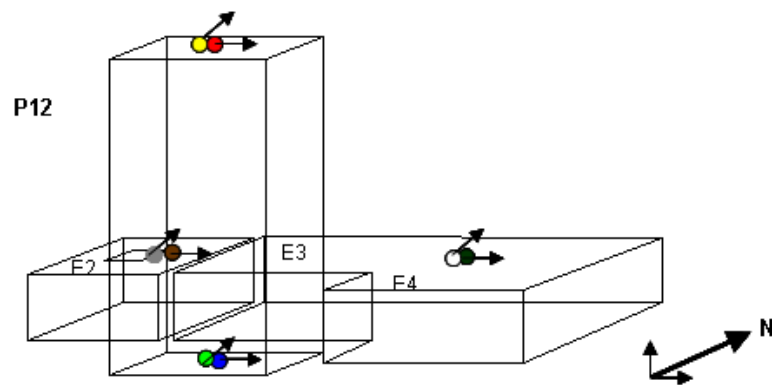
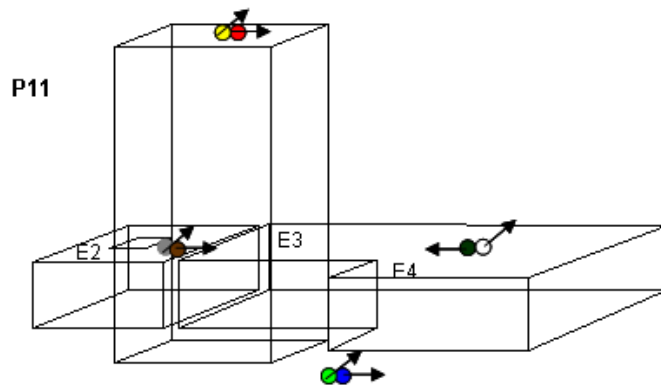
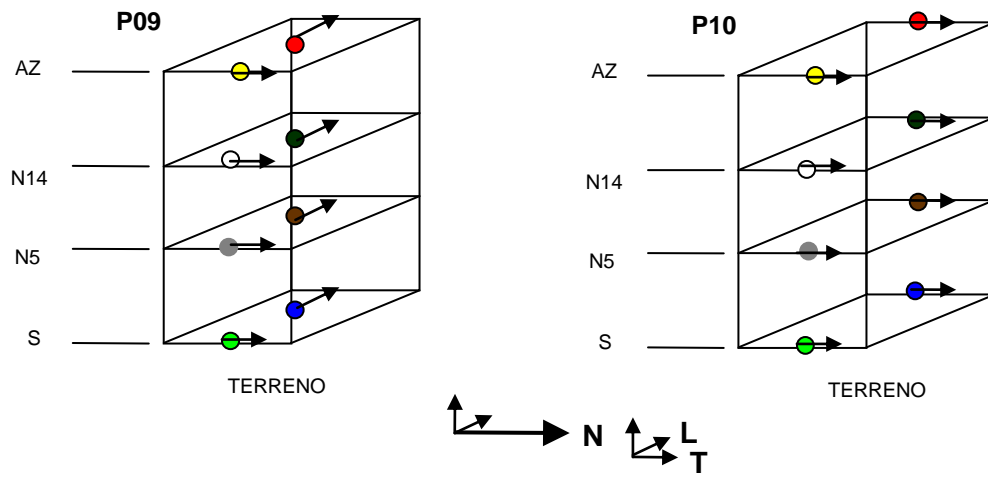
5		AZC (TOR)	T	15	12		AZC (TOR)	L	15
		SC (TOR)	T	14			SC (TOR)	L	14
		SE (TOR)	T	13			SC (TOR)	T	13
		SO (TOR)	T	12			AZC (L)	L	12
		AZO (TOR)	T	11			AZC (TOR)	T	11
		CS	T	10			AZC (CUA)	T	10
		AZE (TOR)	T	9			AZC (L)	T	9
6		CN	T	8		AZC (CUA)	L	8	
		AZC (TOR)	T	15	13		AZC (TOR)	T	15
		SC (TOR)	T	14			SC (TOR)	T	14
		SC (TOR)	L	13			SO (TOR)	T	13
		N14C (TOR)	T	12			AZSE (L)	T	12
		AZC (TOR)	L	11			AZO (TOR)	T	11
		CN	L	10			AZO (CUA)	T	10
	N14C (TOR)	L	9			AZNO (L)	T	9	
7		CN	T	8		AZC (CUA)	T	8	
		AZC (TOR)	T	15	14		AZE (TOR)	T	15
		SC (TOR)	T	14			AZN (L)	T	14
		SC (TOR)	L	13			SO (TOR)	T	13
		N14C (TOR)	T	12			AZSE (L)	T	12
		AZC (TOR)	L	11			AZO (TOR)	T	11
		N5C (TOR)	L	10			AZO (CUA)	T	10
	N14C (TOR)	L	9			AZNO (L)	T	9	
		N5C (TOR)	T	8		AZE (CUA)	T	8	
		AZS (TOR)	L	15	15		AZS (TOR)	L	15
		AZC (L)	L	14			AZC (L)	L	14
		SO (TOR)	L	13			SO (TOR)	L	13
		AZSE (L)	L	12			AZSE (L)	L	12
		AZN (TOR)	L	11			AZN (TOR)	L	11
		AZO (CUA)	L	10			AZO (CUA)	L	10
	AZNO (L)	L	9			AZNO (L)	L	9	
	AZE (CUA)	L	8		AZE (CUA)	L	8		

Fig. 3.2 Programa de pruebas ejecutadas sobre el conjunto

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO



### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO



### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

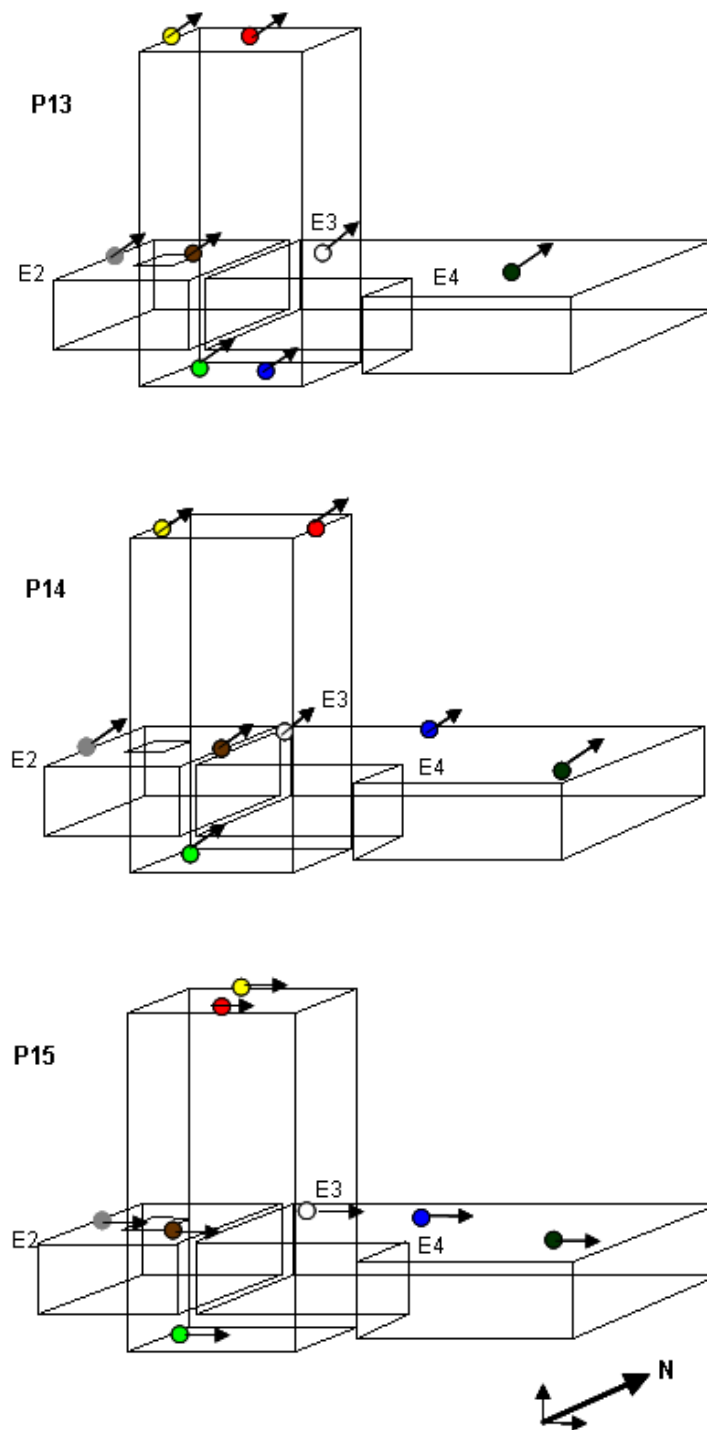


Fig. 3.3 Arreglos de acelerómetros convenidos en las distintas pruebas

## 3.2 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA TORRE

### 3.2.1 Frecuencias de vibrar

El análisis que a continuación se describe fue efectuado en dos fases, ambas regidas por el mismo procedimiento.

En la primera fase se trabajó con espectros generados por 2048 puntos, mientras que en la segunda con espectros generados por 4096 puntos. En otras palabras, en la segunda fase se analizaron espectros con una resolución dos veces mayor que la primera, por lo cual, los resultados obtenidos en esta segunda fase son teóricamente más aproximados que los obtenidos en la primera. Gracias a la disposición de esta información, en el desarrollo de este capítulo se efectúa una comparativa entre unos y otros resultados con el fin de conocer así la magnitud de las discrepancias existentes entre ellos.

Advertido lo anterior, el análisis tanto en la primera como en la segunda fase se desarrolló de la siguiente forma:

Con el objeto de determinar las frecuencias fundamentales de la Torre en translación (direcciones T y L), se trabajó básicamente con los registros proporcionados por la prueba 07. No obstante, cabe señalar que todo análisis efectuado para la determinación de alguna propiedad, requiere de registros complementarios provenientes de otras pruebas, como en este caso de las pruebas 08 y 10, que den fe de los resultados que se presumen correctos.

Para la dirección T, se analizaron las densidades espectrales de las señales procedentes de azotea centro y sótano centro, así como la función de transferencia que relaciona ambos registros, es decir, el cociente  $[AZ-C/S-C]$ . Adicionalmente se analizaron los cocientes entre cada uno de los niveles intermedios instrumentados y el sótano, esto es,  $[N14-C/S-C]$  y  $[N5-C/S-C]$ . Siguiendo este procedimiento, se identificaron los valores de frecuencia correspondientes a los cinco primeros modos de vibrar de la estructura en esta dirección (Fig. 3.4 y 3.5). Análogamente, para la dirección L se analizó el cociente entre los registros de azotea y sótano en esa dirección. Los valores de frecuencia identificados, pero en este caso asociados únicamente a los tres primeros modos de vibrar de la estructura, fueron corroborados con información recolectada de los niveles intermedios. Los resultados del análisis en esta otra dirección se muestran también en las Figuras 3.4 y 3.5.

Por otro lado, para la obtención de las frecuencias fundamentales relativas a la torsión, se analizaron las señales procedentes de las pruebas 08 y 10. Con la prueba 08 se asoció en la dirección T, para cada nivel instrumentado, el registro del acelerómetro ubicado en el extremo Este del edificio con el registro del acelerómetro posicionado al centro del inmueble, es decir, los cocientes  $[AZ-E/AZ-C]$ ,  $[N14-E/N14-C]$  y  $[N5-E/N5-C]$ . Bajo este esquema se reconocieron los valores de frecuencia relacionados a los tres primeros modos de torsión de la estructura (Fig. 3.4 y 3.5). Los valores de frecuencia identificados como primeros modos en torsión, fueron comprobados con los cocientes generados de la prueba 10, esta vez relacionando, para cada nivel instrumentado, el registro del extremo Este con el espectro del extremo Oeste del edificio. En otras palabras, se obtuvieron los cocientes  $[AZ-E/AZ-O]$ ,  $[N14-E/N14-O]$  y  $[N5-E/N5-O]$ .



### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

TORRE (2048 PUNTOS)						
MODO	DIRECCIÓN T		DIRECCIÓN L		TORSIÓN	
	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1	0.488	2.049	0.391	2.558	0.781	1.280
2	2.002	0.500	1.563	0.640	3.076	0.325
3	3.516	0.284	3.027	0.330	5.811	0.172
4	4.492	0.223				
5	7.129	0.140				

Fig. 3.4 Frecuencias de vibrar de la Torre (2048 Puntos)

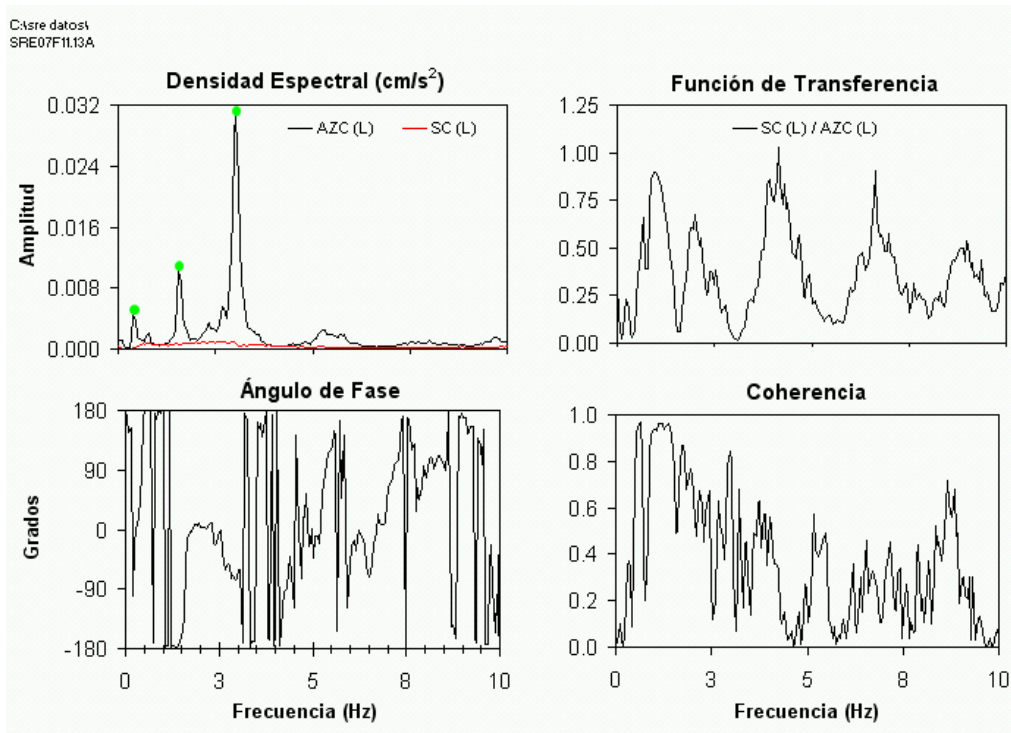
TORRE (4096 PUNTOS)						
MODO	DIRECCIÓN T		DIRECCIÓN L		TORSIÓN	
	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1	0.464	2.155	0.415	2.410	0.757	1.321
2	2.002	0.500	1.563	0.640	3.052 - 3.076	0.328 - 0.325
3	3.516	0.284	3.027	0.330	5.786 - 5.835	0.173 - 5.786
4	4.492 - 4.541	0.223 - 0.220				
5	6.348 - 6.396	0.158 - 0.156				

Fig. 3.5 Frecuencias de vibrar de la Torre (4096 Puntos)

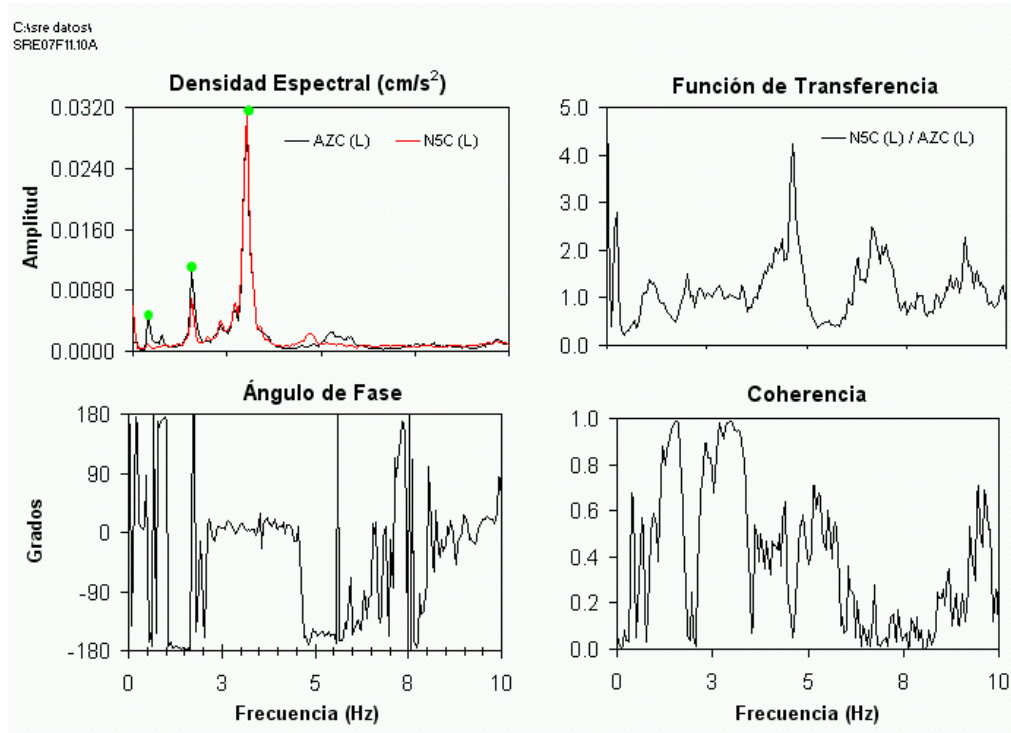
Como se puede observar, las discrepancias entre los resultados obtenidos con los espectros generados por 2048 y 4096 puntos, resultan poco significativas. Debido a esta circunstancia, tanto los resultados de la Fig. 3.4 como los resultados de la Fig. 3.5 pueden ser considerados válidos, a pesar de que teóricamente sean más acertados los segundos.

A continuación (Fig. 3.6) se exhiben los espectros analizados para llegar a los resultados anteriores.

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

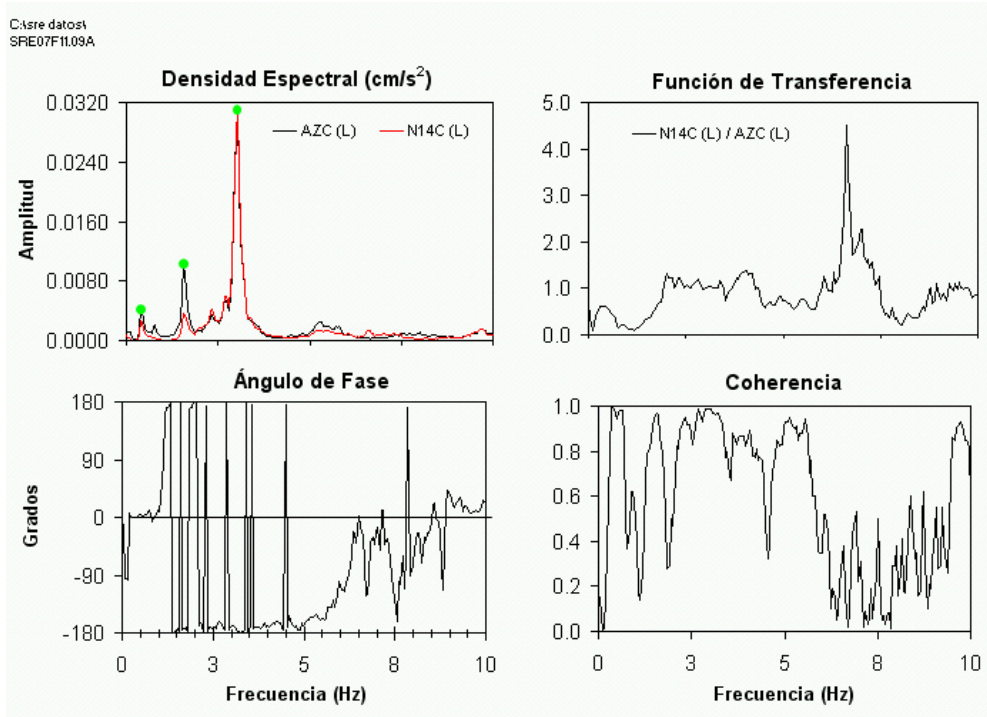


PRUEBA 07. ESPECTROS [AZ-C/S-C] DIRECCIÓN L

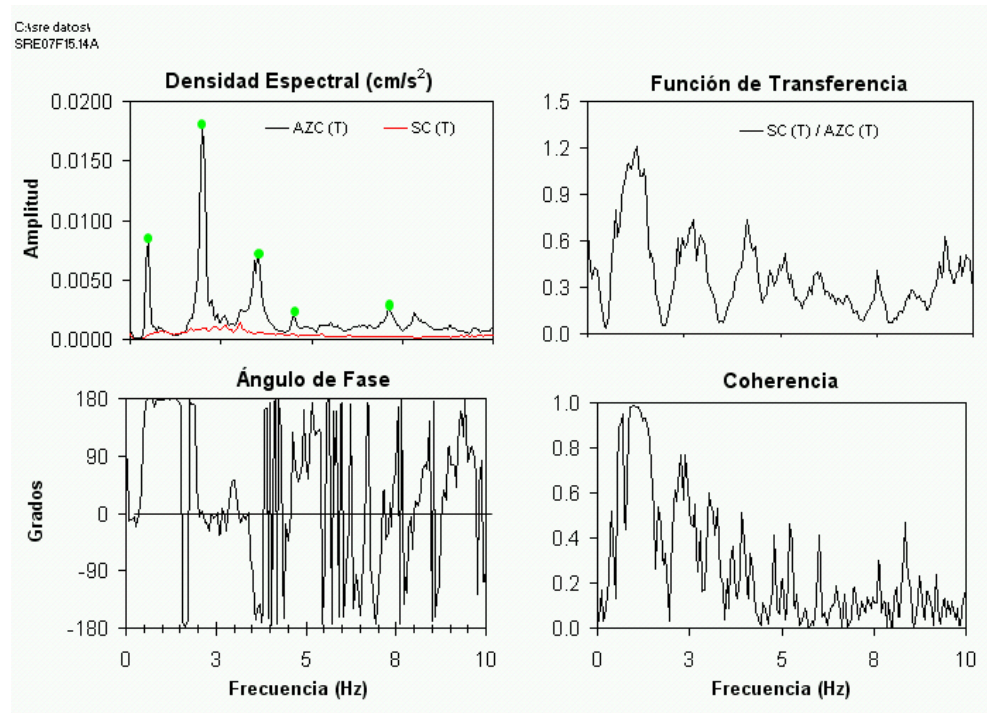


PRUEBA 07. ESPECTROS [AZ-C/N5-C] DIRECCIÓN L

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

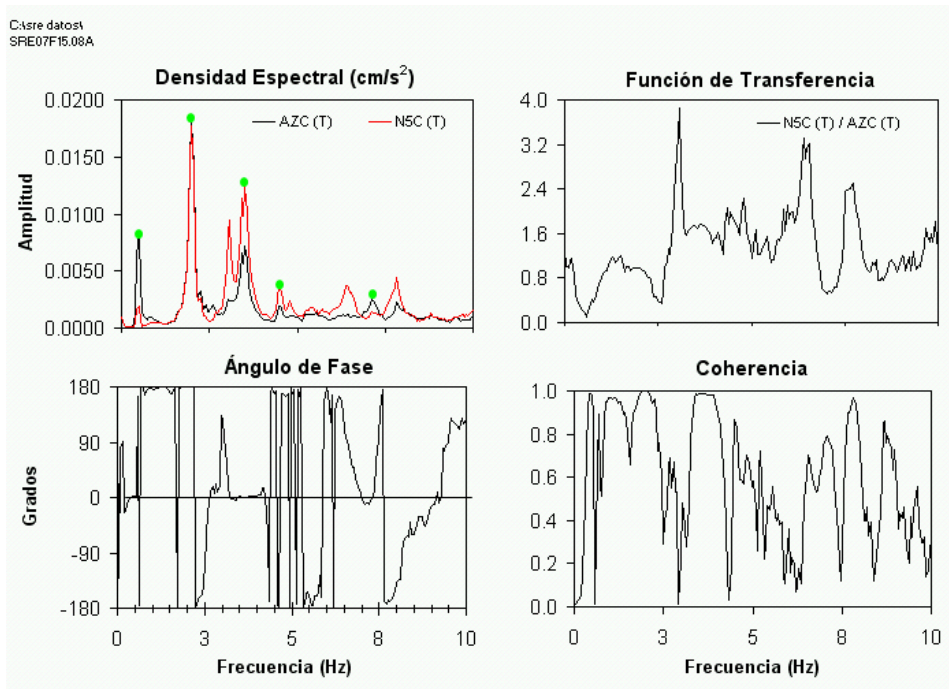


PRUEBA 07. ESPECTROS [AZ-C/N14-C] DIRECCIÓN L

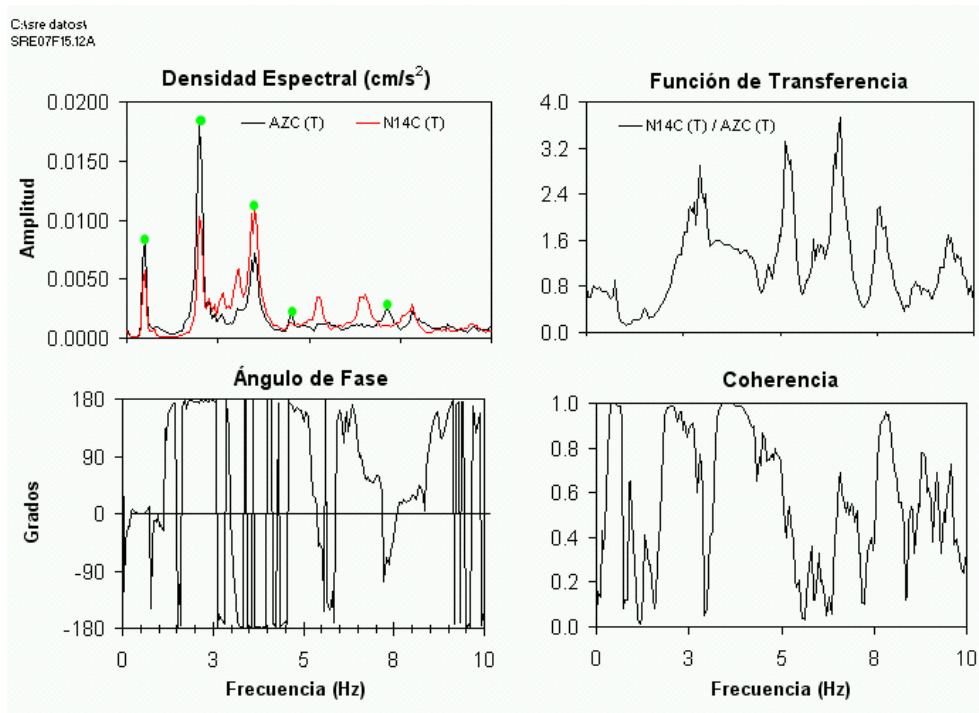


PRUEBA 07. ESPECTROS [AZ-C/S-C] DIRECCIÓN T

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

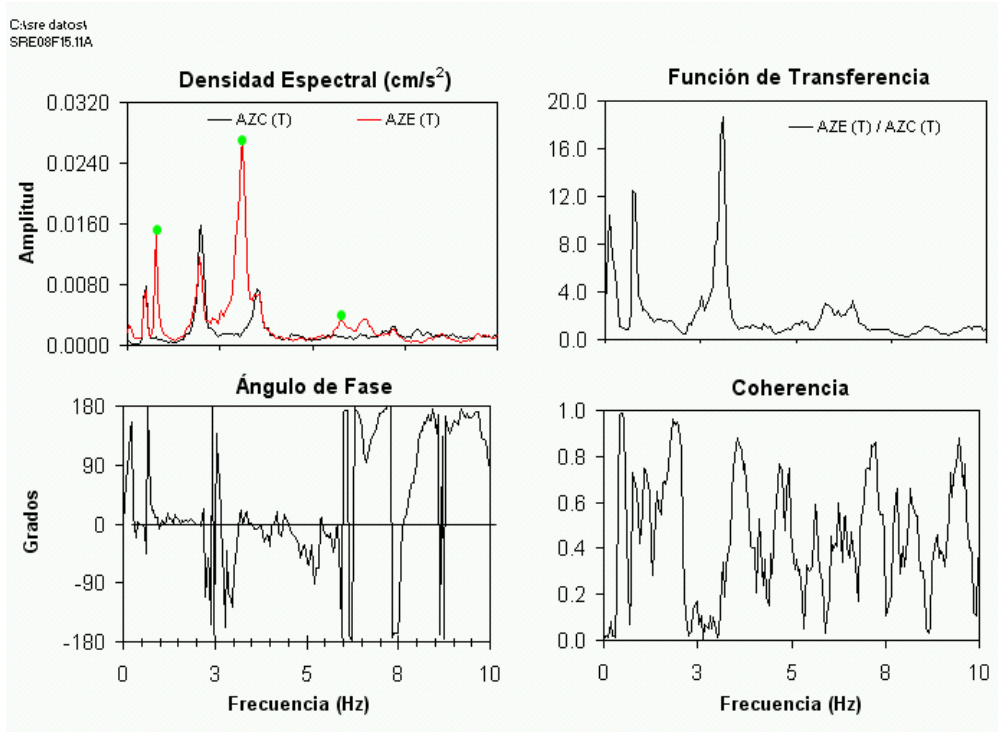


PRUEBA 07. ESPECTROS [AZ-C/N5-C] DIRECCIÓN T

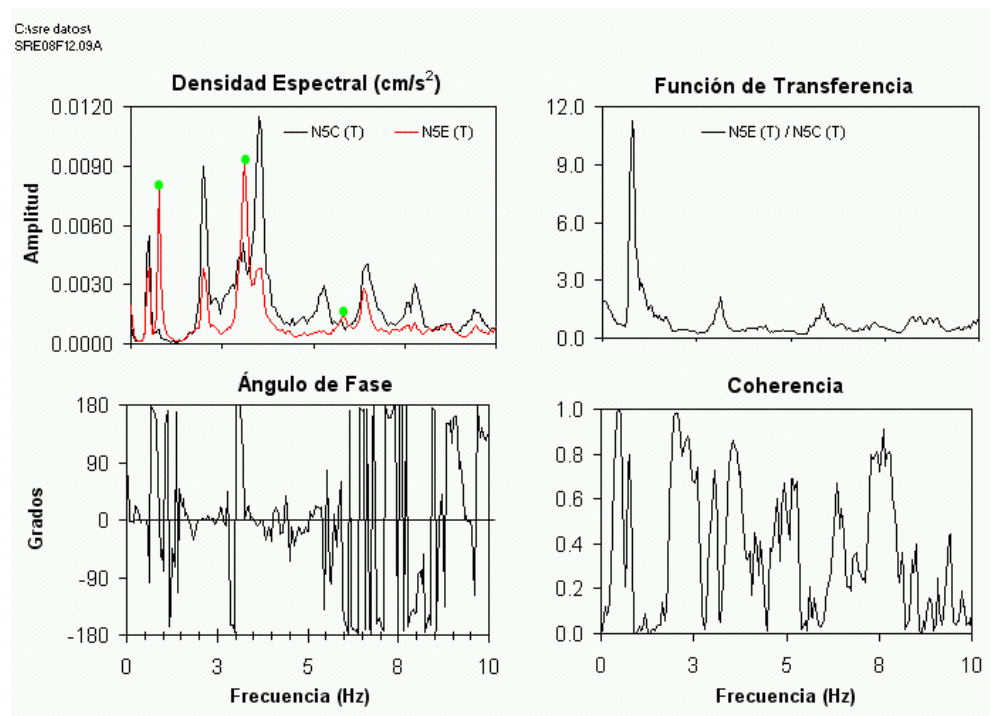


PRUEBA 07. ESPECTROS [AZ-C/N14-C] DIRECCIÓN T

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO



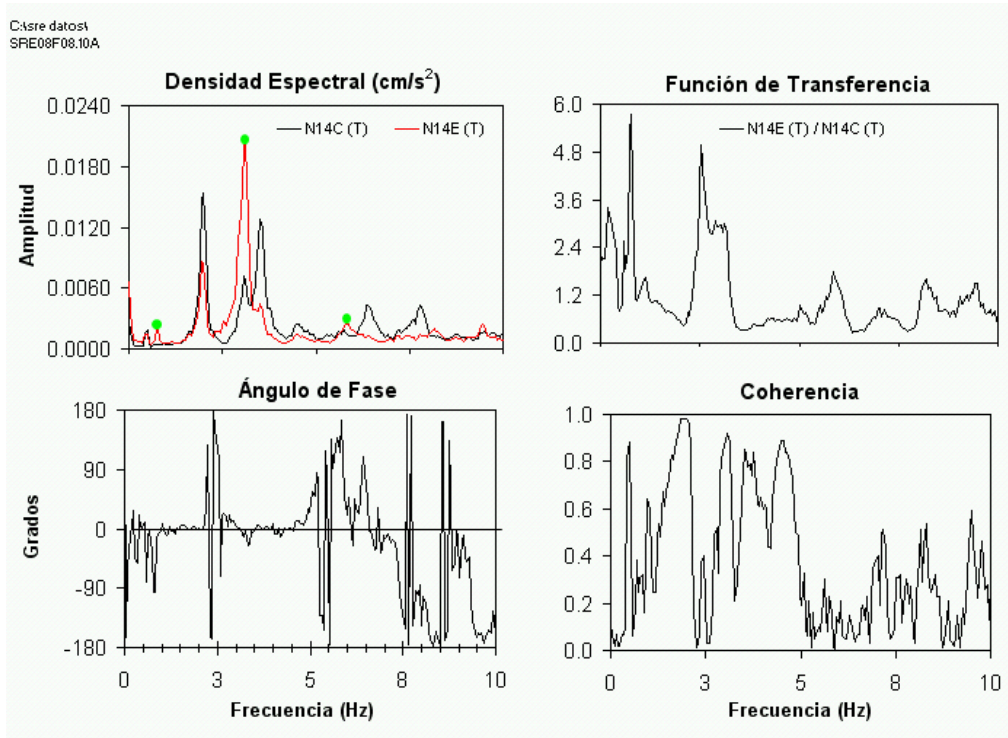
PRUEBA 08. ESPECTROS [AZ-E/AZ-C] DIRECCIÓN T



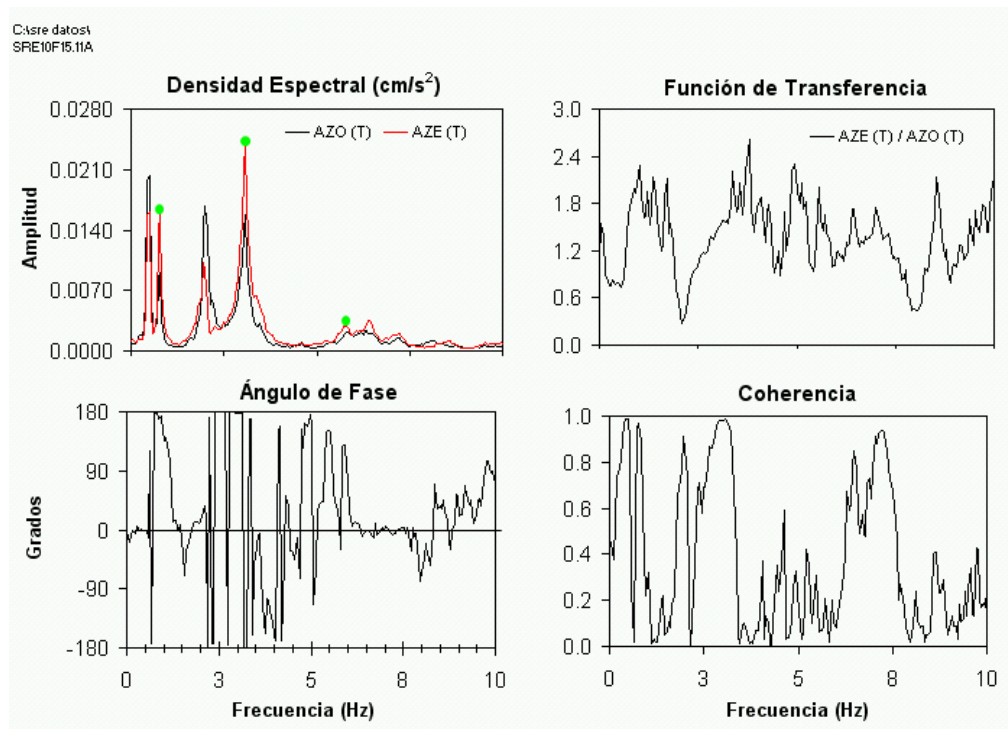
PRUEBA 08. ESPECTROS [N14-E/N14-C] DIRECCIÓN T



### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

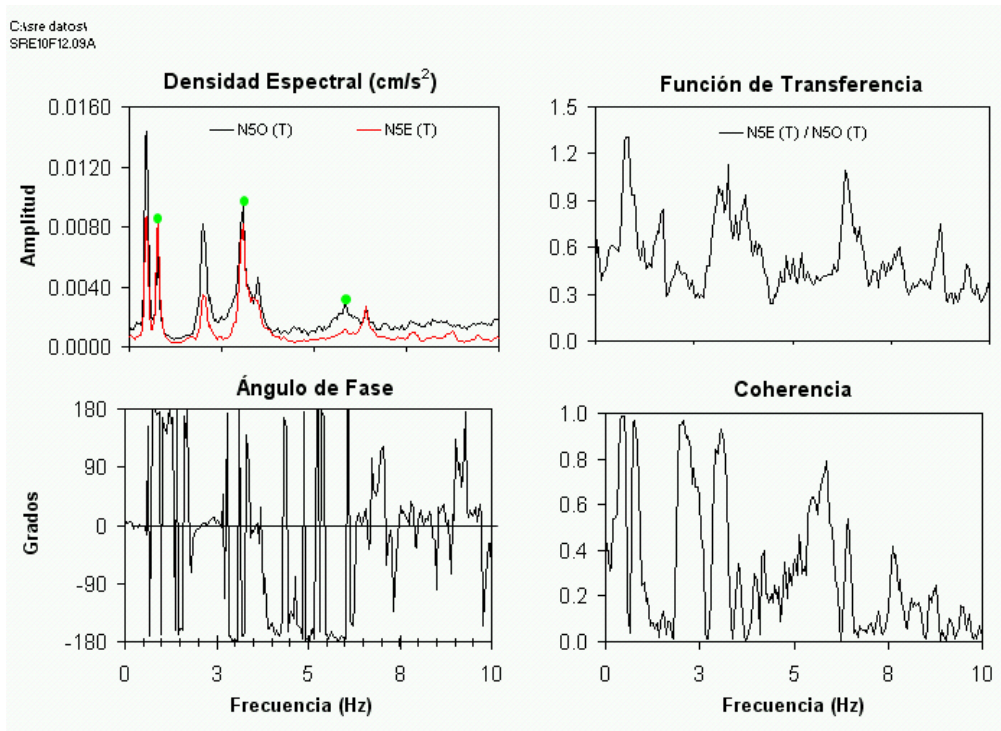


PRUEBA 08. ESPECTROS [N5-E/N5-C] DIRECCIÓN T

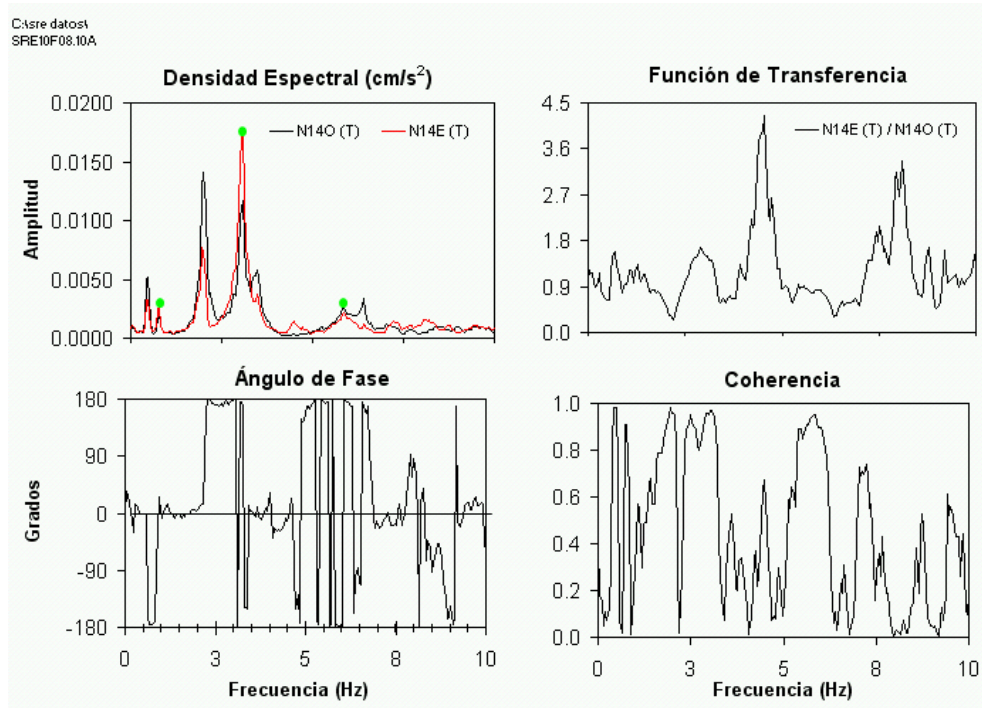


PRUEBA 10. ESPECTROS [AZ-E/AZ-O] DIRECCIÓN T

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO



PRUEBA 10. ESPECTROS [N14-E/N14-O] DIRECCIÓN T



PRUEBA 10. ESPECTROS [N5-E/N5-O] DIRECCIÓN T

Fig. 3.6 Espectros analizados

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

#### 3.2.2 Formas modales

El trazado de las formas modales tanto para traslación como para la torsión, una vez que han sido identificadas las frecuencias fundamentales correspondientes, se obtiene a través de un proceso simple. Con este propósito, se habrá que recurrir nuevamente a los registros analizados en el punto anterior, dependiendo del movimiento de interés.

A continuación se describe el procedimiento a seguir para obtener el trazado de dichas formas en cualquiera de las direcciones de interés:

- 1) Identificar las ordenadas (o aceleraciones) de cada nivel instrumentado, correspondientes a la frecuencia distinguida como fundamental del modo X, en la dirección de movimiento en estudio.
- 2) Dentro de ese conjunto de ordenadas, adoptar como referencia la aceleración del último nivel instrumentado.
- 3) Dividir la magnitud de la “aceleración de referencia” entre sí misma. Asimismo, obtener el cociente de cada una de las ordenadas restantes entre dicha “aceleración de referencia”.
- 4) Finalmente, elaborar una gráfica, colocando en el eje de las ordenadas las alturas o niveles de la estructura, y en el eje de las abscisas los resultados de los cocientes obtenidos del punto anterior.

A continuación se desarrolla un ejemplo con el fin de facilitar la comprensión del procedimiento anterior.

Remontémonos a los resultados de la Tabla 3.4, y pongamos particular atención en el valor de la frecuencia fundamental del primer modo en traslación, dirección T. Como se puede observar, dicho valor es igual a 0.488 (Hz), y de acuerdo con los datos recolectados en las pruebas de vibración ambiental, a ese valor, en el nivel de azotea, le corresponde una ordenada igual a 0.0082385 (cm/s<sup>2</sup>); en el nivel 14, una ordenada igual a 0.0057875 (cm/s<sup>2</sup>); en el nivel 5, una ordenada igual a 0.0019030 (cm/s<sup>2</sup>); y finalmente, en el nivel del sótano, una ordenada igual a 0.0003155 (cm/s<sup>2</sup>). Resumiendo lo anterior, podemos completar las cinco primeras columnas de la tabla resumen, Fig. 3.7, que a continuación se presenta.

PRIMER MODO					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Nivel	Gxx (cm/s <sup>2</sup> )	Gyy (cm/s <sup>2</sup> )	Gyy/Gxx
0,488	2,049	AZC	0.0082385	0.0082385	1.0000
		14C		0.0057875	0.7025
		5C		0.0019030	0.2310
		SC		0.0003155	0.0383

Fig. 3.7 Tabla resumen para el trazo de una forma modal

Tal como se explicó en el inciso 2) del procedimiento para el trazado de una forma modal, el valor de aceleración  $G_{xx}=0,0082385$  (cm/s<sup>2</sup>) fue el adoptado como referencia, pues corresponde al valor de aceleración del último nivel instrumentado para la frecuencia de análisis.



### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

Finalmente, para completar nuestra tabla de forma adecuada, en la columna seis de la misma se muestra el cociente entre cada una de las aceleraciones de los distintos niveles instrumentados con la frecuencia adoptada como referencia. Así pues, el primer valor de esta sexta columna se obtiene de dividir  $0.0082385 \text{ (cm/s}^2\text{)}$  entre sí mismo; el segundo valor de la misma de dividir  $0.0057875 \text{ (cm/s}^2\text{)}$  entre  $0.0082385 \text{ (cm/s}^2\text{)}$ ; el tercer valor de la misma de dividir  $0.0019030 \text{ (cm/s}^2\text{)}$  entre  $0.0082385 \text{ (cm/s}^2\text{)}$ ; y finalmente el último valor de la misma de dividir  $0.0003155 \text{ (cm/s}^2\text{)}$  entre  $0.0082385 \text{ (cm/s}^2\text{)}$ .

Ahora, considerando como ordenada la variable Nivel y como abscisa la variable  $G_{yy}/G_{xx}$ , podemos graficar los puntos obtenidos en la tabla anterior, y, mediante una interpolación, obtener el trazo de la forma modal que se desea.

Para nuestro ejemplo, el trazo de la forma modal quedaría de la siguiente manera (Fig. 3.8).

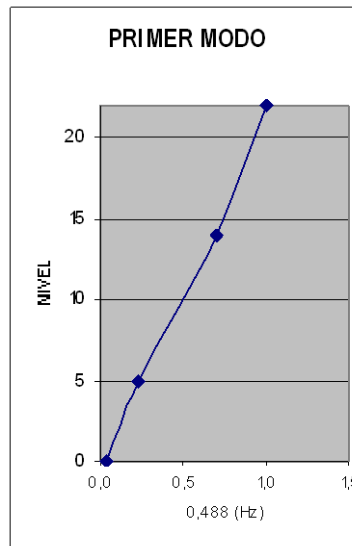


Fig. 3.8 Trazo ejemplo de forma modal

Siguiendo este mismo procedimiento, se obtuvieron los trazos de los tres primeros modos de vibrar de la Torre, en las 3 direcciones de estudio. A continuación (Fig. 3.9 - Fig. 3.11) se ilustran dichas configuraciones modales.

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

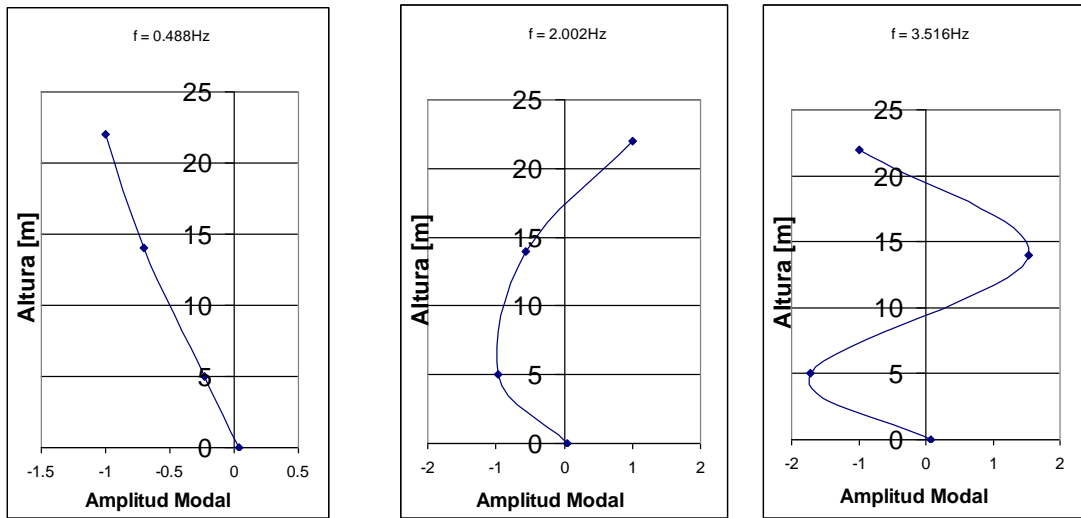


Fig. 3.9 Configuraciones modales para la dirección T

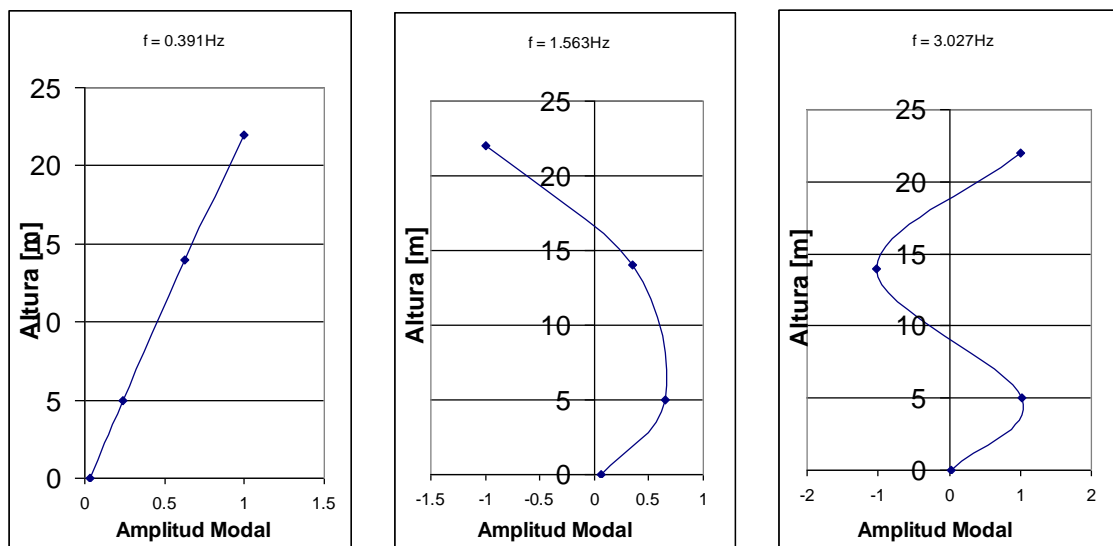


Fig. 3.10 Configuraciones modales para la dirección L

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

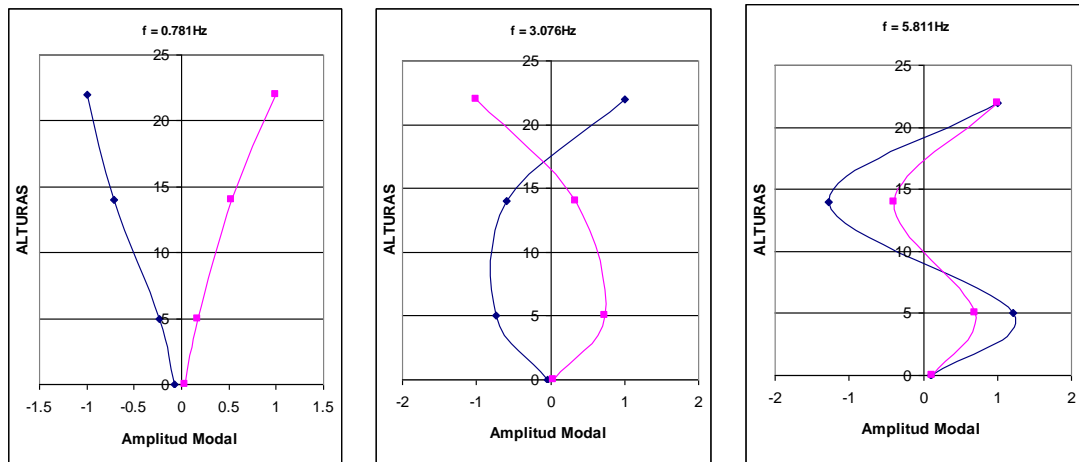


Fig. 3.11 Configuraciones modales para la Torsión

#### 3.2.3 Porcentajes de amortiguamiento

Para la determinación de los porcentajes de amortiguamiento se empleó el método del Factor de Amplificación Dinámico, que se encuentra dado por la siguiente expresión:

$$FAD = \frac{U_{DINÁMICO}}{U_{ESTÁTICO}} = \frac{U_{máx}}{U_{ESTÁTICO}}$$

Donde,

$U_{DINÁMICO}$  es el desplazamiento máximo de la estructura bajo cargas dinámicas.

$U_{ESTÁTICO}$  es el desplazamiento máximo de la estructura bajo cargas estáticas.

El desplazamiento máximo ocurre en la azotea de la estructura, mientras que el desplazamiento estático se encuentra asociado al movimiento del sótano o del terreno, dependiendo del sistema que se considere. El valor máximo del factor de amplificación dinámico se encuentra dado por:

$$FDA_{máx} = \frac{1}{2\xi}$$

Donde  $\xi$  es el porcentaje de amortiguamiento crítico.

Despejando  $\xi$  de la ecuación anterior, tenemos:

$$\xi = \frac{1}{2FDA_{máx}}$$

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

El factor de amplificación dinámico puede obtenerse empleando las funciones de transferencia [AZ-C/SOT-C] para un sistema de base empotrada, o [AZ-C/T] para un sistema donde interviene interacción suelo-estructura.

En nuestro estudio, fueron empleadas las señales de azotea centro y sótano centro derivadas de la prueba 07 para determinar los factores de amplificación dinámicos en direcciones T y L, para un sistema de base empotrada. Del mismo modo, para un sistema suelo-estructura, se recurrieron a las señales de azotea centro y terreno, provenientes de la misma prueba 07, para la determinación de los factores de amplificación dinámicos en ambas direcciones horizontales. Los resultados se muestran en la Fig. 3.12.

SISTEMA	DIRECCIÓN T		DIRECCIÓN L	
	FAD <sub>máx</sub>	AMORTIGUAMIENTO $\xi$ (%)	FAD <sub>máx</sub>	AMORTIGUAMIENTO $\xi$ (%)
BASE EMPOTRADA	22.310	2.24	22.851	2.19
SUELO-ESTRUCTURA	5.221	9.58	5.725	8.73

Fig. 3.12 Porcentajes de amortiguamiento de la Torre

### 3.3 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS CUERPOS BAJOS

#### 3.3.1 Frecuencias de vibrar

Cabe señalar, antes que nada, que para el caso de cuerpos rígidos, como lo son los Cuerpos (CUA) y (L), las pruebas de vibración ambiental para la determinación de parámetros dinámicos no son muy recomendables. La información que puede ser recavada de cuerpos estructurales de estas características muchas veces resulta poco clara, y por tanto con un alto grado de incertidumbre. Es por ello que, para estos casos, pruebas dinámicas como la Vibración Forzada arrojan mucho mejores resultados.

Advertido lo anterior, el análisis de los Cuerpos Bajos (CUA) y (L) únicamente se llevó a cabo con espectros generados por 4096 puntos. Efectuar un análisis paralelo con 2048 puntos, dadas las características de los cuerpos en estudio, resultaría ocioso y poco útil.

Entonces, para determinar las frecuencias fundamentales en traslación (direcciones T y L) del Cuerpo Bajo (CUA), se procedió a analizar las señales recogidas de las pruebas 12 y 14. Para la dirección T, se analizaron las densidades espectrales procedentes de azotea centro del cuerpo bajo en cuestión y sótano centro de la Torre, es decir, [AZC(CUA)/SC(TOR)]. Adicionalmente, con el fin de comprobar los resultados obtenidos, se recurrió a la prueba 14 para asociar, por un lado, el registro de la azotea Oeste de este cuerpo bajo con el registro del sótano Oeste de la Torre [AZO(CUA)/SO(TOR)], y por otro, el espectro de la azotea Este del mismo cuerpo bajo con el espectro del sótano Oeste de la Torre [AZE(CUA)/SO(TOR)]. Mediante este procedimiento, se identificaron cuatro valores de frecuencias significativas en esta dirección. Análogamente, para la dirección L fueron analizadas las mismas relaciones que para la dirección T, pero utilizando obviamente los espectros de los dispositivos dispuestos en esta otra dirección. Así, fue posible determinar tres frecuencias significativas en la dirección transversal.

Para el caso de las frecuencias relativas a la torsión, se analizaron las señales procedentes de las pruebas 13, 14 y 15. Con la prueba 13, relacionando el espectro de azotea centro, con el espectro de azotea oeste [AZO(CUA)/AZC(CUA)], ambos en dirección transversal. Mientras que con las pruebas 14 y

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

15, relacionando el espectro generado en el punto azotea oeste con el espectro registrado en el punto azotea este [AZO(CUA)/AZE(CUA)], en una y otra dirección. Así, fue posible identificar únicamente una frecuencia torsional para este cuerpo bajo.

A continuación se presentan los resultados (Fig. 3.13).

CUERPO BAJO (CUA)					
DIRECCIÓN T		DIRECCIÓN L		TORSIÓN	
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1.318 - 1.709	0.759 - 0.585	1.611	0.621	2.686 - 2.783	0.372 - 0.359
2.500 - 2.900	0.400 - 0.345	4.000 - 4.200	0.250 - 0.238		
6.300 - 6.600	0.159 - 0.152	4.600 - 4.900	0.217 - 0.204		
7.900 - 8.900	0.127 - 0.112				

Fig. 3.13 Frecuencias de vibrar del Cuerpo Bajo (CUA)

Por otro lado, para el caso del Cuerpo Bajo (L), el análisis de los espectros no resultó tampoco tarea sencilla.

Para determinar las propiedades dinámicas de este cuerpo, se emplearon los espectros recogidos de las pruebas 11, 12, 13 y 14. Para identificar las frecuencias de translación en ambas direcciones horizontales, de la prueba 11 se relacionó el espectro Azotea Centro, en una y otra dirección de este Cuerpo Bajo, con su correspondiente espectro del Terreno, esto es [AZC(L)/T]. Para corroborar los resultados obtenidos de este análisis, de la prueba 12 fueron vinculados los espectros de Azotea Centro con su respectivo espectro de Sótano Centro de la Torre, [AZC(L)/SC(TOR)].

Para la torsión, de la pruebas 13 y 14 se analizaron las densidades espectrales de los puntos Azotea Sureste y Azotea Noroeste, ambos del Cuerpo Bajo (L), así como las funciones de transferencia que relaciona a ambos registros, estos es, [AZSE(L)/AZNO(L)].

De esta manera se llegó a los siguientes resultados (Fig. 3.14).

CUERPO BAJO (L)					
DIRECCIÓN T		DIRECCIÓN L		TORSIÓN	
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1.709 - 1.855	0.585 - 0.539	1.660	0.602	5.566	0.180
3.000 - 4.000	0.333 - 0.250	2.700 - 3.700	0.370 - 0.270		
4.800 - 5.700	0.208 - 0.175				

Fig. 3.14 Frecuencias de Vibrar del Cuerpo Bajo (L)

#### 3.3.2 Porcentajes de amortiguamiento

Para el caso de los cuerpos bajos, el factor de amplificación dinámico se obtuvo empleando las funciones de transferencia [AZ-C/SOT-C] para un sistema de base empotrada, y [AZ-C/T], para un sistema donde existe interacción suelo-estructura.

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

Para el Cuerpo Bajo (CUA) se recurrieron a las señales de azotea centro de este cuerpo bajo y sótano centro de la Torre, derivadas de la prueba 12, para determinar los factores de amplificación dinámicos en direcciones T y L, para un sistema de base empotrada. Del mismo modo, para un sistema suelo-estructura se recurrieron a las relaciones entre las señales de azotea centro del mismo Cuerpo Bajo con sus correspondientes de terreno, todas ellas procedentes de la prueba 11. Los resultados se muestran en la Fig. 3.15.

SISTEMA	DIRECCIÓN T		DIRECCIÓN L	
	FAD <sub>máx</sub>	AMORTIGUAMIENTO $\xi$ (%)	FAD <sub>máx</sub>	AMORTIGUAMIENTO $\xi$ (%)
BASE EMPOTRADA	18.283	2.73	47.572	1.05
SUELO-ESTRUCTURA	4.927	10.15	14.585	3.43

Fig. 3.15 Porcentajes de amortiguamiento del Cuerpo Bajo (CUA)

Para el Cuerpo Bajo (L) se tomaron las señales de azotea centro de este cuerpo y sótano centro de la Torre, derivadas de la prueba 12, para determinar los factores de amplificación dinámicos en direcciones T y L, para un sistema de base empotrada. Del mismo modo, para un sistema suelo-estructura se recurrieron a las relaciones entre las señales de azotea centro del mismo Cuerpo Bajo con sus correspondientes de terreno, todas ellas procedentes de la prueba 11. Los resultados se muestran en la Fig. 3.16.

SISTEMA	DIRECCIÓN T		DIRECCIÓN L	
	FAD <sub>máx</sub>	AMORTIGUAMIENTO $\xi$ (%)	FAD <sub>máx</sub>	AMORTIGUAMIENTO $\xi$ (%)
BASE EMPOTRADA	6.562	7.62	21.011	2.38
SUELO-ESTRUCTURA	1.796	27.83	16.913	2.96

Fig. 3.16 Porcentajes de Amortiguamiento del Cuerpo Bajo (L)

#### 3.4 EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA (ISE)

Los datos que se incluyen en la tablas siguientes (Fig. 3.17 – Fig. 3.19), han sido tomados del trabajo de Tesis titulado “Determinación Experimental de los Efectos de Interacción Suelo-Estructura en dos edificios localizados en la Cd. de México” (CRUZ, Manuel, 2007), y se muestran con el objeto de visualizar la incidencia que tienen los efectos de Interacción Suelo-Estructura sobre las frecuencias fundamentales de vibrar de la Torre en estudio.

Cabe señalar que los datos fueron obtenidos mediante el Método de Luco, llevando a cabo dos análisis, con y sin Cuerpos Bajos.

DIRECCIÓN L					
PRUEBA	f <sub>1ident</sub> (Hz)	f <sub>n</sub> (Hz)	f <sub>c</sub> (Hz)	f <sub>1</sub> (Hz)	f <sub>1</sub> /f <sub>ident</sub>
TORRE SRE (SCB)	0.391	1.27	1.04	0.45	1.14
TORRE SRE (CCB)	0.391	1.13	1.05	0.45	1.16

Fig. 3.17 Efectos de Interacción Suelo-Estructura, Dirección L

### 3. CINEMÁTICA DEL CONJUNTO

DIRECCIÓN T					
PRUEBA	f <sub>ident</sub> (Hz)	f <sub>n</sub> (Hz)	f <sub>c</sub> (Hz)	f <sub>1</sub> (Hz)	f <sub>1</sub> /f <sub>ident</sub>
TORRE SRE (SCB)	0.488	1.39	0.87	0.65	1.34
TORRE SRE (CCB)	0.488	1.24	0.88	0.67	1.37

Fig. 3.18 Efectos de Interacción Suelo-Estructura, Dirección T

TORSIÓN				
PRUEBA	f <sub>ident</sub> (Hz)	f <sub>R</sub> (Hz)	f <sub>1</sub> (Hz)	f <sub>1</sub> /f <sub>ident</sub>
TORRE SRE (SCB)	0.781	4.48	0.79	1.02
TORRE SRE (CCB)	0.781	2.37	0.83	1.06

Fig. 3.19 Efectos de Interacción Suelo-Estructura, Torsión

Como se puede observar, según la relación  $f_1/f_{ident}$ , en la dirección L los efectos de interacción suelo-estructura resultan poco notables, aumentando la frecuencia fundamental en esta dirección en tan sólo el 14% para el análisis efectuado sin Cuerpos Bajos, y en 16% para el análisis con Cuerpos Bajos.

Por el contrario, si observamos la razón  $f_1/f_{ident}$  para la dirección T, dichos efectos resultan mayúsculos, incrementándose hasta en un 34% la frecuencia fundamental en el análisis que ignora a los cuerpos bajos, y en un 37% en el análisis con Cuerpos Bajos.

Finalmente, para el caso de la Torsión, los efectos de interacción son insignificantes, pues sólo se incrementa en 6% y 2% la frecuencia fundamental para el análisis con y sin Cuerpos Bajos, respectivamente.

## CAPÍTULO 4

### ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

En la actualidad existen mucho más estructuras de mayores dimensiones que en el pasado. Estas estructuras están siendo diseñadas para ser más flexibles y para resistir efectos ocasionados por cambios en la temperatura, ráfagas de viento intensas y sismos. Para una mejor comprensión sobre su comportamiento estructural, los ingenieros requieren de instrumentos exactos para resolver sus preocupaciones acerca de los movimientos angulares, desplazamientos y vibraciones de estas estructuras. Hoy en día, gracias al progreso tecnológico y en comunicación, existen dispositivos muy sofisticados con los cuales es posible obtener de forma confiable estos parámetros.

En este capítulo se describen detalladamente algunos de estos dispositivos.

#### 4.1 SISTEMAS GPS

##### 4.1.1 Generalidades

El Sistema de Posicionamiento Global ("Global Positioning System" - GPS) es un sistema de navegación compuesto de una flotilla de satélites puestos en órbita por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, y sus estaciones en tierra firme. Este sistema funciona continuamente en todas partes del mundo y está disponible a todos libre de cargos. El uso más común y de mayores aplicaciones del GPS es como localizador, con el cual es posible determinar, de forma automática, la posición exacta de un objeto de interés en Tierra. Los recientes avances en tecnología y comunicación han permitido extender este uso al monitoreo de estructuras civiles.

##### 4.1.2 Historia (UNIVERSIDAD DE FLORIDA – EXTENSIÓN IFAS)

El sistema GPS surgió debido a la necesidad de las fuerzas armadas de tener un sistema de navegación preciso y que funcionara en aplicaciones diversas. El desarrollo de la tecnología GPS descansa en progresos de ciencias físicas, de electrónica, de ciencias de materiales y de muchas otras, pero fue el desarrollo de dispositivos extremadamente precisos para medir el tiempo, relojes atómicos, junto con el progreso en la tecnología espacial, lo que en realidad hicieron posible el GPS. Relojes precisos son esenciales, porque el sistema GPS depende del cronometraje del tiempo que toma a señales de los satélites llegar a los receptores en tierra para determinar la posición, y los tiempos de viaje de estas señales son extremadamente cortos.

Medida de Tiempo con Precisión: Todos los átomos emiten ondas electromagnéticas cuando cambian su estado energético debido a la reorganización de sus electrones. Estas ondas se conocen como frecuencias resonantes y son extremadamente precisas y características de cada tipo de átomo. En 1944, I. I. Rabi, ganador del Premio Nobel de ese año por el desarrollo de la técnica de resonancia magnética para medir las frecuencias resonantes de los átomos, sugirió que debido a la precisión de las resonancias atómicas, ellas podrían ser usadas para crear relojes extraordinariamente precisos.



#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

En 1948, la Oficina Nacional de Normas en los Estados Unidos fabricó el primer reloj atómico. Este utilizaba moléculas de amoníaco, y el tubo de haz era un tubo de cobre envuelto sobre la esfera del reloj. Nunca fue usado ya que era menos fiable que un común reloj de cuarzo, con error de un segundo cada cuatro meses. El primer reloj atómico práctico fue construido en 1955 y ocupaba una sala completa del Laboratorio Nacional de Física, en Gran Bretaña. Utilizaba las frecuencias resonantes del cesio y tenía una precisión de un segundo en 300 años. En 1956 se fabricó una versión portátil, el "Atomichron", que podía moverse fácilmente de sitio a sitio.

Otras versiones del reloj atómico fueron creadas en poco tiempo. Estos nuevos dispositivos empleaban frecuencias resonantes del cesio, rubidio y el máser de hidrógeno, el cual utilizaba átomos de hidrógeno y moléculas de amoníaco. Los relojes basados de rubidio son más pequeños y económicos que los de cesio, pero son menos precisos.

En 1967, el segundo fue redefinido oficialmente como la duración de 9,192,631,770 ciclos del cesio-133. La norma de tiempo en los Estados Unidos es el reloj atómico NIST-7, en el Instituto Nacional de Normas y Tecnología en Boulder, Colorado, cuya precisión se estima ser un segundo en tres millones de años. Progresos tecnológicos continúan permitiendo el desarrollo de relojes atómicos más y más pequeños y económicos.

La Era Espacial: La semilla de la navegación por satélites fue sembrada casi al mismo tiempo que el comienzo de la era espacial. Cuando los soviéticos lanzaron el primer satélite en órbita terrestre, el Sputnik I, en 1957, investigadores en el Laboratorio de Física Aplicada de Johns Hopkins, en Baltimore, descubrieron que debido a que ellos sabían exactamente su posición en tierra, ellos podían calcular la posición exacta del satélite midiendo el corrimiento en la señal de radio transmitida por el Sputnik, según se acercaba y alejaba de ellos. El corrimiento en la frecuencia, conocido como el efecto Doppler, o el corrimiento Doppler, se conocía desde el año 1842, cuando Christian Doppler propuso que la frecuencia de ondas en movimiento con respecto a un observador, aparentemente aumenta según la fuente de las ondas se acerca al observador, y disminuye según se aleja. Sólo tomó un pequeño salto de intuición para concluir que lo opuesto también era posible; que uno puede determinar su posición exacta en la tierra si se conoce la posición exacta del satélite.

En 1965, la Marina Estadounidense desarrolló el sistema "Transit" debido a la necesidad de tener un sistema de navegación fiable para submarinos que podían mantenerse sumergidos por semanas y meses. El sistema estaba compuesto de seis satélites en órbitas polares. La posición era determinada usando el corrimiento Doppler. Los satélites transmitían una señal que incluía la hora e información sobre su órbita a la unidad receptora, la cual calculaba su posición usando el corrimiento de la señal y la información temporal y de posicionamiento de la señal sin corrimiento Doppler. Usando este sistema, se podía determinar la posición en dos dimensiones en un tiempo de 6 a 10 minutos, con una precisión de 25 metros.

Durante la década de los 60s, varias ramas de las fuerzas armadas trabajaron en sus propias versiones de sistemas de navegación por satélite. En 1973, el Departamento de Defensa ordenó a las diferentes ramas cooperar en el desarrollo de un sistema unificado. El resultado fue el Sistema de Posicionamiento Global "Navstar", el cual depende de satélites con relojes atómicos a bordo (un concepto que fue probado con anterioridad en un programa de la Marina llamado "Timation"), estaciones terrestres que controlan el sistema y posicionadores (receptores) para el usuario que no dependen de dichos relojes.

#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

El primer satélite del sistema GPS fue lanzado en 1978. Comenzando 1989, una segunda generación de satélites (Satélites de Bloque II) fue puesta en servicio. El sistema alcanzó operación plena en el año de 1995. En el presente, la flotilla de satélites GPS se compone de por lo menos 24 satélites Bloque II (Fig. 4.1). En 1983, luego de que una aeronave Coreana de pasajeros fue derribada por los soviéticos al penetrar en su espacio aéreo debido a errores de navegación, el presidente Ronald Reagan declaró que el sistema GPS estaría disponible para usos civiles luego de que se completara.

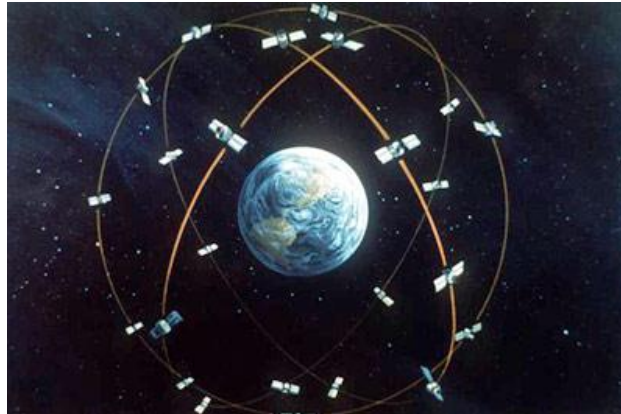


Fig. 4.1 Constelación actual de satélites GPS

Debido a que el sistema GPS fue desarrollado principalmente para aplicaciones militares, algunos errores de cronometraje (disponibilidad selectiva, "selective availability" - SA) fueron aplicados a las señales del GPS, lo cual limitaba la precisión de posicionadores no militares. Durante la guerra del Golfo en 1991, el sistema GPS se había hecho tan indispensable, que no existían suficientes receptores militares para las tropas, por lo cual el Departamento de Defensa tuvo que usar posicionadores civiles y eliminar temporalmente la SA. La SA global fue eliminada permanentemente en el año 2000, pero el servicio militar Estadounidense aún puede introducir errores en las señales en extensiones geográficas limitadas.

##### 4.1.3 Principio de funcionamiento (UNIVERSIDAD DE FLORIDA – EXTENSIÓN IFAS)

El sistema GPS depende de que cada satélite de la constelación transmita su posición exacta, además de una señal de tiempo extremadamente precisa a los receptores en tierra. Dada esta información, los receptores GPS pueden calcular su distancia al satélite y, combinando la información de cuatro de estos últimos, el receptor puede calcular su posición exacta usando un proceso llamado trilateración.

Trilateración: Si uno conoce la distancia a un satélite, uno sabe que su posición se encuentra sobre una esfera con centro en el satélite y con un radio igual a la distancia (Fig. 4.2A).

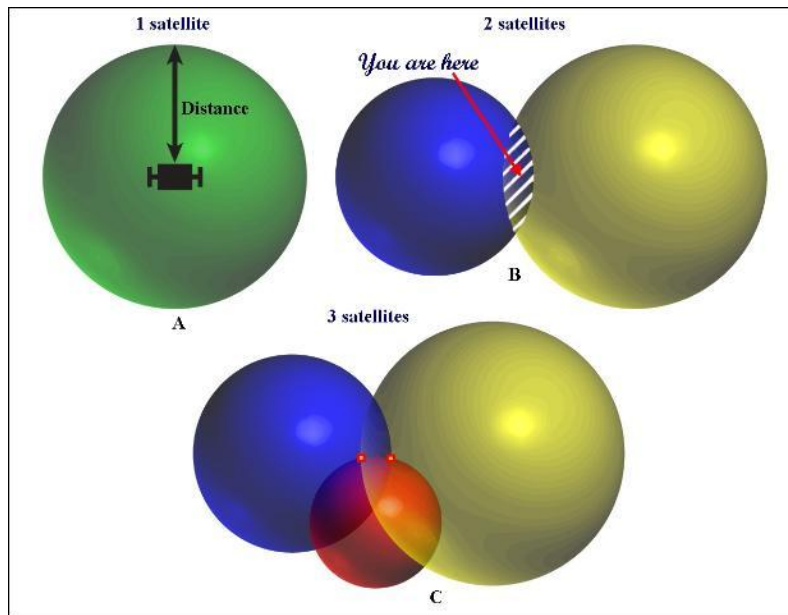


Fig. 4.2 Calculando la posición usando tres satélites

Si uno obtiene la misma información de un segundo satélite, se puede estrechar su posible posición al área que tienen en común ambas esferas (Fig. 4.2B). Si se añade información de un tercer satélite, se puede precisar aún más la posición a los dos puntos donde las tres esferas cruzan (Fig. 4.2C). Para determinar cual de los dos puntos representa nuestra posición actual, podemos tomar una cuarta medida, pero generalmente uno de los dos puntos obtenidos de los tres satélites representa una posición absurda, por ejemplo, en el espacio abierto, o con movimiento imposiblemente rápido, por lo cual se puede eliminar sin necesidad de la cuarta medida. Sin embargo, la cuarta medida aún es necesaria, lo cual se explica a continuación.

El cuarto satélite: La distancia a los satélites se calcula midiendo el tiempo que toma a la señal llegar del satélite al receptor (distancia = velocidad x tiempo). Debido a que las señales de radio viajan a la velocidad de la luz (186,000 millas por segundo), los tiempos de tránsito de satélites a receptores son extremadamente pequeños, por lo cual se necesitan dispositivos de cronometraje extremadamente precisos para medirlos con exactitud. Tales dispositivos son los llamados relojes atómicos, los cuales se encuentran alojados dentro de cada satélite. Sin embargo, los receptores no contienen relojes atómicos, lo cual introduce errores en ese lado del sistema, y aún errores de cronometraje pequeños pueden resultar en grandes errores de posición. Aquí es donde entra en juego la cuarta medida.

Si las cuatro medidas son exactas, la esfera definida por la cuarta medida debe cruzar las otras tres en un punto que representa la posición actual. Si existen errores, la cuarta esfera no cruzará a todas las otras. Debido a que el error del receptor es el mismo para las cuatro medidas, un ordenador en el receptor puede calcular una corrección que haga que las cuatro esferas crucen, y aplicar la corrección a las medidas para obtener la posición correcta.

La cuarta medida también permite al sistema calcular una posición en tres dimensiones, que incluye no sólo latitud y longitud, sino también altitud. Las medidas de altitud, sin embargo, se reportan con referencia a un modelo matemático de la Tierra para poder expresarlas en relación a un dato

#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

convencional (normalmente el nivel del mar). El modelo es sólo una aproximación, por lo cual las medidas de altitud son menos precisas que las de latitud y longitud, y los errores son diferentes en distintas partes del planeta.

Otros errores: Otros errores tienen influencia en las medidas de las señales de los satélites GPS, entre los cuales se encuentran la interferencia atmosférica y los reflejos de obstáculos en tierra, como árboles y edificios. Se utilizan varios métodos como la corrección por frecuencia doble, filtros de señales y modelos matemáticos para disminuir sus efectos.

Aumento en la precisión: Nuevos métodos están en desarrollo continuo para hacer los sistemas GPS más precisos y confiables. En el presente, los más comunes son el GPS diferencial (DGPS) y el Sistema de Aumento en Áreas Amplias ("Wide Area Augmentation System" - WAAS). El DGPS básicamente utiliza estaciones instaladas en tierra, cuya ubicación se conoce con precisión, para recibir las señales de los satélites, aplicarles correcciones (como se conoce su ubicación exacta, las estaciones pueden determinar los errores en las señales) y diseminarlas de modo que receptores adecuadamente equipados las puedan recibir y usar para corregir sus propias señales. El WAAS es un sistema de satélites secundario desarrollado por la Administración Federal de Aviación que no sólo transmite señales de GPS, sino también monitorea y reporta el estado de los satélites de GPS y transmite información de DGPS. Este sistema sólo está disponible sobre Norteamérica y el Océano Pacífico.

La mayoría de los posicionadores GPS disponibles hoy en día poseen una precisión de 10 metros o menos. Uso de técnicas avanzadas, como las ya descritas, pueden aumentar la precisión a un metro o menos. Aplicaciones especializadas que utilizan técnicas sofisticadas de manipulación de datos y equipos de primera clase, pueden obtener precisiones medidas en centímetros o milímetros.

##### 4.1.4 Uso del GPS como sincronizador de tiempo

Una de las características principales del sistema GPS, como ya se ha comentado, es su extremada precisión en lo que se refiere al tiempo. Para poder obtener con precisión nuestra posición, los satélites deben tener en todo momento una referencia exacta de la hora para poder calcular su posición y saber el propio receptor GPS su ubicación. Para ello, y como ya se comentó, los satélites del GPS usan relojes atómicos con precisiones de apenas una variación de segundos cada 1 000 000 de años. Por todo ello, en muchas aplicaciones se usa el GPS como sistema muy preciso para obtener la hora o como un cronómetro fiable. Por ejemplo, el GPS puede ser utilizado para sincronizar múltiples instrumentos de medición desplegados en campo, o para cualquier experimento que requiera sincronización precisa. La tecnología GPS también se está empleando para sincronizar torres de comunicación celular, redes de telecomunicación y muchas otras. El primer cronometraje por GPS se realizó en los juegos olímpicos celebrados en el año 2000. Este tipo de dispositivo GPS (Fig. 4.3) se caracteriza porque no da la posición, sino simplemente proporciona la hora de manera precisa.

#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---



Fig. 4.3 GPS como sincronizador de tiempo

Actualmente, cuando se lleva a cabo la instrumentación sísmica de alguna estructura, uno de los instrumentos de medición, aquel que opera como maestro, es equipado con un dispositivo GPS, el cual sirve como referencia de tiempo para todos los equipos que conforman la red. De esta manera, al dispararse el registro del instrumento que funge como maestro, el resto de los equipos también se activan y comienzan sus lecturas, obteniéndose así registros en sincronía.

##### 4.1.5 Uso del GPS como sensor de desplazamiento (CLEMENT, Ogaja, 2006)

El monitoreo de estructuras civiles demanda mediciones de desplazamientos altamente precisas proporcionadas por un sistema confiable en tiempo real. El sistema GPS puede ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones relativas al monitoreo de desplazamientos. La disminución del costo del hardware GPS, junto con el incremento de la confianza hacia esta tecnología, facilita la práctica de estas aplicaciones. Además de las cortinas en presas, otro tipo de estructuras civiles, tales como puentes o edificios, pueden ser monitoreadas empleando tecnología GPS. Las medidas de deformación obtenidas mediante el uso del GPS pueden ser continuas y automáticas, efectuadas en condiciones diversas de clima, y proporcionan resultados de posicionamiento en tres dimensiones y en tiempo real, o muy próximo al real. Los registros continuos proporcionados por los satélites GPS, usando receptores en tierra y telemetría eficaz, pueden ser empleados para monitorear el estado de estructuras ingenieriles y, también, pueden ser útiles para los aspectos de seguridad pública relativos con la ingeniería civil, estructural y sísmica.

Durante la última década, los usuarios del GPS han desarrollado la tecnología capaz de satisfacer los requisitos más rigurosos para monitorear, en tiempo real, el comportamiento dinámico de estructuras de periodo largo, tales como edificios elevados, puentes con grandes claros y torres, durante solicitaciones sísmicas, de viento o tráfico. La medición dinámica de los desplazamientos relativos de una estructura, es ahora posible empleando las técnicas de posicionamiento cinemático en tiempo real (real-time kinematic, RTK), desarrolladas para muestrear a tasas de 10-20 Hz (o mayores, hasta 100 Hz), con una exactitud de  $\pm 1$  cm horizontalmente y  $\pm 2$  cm verticalmente. Con estos avances en tecnología, y gracias al progreso en la capacidad de muestreo, ahora es posible satisfacer la necesidad de información demandada por la comunidad de ingeniería estructural sobre los desplazamientos de una estructura civil, acaecidos en tiempo real. Además, con los futuros avances en la tecnología GPS y progresos en la capacidad de muestreo, próximamente será también posible monitorear en forma confiable estructuras de periodo corto.

#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

La mayor parte del trabajo inicial para obtener estos logros, ha sido efectuado con esfuerzo de investigadores aeroespaciales atmosféricos. Ahora, después de una década en la que gran cantidad de investigadores exitosamente comprobaron la viabilidad técnica del uso de la tecnología GPS para esta aplicación, el interés se concentra sobre la integración del equipo GPS a los sistemas ya en operación. Hoy en día, un notable número de investigadores se encuentra rutinariamente estudiando la integración del equipo GPS con otros dispositivos de medición (acelerómetros, instrumentos de fibra óptica, pseudolitos, etc), con el fin de aprovechar las ventajas y de superar las limitaciones de cada tecnología. Es posible mencionar algunos ejemplos de sistemas operacionales en tiempo real, con los cuales se demuestra la importancia de la tecnología GPS en la medición del comportamiento dinámico de grandes estructuras ingenieriles.

Se puede afirmar que, la práctica de monitorear dinámicamente estructuras civiles empleando tecnología GPS, ha estado motivada por las siguientes razones principales: (1) las mediciones de desplazamientos bajo condiciones estáticas y dinámicas son más fáciles de efectuar con un sistema GPS; (2) debido al fácil y económico acceso al hardware y software diseñados para un sistema GPS; (3) portabilidad del equipo de campo; (4) colaboración internacional; y (5) mejoramiento en la exactitud y capacidad de muestreo de los dispositivos GPS.

##### Trabajo Pionero: 1993-1997

El primer trabajo sobre monitoreo dinámico de estructuras civiles, empleando GPS, se inició a mediados de la década de los 90s, poco después del surgimiento de la técnica RTK-GPS. Anteriormente, algunos estudios limitados sobre monitoreo estructural, empleando esta tecnología, fueron realizados valiéndose de observaciones estáticas post-procesadas y de programas comerciales disponibles en aquel entonces. Tales estudios se encontraban limitados para detectar deformaciones lentas suscitadas en estructuras de gran magnitud, tales como presas y diques.

##### Edificios Altos y Torres

Una prueba de campo sobre la Torre Calgary (160 m de altura), Alberta, Canadá, en 1993, es probablemente la prueba más temprana del uso de la tecnología GPS en el monitoreo dinámico de una estructura elevada, ante carga por viento. En tal experimento, los movimientos de la torre (0.36 Hz) fueron causados por vientos con velocidad fluctuante entre 60 y 100 km/h.

En 1996, un experimento similar fue llevado a cabo en China. Empleando tecnología GPS, se midió el desplazamiento y la frecuencia de la Torre Diwang (68 niveles y 325 m de altura), ubicada en la ciudad de Censen, bajo la carga de viento generada por el Tifón York, el cual ha sido el más fuerte en la región desde 1983. Con los análisis posteriores de la información recolectada con el GPS, se pudo detectar la amplitud de la deformación y la frecuencia de la torre (0.17 Hz) debidas a los vientos de 90 km/h causados por el tifón.

En el estado de California, debido al latente riesgo de ocurrencia de sismos, algunos investigadores de la US Geological Survey (USGS) demostraron con éxito la viabilidad del uso de la tecnología GPS, para monitorear la respuesta dinámica de edificios durante eventos de esta índole.



##### Puentes Colgantes

En 1996, Ashkenazi reportó el monitoreo en tiempo real, empleando equipo GPS, del Puente Humber (1410 m de longitud), ubicado sobre la costa Este de Inglaterra. En Estados Unidos, Duff y Hyzak fueron probablemente los primeros en supervisar, mediante el uso de tecnología GPS, el movimiento de un puente colgante bajo carga inducida por viento y tráfico. Ellos generaron un perfil de la superficie de la cubierta del Puente Hartman, en Houston, Texas, y del Puente Blackwater River, en Florida, basados en mediciones cinemáticas GPS. Por la misma fecha, Ashkenazi demostró que con la técnica RTK-GPS era posible monitorear los movimientos de grandes puentes en tiempo real. Exitosamente, algunas pruebas fueron llevadas a cabo sobre puntos estratégicos de tres puentes diferentes en el Reino Unido: el puente Humber, el puente Nottingham Clifton y el puente Dee. Desde entonces, algunos investigadores de la Universidad de Nottingham, han continuado con otra serie de pruebas. En Australia, Watson y Coleman (1998) midieron el movimiento dinámico del puente Batman, en Tasmania, usando dispositivos GPS.

Avances Tecnológicos en Receptores GPS: de 10 a 100 Hz.

El monitoreo dinámico, empleando el sistema GPS, demanda el mejor hardware y software, así como sobresalientes metodologías de innovación. Los receptores geodetic, con un costo que oscila entre los US\$10,000 y US\$20,000, se encuentran fácilmente disponibles en el mercado. Alrededor de 100 fabricantes conforman el mercado de receptores GPS, y revistas, tales como: *GPS World*, *Inside GNSS* y *Professional Surveyor*, frecuentemente publican información sobre los últimos modelos de receptores de esta tecnología. En términos de exactitud, existe un notable mejoramiento en algunos modelos de receptores (por ejemplo, el modelo Leica MC1000 poseía una resolución de 1 cm + 2 ppm, con una tasa de muestreo de 10 Hz, en el año de 1997; un modelo similar, MC500, poseía ya para el año 2004 una resolución de milímetros, 5 milímetros + 2.0 ppm).

Históricamente los acelerómetros, y un tanto los anemómetros, han sido los instrumentos utilizados para el monitoreo de la respuesta de estructuras ingenieriles. La razón por la cual los acelerómetros han sido ampliamente usados es porque, hasta hace poco tiempo, no existían métodos eficientes o viables para medir directamente los desplazamientos durante eventos extraordinarios, tales como sismos o fuertes vientos.

Los desplazamientos relativos, parámetros clave para la determinación de las condiciones de carga y esfuerzo de las estructuras, son difíciles de medir en forma directa. A través del proceso de doble integración aplicado a los registros de aceleración, es posible arribar a los valores de los desplazamientos. Sin embargo, y a pesar de que los acelerómetros pueden registrar en tasas por encima de los 1000 Hz, dicho proceso no se automatiza fácilmente debido a la naturaleza del procesamiento de la señal, la cual requiere de la selección de filtros y corrección de línea base (las constantes de integración), y del uso del juicio cuando en los registros existen anomalías. En consecuencia, este proceso puede conducir a errores en el cálculo de las velocidades y los desplazamientos. Este problema se agudiza en el caso de la determinación de los desplazamientos permanentes. Es dudoso el hecho de que las medidas detectadas por un acelerómetro puedan ser utilizadas para determinar los desplazamientos permanentes de una estructura a nivel de centímetro; e incluso si esto fuese posible, es cuestionable si pudiesen obtenerse en tiempo real. Es decir, el nivel de exactitud de los desplazamientos calculados a través de los registros de aceleración no ha sido verificado extensamente mediante observaciones.

#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

A diferencia de los acelerómetros, los dispositivos GPS de alta resolución miden directamente los desplazamientos; sin embargo, hasta hace poco tiempo, su tasa máxima de muestreo era de 10-20 Hz. Las características complementarias de ambas tecnologías son importantes para la integración de un sistema GPS-acelerómetro. Además, los avances en la capacidad de muestreo de un dispositivo GPS, permitirán a los investigadores ampliar la frecuencia a medir mediante la aproximación integrada.

Mientras que los receptores GPS de 10-20 Hz han sido utilizados por algún tiempo como sismómetros GPS, algunos fabricantes han introducido receptores con mucha mayor capacidad de muestreo (hasta de 100 Hz). La incorporación de los receptores GPS de 50-100 Hz es un desarrollo relevante para el monitoreo estructural basado en estos dispositivos, pues aumenta el ancho de banda de la frecuencia del GPS comparada a la de los acelerómetros. Las pruebas iniciales han demostrado que tales receptores son absolutamente capaces de funcionar tanto como los receptores de 10-20 Hz. Por ejemplo, Roberts han publicado resultados de línea base cero y de pruebas actuales sobre puentes. Un artículo publicado por el Instituto de Geofísica y Física Planetaria (IGPP) de la Universidad de California, en San Diego, describe una prueba con receptores GPS de 50Hz sobre un edificio de 7 niveles. Genrich y Bock también confirman que el posicionamiento instantáneo usando receptores GPS del tipo geodetic, es comparable en exactitud con un muestreo más bajo de frecuencia.

Pruebas de Campo y Algunas Innovaciones: 1997-2006

Simultáneo a los ya citados desarrollos en la tecnología de los receptores GPS, fue el incremento del número de investigadores que comenzaron a publicar sus estudios de investigación. Lo que a continuación se comenta es un resumen de las principales pruebas de campo y actividades de investigación que han tenido lugar en la última década.

Edificios Altos y Torres

Desde la ocurrencia de los sismos de Northridge (17 de enero de 1994,  $M_w=6.7$ ) y de Kobe (17 de enero de 1995,  $M_w=6.8$ ), los estudios de susceptibilidad a daño de grandes edificios han llegado a cobrar mayor interés, principalmente debido a la gran cantidad de inmuebles de estructura metálica que sufrieron daños durante estos eventos. En el área de Los Ángeles, por ejemplo, debido al movimiento telúrico de Northridge, cientos de edificios de estructura metálica tuvieron que ser examinados, asistidos, y reparados o reestructurados. Previamente a la ocurrencia del evento, sólo tres de estos edificios habían sido instrumentados. Desafortunadamente, de esta tercera estructural se obtuvo información muy limitada sobre su aceleración para poder llevar a cabo la interpretación de los daños generales. Información adicional, recavada en tiempo real, o en tiempo cercano al real, podría haber sido de gran utilidad para los estudios y proyectos de reparación y reestructuración efectuados posteriores al evento. Por lo tanto, existe una gran necesidad de un mejor y más extenso monitoreo de estructuras de elevada altura. En los primeros estudios efectuados por investigadores de la USGS, en California, se han discutido conceptos, así como la factibilidad técnica del uso de la tecnología GPS para el monitoreo de la respuesta de grandes edificios ante eventos sísmicos. Los estudios de simulación efectuados sobre un modelo a escala demostraron la viabilidad técnica, y documentos recientes han tratado la instalación de receptores GPS sobre edificios de gran altura. Por ejemplo, Celebi y Sanli (2002) describen un trabajo en el cual algunos receptores GPS fueron montados sobre dos edificios de 44 niveles en la Ciudad de Los Ángeles, y sobre un edificio de 34 niveles en la Ciudad de San Francisco. Dichos edificios fueron simultáneamente equipados con acelerómetros para permitir la comparación de los desplazamientos registrados con los instrumentos GPS, con aquellos derivados de la doble integración de las mediciones de aceleración. Los resultados



#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

demonstraron el gran potencial que poseen los instrumentos GPS para el monitoreo de los desplazamientos, inducidos por sismos o viento, de una estructura.

En Singapur, el edificio Plaza República ha estado instrumentado con acelerómetros y anemómetros desde 1995, con el fin de registrar su respuesta ante eventos sísmicos y fuerzas inducidas por viento. A pesar de que la ciudad se encuentra relativamente distante de las zonas sísmicas de Indonesia, y que no es afectada por fuertes sistemas ciclónicos, el edificio Plaza República (280 m de altura) fue construido con características a prueba de sismos, y diseñado con un perfil aerodinámico. En febrero de 2000, un experimento piloto fue realizado para comprobar la factibilidad de incorporar instrumentos GPS al existente sistema de monitoreo. Con el sistema ya complementado se pudo capturar exitosamente la respuesta del edificio ante vientos de elevado impacto. En otro documento, Brownjohn et al. (2003) abordaba los desafíos de implementar dispositivos GPS y de fibra óptica para el continuo monitoreo del edificio. Problemas tales como recalentamiento, fallas eléctricas, etc, impidieron la operación continua del sistema GPS. No obstante, con la información recolectada a principios de 2003 y durante la primera mitad de 2004, se demostró que el sistema GPS es capaz de registrar la respuesta dinámica del inmueble.

En Malasia, un estudio fue efectuado sobre el edificio de mayor altura de Penang, Plaza KOMTAR (245 m de altura, 65 niveles), en dos distintas épocas: en octubre de 2000 y en febrero de 2001. Un experimento posterior fue conducido sobre la Torre de Negocios Sarawak (30 niveles), en Johore, durante el mes de diciembre de 2004. En las pruebas estáticas, ambos estudios demostraron la estabilidad de las estructuras, sin embargo, al no haberse suscitado eventos extraordinarios, tales como sismos o episodios de fuertes vientos, fue imposible realizar pruebas de estabilidad dinámica. No obstante, a través de estos estudios fue posible demostrar la factibilidad del uso de los equipos RTK-GPS para el continuo monitoreo de una estructura.

Como parte de un proyecto de investigación en colaboración, investigadores de la Universidad Politécnica de Tokio y de la Universidad del Sur de Gales, Australia, han descrito una serie de pruebas, empleando dispositivos GPS, acelerómetros y sensores de fibra óptica, realizadas sobre una torre de estructura metálica de 108 m de altura, que se yergue sobre la capital de Japón. Datos recientes acerca de la respuesta de la estructura han sido recolectados durante tifones y sismos, por ejemplo, el tifón No. 21 acaecido el 1º de octubre de 2002 y el sismo de magnitud  $M_s=7.0$  ocurrido el 26 Mayo de 2003, y analizados en ambos dominios, tiempo y frecuencia, para determinar las deformaciones inducidas por ambos fenómenos. Las ventajas de contar con un equipo integrado por distintos dispositivos han sido destacadas.

Kijewski y Correa describieron una configuración de dispositivos GPS, así como algunas pruebas de validación ejecutadas sobre tres edificios de gran altura en la ciudad de Chicago. En esta tercia estructural fueron montados dispositivos GPS de gran exactitud, acelerómetros y anemómetros. Las respuestas observadas fueron posteriormente comparadas con las predicciones fundamentadas en las pruebas del túnel de viento y, también, con las predicciones desprendidas de los modelos analíticos desarrollados en la fase de diseño. Siguiendo estas pruebas iniciales, un sistema de monitoreo de gran escala ha estado en operación desde mediados de 2002.

Durante noviembre de 2005 y enero de 2006, algunos investigadores del Instituto de Geofísica y Física Planetaria (IGPP) de la Universidad de California, en San Diego, instalaron 7 receptores GPS de 50 Hz sobre un edificio de 7 niveles. Los desplazamientos del edificio, provocados mediante la excitación de una mesa vibradora, fueron instantáneamente comparados con aquellos derivados de los registros de

aceleración, así como con los movimientos sísmicos simulados. Los resultados demostraron aproximaciones consistentes, a niveles de milímetros, en los desplazamientos, así como también se verificó la utilidad de los dispositivos GPS de elevada resolución para el monitoreo de estructuras. Este experimento fue reportado en las noticias publicadas por el IGPP en enero de 2006.

##### Puentes Colgantes

Investigadores del IESSG, de la Universidad de Nottingham, han permanecido activos, a partir de las primeras pruebas comandadas por Ashkenazi (1996), en el monitoreo de puentes colgantes localizados dentro del Reino Unido. Han habido numerosos estudios en los que se han integrado desde dispositivos GPS con acelerómetros, hasta equipos GPS con pseudolitos. El trabajo en colaboración con investigadores de la Universidad del Sur de Gales, Australia, ha desencadenado otros estudios sistemáticos referentes a la integración y las metodologías de un sistema conformado por GPS y pseudolitos. Las pruebas ejecutadas sobre el puente colgante Wilford en Nottingham, Reino Unido, y sobre el puente colgante Parsley Bay en Sydney, Australia, han demostrado que los pseudolitos representan una solución en situaciones en las que se cuenta con una pobre geometría de dispositivos GPS.

En 1999, el Departamento de Transporte de California (Caltrans) comandó un proyecto basado en equipos GPS sobre los puentes Vincent Thomas, en Los Ángeles, y los puentes Bay y Golden Gate, en San Francisco, para evaluar la factibilidad y capacidad de la tecnología GPS para el monitoreo de puentes con grandes claros. El mismo departamento asegura que una red compuesta por dispositivos RTK-GPS es una excelente herramienta para el monitoreo de movimientos diferenciales, los cuales podrían servir como indicativos de problemas potenciales en una situación posterior a un desastre. Después de este enorme éxito, a principios de 2004 un nuevo proyecto se concentró sobre el puente Carquinez, en California. La estructura fue instrumentada con el objeto de detectar sus desplazamientos, en tiempo real, provocados por tráfico, viento y sismos.

A finales de la década de los 90s, por primera vez en Japón fue considerada la introducción de la tecnología GPS para el monitoreo de puentes colgantes de su territorio. Fujino describe el sistema de monitoreo montado sobre el puente Akashi Kaikyo, el puente colgante con mayor claro del mundo, así como una de las primeras pruebas efectuadas en esta estructura, empleando tecnología GPS, para la medición de sus desplazamientos. Nakamura compara los resultados de los desplazamientos semi estáticos detectados con los instrumentos GPS, con aquellos provenientes de la medición de la velocidad del viento y de la aceleración del edificio. Las mediciones fueron realizadas durante una temporada de fuertes vientos. Los desplazamientos resultantes de las pruebas usando GPS fueron aproximadamente igual a los obtenidos analíticamente y mediante las pruebas en el túnel de viento.

En Brasil, los primeros ensayos empleando tecnología GPS tuvieron lugar en 2001. Sobresalientemente los investigadores brasileños han desarrollado una nueva metodología de bajo costo para el monitoreo de puentes, empleando receptores GPS de una sola frecuencia pero de gran exactitud. En su metodología, no hay ajuste de los datos y las oscilaciones del puente pueden ser observadas directamente a través de la información recolectada de dos satélites, uno cerca del cenit y otro en la dirección del horizonte. El satélite de referencia es elegido según la dirección de los movimientos del puente, esto es, cerca del horizonte para oscilaciones verticales. La restricción geométrica satelital requiere que las pruebas sean efectuadas cuando la constelación tiene un satélite más elevado y otro más bajo. Este desafío puede ser superado con una adecuada planeación de las pruebas.

#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

En julio de 2004, investigadores del IESSG realizaron pruebas de línea base cero, de línea base corta y directamente sobre un puente, para evaluar el funcionamiento de los receptores JNS100, capaces de recolectar datos hasta en tasas de 100 Hz. Previamente, la tasa de muestreo GPS más alta usada en experimentos había sido de 10-20 Hz, lo cual significaba que únicamente podía ser detectada la dinámica de puentes que fuese menor a 10 Hz. En el IESSG, la mayor parte de los trabajos realizados habían incluido la integración de dispositivos GPS de 10 Hz con acelerómetros, que recolectaban comúnmente datos hasta 200 Hz. En las pruebas del receptor JNS100, se realizaron algunas comparaciones con los receptores Leica SR510 de una sola frecuencia, los cuales muestreaban a 10 Hz. Las desviaciones estándar de los datos capturados a 50 y 10 Hz con el JNS100, fueron comparados con aquellos provenientes de los receptores Leica en un sistema de coordenadas local. Los resultados mostraron que, en las pruebas estáticas, los receptores Leica tenían ligeramente un mejor desempeño que los dispositivos JNS100, aunque la diferencia era exigua. En las pruebas cinemáticas del puente, los receptores JNS100 funcionaron tan bien como los receptores Leica. Los resultados derivados del JNS100, medidos a 50 Hz, también coincidieron con las medidas obtenidas con un acelerómetro triaxial que operaba a la misma tasa.

##### Sistemas Operacionales

Los sistemas de monitoreo, en tiempo real, conformados por receptores GPS, han sido comisionados en muchas partes del mundo. Los componentes GPS por lo general se basan en el software RTK, desarrollado por varias empresas comerciales e instituciones de investigación, o por algún otro software de fabricación específica, al cual, en la mayoría de la ocasiones, el público no tiene acceso.

##### Principales Sistemas de Software RTK

Lo que a continuación se presenta, es una lista ordenada alfabéticamente de los principales sistemas de software RTK, los cuales, hoy en día, se encuentran en uso rutinario y son capaces de monitorear estructuras en tiempo real. Cabe señalar que estos programas por lo regular se proporcionan ya instalados dentro de las unidades de medición.

- 3D TRACKER (Condor Earth Technologies Inc.) es un paquete comercial de software para el monitoreo en 3D y tiempo real de grandes estructuras ingenieriles. En 2002, Trimble y Condor anunciaron un proyecto para usar receptores GPS Trimble's survey-grade.
- GOCA (GPS-based Online Control and Alarm) es un sistema de software desarrollado por la Universidad de Ciencias Aplicadas en Karlsruhe para un ajuste centralizado de red de soluciones de línea base. Es útil para detectar movimientos de los receptores entre las temporadas de observación. Utiliza receptores de una sola frecuencia o de frecuencia dual.
- INTETRAK (Orion Monitoring Systems Inc.) es un sistema de software para el monitoreo, en tiempo real, de desplazamientos, y para el manejo comprensivo de los sistemas continuos de monitoreo GPS. InteTrak es compatible con receptores y formatos de información de una amplia gama de fabricantes.
- RTK Extend™ (NavCom Technologies Inc.) es un sistema para posicionamiento RTK. NavCom integró StarFire con RTK para introducir RTK Extend™.

#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

- SPIDER (Leica Geosystems) es un software integrado y adecuado para el control central y la operación de estaciones individuales de referencia o redes GPS. Actualmente, éste es probablemente el sistema más utilizado en sistemas operacionales de monitoreo estructural.

##### Ejemplos de Sistemas Operacionales de Monitoreo basados en RTK

###### Edificios Elevados en Chicago, Illinois

En la ciudad de Chicago yace el edificio más alto de los Estados Unidos, la Torre Sears, la cual cuenta con al menos 100 niveles. Un programa de monitoreo de escala completa fue establecido para tres edificios de gran altura en Chicago en el año 2003. El programa contempla receptores GPS de alta exactitud, complementados con un equipo de sensores tradicionales, para así conformar una flotilla de sensores comprensiva y robusta. Cada edificio es equipado con cuatro acelerómetros de fuerza balanceada, montados en pares ortogonales y en esquinas opuestas del nivel más alto de cada inmueble, con el objeto de capturar respuestas de traslación y torsión. La instrumentación fue ejecutada sobre dos edificios en junio de 2002, y sobre el tercero en abril de 2003. Al último le fueron además incorporados dos anemómetros ultrasónicos encima de mástiles que yacen sobre las esquinas opuestas de la azotea, 41 metros por encima del nivel del techo, para medir las características del viento sobre la zona céntrica de Chicago.

###### Torre Latitud en Sydney, Australia

La Torre Latitud es un edificio de 46 niveles destinado a oficinas, ubicado en el Distrito Central de Negocios de Sydney. Completado a finales de 2004, este edificio se levanta a una altura de 192 m por encima del nivel de banqueta. Una plataforma de pruebas ha sido instalada por la Universidad del Sur de Gales en colaboración con la Universidad de Sydney, para estudiar la respuesta estructural del edificio ante efectos de viento locales. La plataforma de pruebas está equipada con sensores GPS, acelerómetros y un anemómetro, instalado desde principios de 2006. Debido a que el sistema de monitoreo tiene por objeto medir la respuesta de traslación y torsión, el equipo GPS es instalado en la azotea, mientras que los dos acelerómetros son ubicados en el nivel más elevado de la torre al cual es posible acceder. El anemómetro es montado también en la azotea para medir tanto la dirección como la velocidad del viento.

###### Puente Tsing Ma, Hong Kong

El puente Tsing Ma es un logro ingenieril internacionalmente conocido, y símbolo de la ciudad de Hong Kong. Es parte del Enlace Lantau, el cual abarca el puente colgante Tsing Ma, algunos viaductos que cruzan Ma Wan y el puente atirantado Kap Shui Mun. Con un claro de 1377 m, esta obra es 97 m más larga que el propio puente Golden Gate de San Francisco. El sistema de monitoreo de este puente está conformado por 774 sensores de siete principales tipos: anemómetros, sensores de temperatura, sensores dinámicos, acelerómetros, transductores de desplazamiento, estaciones de monitoreo de nivel y galgas de tensión, así como por 31 receptores GPS. El sistema de receptores GPS, designado como "the real-time GPS On-Structure Instrumentation System (GPS-OSIS)", monitorea los movimientos de los principales cables colgantes de las cubiertas y de las pilas del puente.

##### Puente Akashi Kaikyo, Japón

El Puente Akashi Kaikyo es el puente colgante de mayor longitud en el mundo, con un claro central de 1991 m. Cuenta con un sistema de monitoreo estructural, operando desde 1999, que abarca tres receptores GPS, gran cantidad de sismómetros, acelerómetros y anemómetros. Dos de las antenas GPS se encuentran montadas sobre las columnas del puente a cada extremo del mismo, y la tercera sobre el punto medio de la estructura. Gracias al continuo monitoreo de la posición del puente, de la temperatura en puntos representativos y de otros parámetros, el desempeño del puente es supervisado en tiempo real. Una red de estaciones de referencia GPS permite obtener medidas con exactitudes a nivel de milímetros. El estrecho de Akashi tiene corrientes de elevada velocidad y la región es vulnerable a ser azotada por fuertes vientos y terremotos.

##### Puente de Jiangyin, China

El puente Jiangyin aloja un claro de más de 1 km. Este es el puente de su tipo de mayor longitud en China, y el cuarto más largo del mundo. Este funciona como carretera principal, la cual es la ruta clave de la nación que cruza el río Yangtze, entre Jiangyin y Jingjiang, en la Provincia Jiangsu. Una mejora y modificación del sistema que monitorea este puente fue recientemente completada usando el sistema de monitoreo GPS Leica Geosystems, el cual se concentra en el monitoreo de la forma geométrica de las vigas y en los desplazamientos de las torres del puente. El sistema ha proporcionado una solución rentable e innovadora para recavar información de la posición del puente en 3D y a 20 Hz, empleando gran cantidad de sensores GPS, incluyendo un software de avanzado análisis.

##### Beneficios y Futuras Aplicaciones

Ya que ha sido probada la viabilidad técnica de registrar mediante tecnología GPS los desplazamientos de una estructura con la suficiente exactitud, el desafío ahora se centra en encontrar los mayores beneficios que se pueden obtener con dicha información.

Cuando el monitoreo es efectuado durante movimientos extremos causados por sismos o fuertes vientos, las medidas obtenidas pueden ser utilizadas para indicar desplazamientos excesivos, calcular average drift ratios (las frecuencias que corresponden a los periodos fundamentales de la mayoría de los edificios con mas de 20 niveles, son 10-20 veces la frecuencia Nyquist del muestreo, lo cual es suficiente para determinar de manera confiable estos parámetros) y detectar cambios en las características dinámicas de la estructura en estudio. Una vez efectuado el análisis de la información, lo siguiente es encontrar su uso. A continuación se mencionan las principales aplicaciones que pueden desprenderse de un estudio de este tipo:

- Evaluación del funcionamiento e integridad de la estructura. Una vez categorizada la información, los supervisores o propietarios del inmueble pueden emitir algún juicio sobre el funcionamiento e integridad de la estructura.
- Identificación de desplazamientos excesivos. Las corrientes de información procedentes de las unidades GPS instaladas sobre puntos específicos de la estructura en estudio, pueden ser configuradas a alarmas que de forma automática se activen cuando han sido rebasados ciertos umbrales predeterminados de desplazamiento. De esta manera, los supervisores del adecuado funcionamiento de la estructura pueden tomar medidas preventivas de forma inmediata.

#### 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

---

- Detección de daños presentes en la estructura. Con la información recolectada es posible reconocer no linealidades en el comportamiento de la estructura, ya sean debidas a daños presentes en la misma, al comportamiento plástico de algunos de sus elementos, componentes o uniones, o a efectos de interacción suelo-estructura. De esta manera, en el caso de que la estructura se encontrase en una situación seria, se puede efectuar una evaluación más completa sobre la susceptibilidad de la misma, y, en su caso, aplicar las medidas pertinentes para resguardar la seguridad pública e integridad del inmueble.
- Desarrollo de metodologías para la incorporación de los nuevos descubrimientos a procedimientos de diseño. Algunas metodologías, en las cuales se incorporen los descubrimientos a procedimientos de diseño útiles y prácticos, pueden ser desarrolladas. Por ejemplo, uno de los parámetros claves utilizado en el emergente proceso de diseño basado en el funcionamiento estructural, es el desplazamiento de la cúspide de un edificio. Por lo tanto, el hecho de poder medir tal parámetro, tiene un uso potencial en el desarrollo y verificación de tales procedimientos de diseño.
- Mejoramiento de futuros procedimientos de diseño y análisis estructural. La información recavada puede ser utilizada para analizar el funcionamiento de la estructura, y tales resultados pueden ser empleados para mejorar futuros procedimientos de diseño y análisis.
- Determinación de desplazamientos a largo plazo. En el futuro es posible desarrollar la aplicación para determinar desplazamientos a largo plazo en puntos críticos de sistemas estructurales (por ejemplo, deformaciones permanentes, asentamientos de cimentaciones, etc).
- Reconocimiento de desplazamientos estructurales debidos a fallas del suelo. Las medidas directas de los desplazamientos nos permitirán detectar, en forma confiable, el movimiento estructural causado por alguna falla del suelo que subyace a la estructura (licuefacción).

#### Algunos Problemas Comunes

A continuación se enuncian los problemas más comunes que se presentan durante el despliegue de las unidades GPS, y se emiten algunas recomendaciones para su solución.

- La instrumentación con equipo GPS en ambientes urbanos céntricos, donde la mayor parte de los grandes edificios se encuentran construidos, requiere de estaciones de referencia cuya ubicación puede ser todo un problema. Para evitar modificar la localización de la estación de referencia después de haber sido instalada, se recomienda que antes de desplegar el equipo sobre el sitio seleccionado, éste último se inspeccione con unidades manuales GPS para asegurar la buena comunicación entre satélites y receptor. En algunos despliegues se ha tenido la experiencia de tener que reubicar la estación, al reducirse a 3 ó 2 el número de satélites visibles.

En el caso de puentes, debido a que éstos generalmente son construidos en ambientes despejados, tanto la visibilidad de las unidades GPS con los satélites, como la elección de sitios adecuados para la localización de la estación de referencia, no suelen ser un problema.

## 4. ALTERNATIVAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL

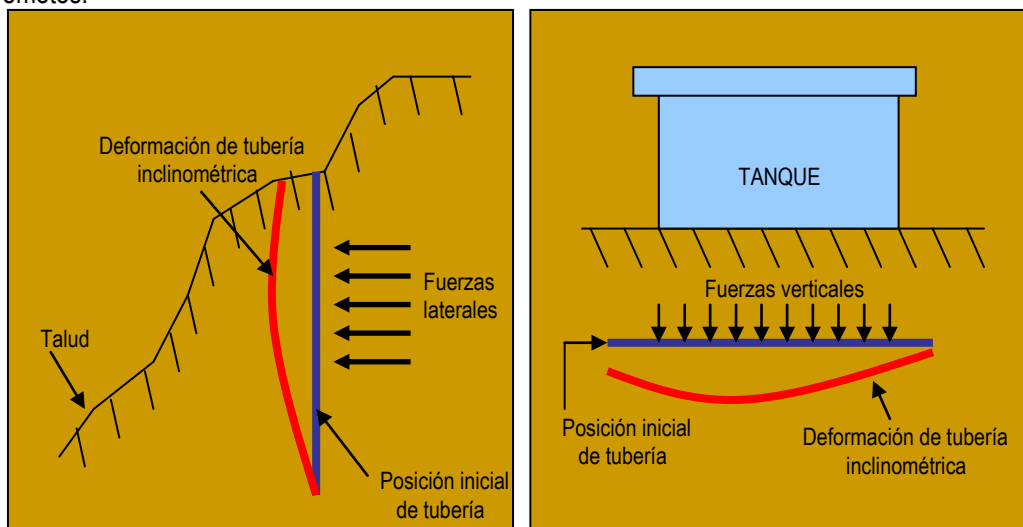
- En ocasiones, debido a problemas de visibilidad entre satélites y receptor, la estación de referencia no puede ubicarse inmediata a la base del edificio en estudio. En estos casos, al seleccionar el sitio alternativo, se deberá verificar que los movimientos del terreno en dicho sitio sean similares a los movimientos del terreno en la base del edificio instrumentado.

Conseguir una mayor exactitud y una tasa de muestreo superior para obtener mejores registros en tiempo real, empleando el sistema GPS, requiere de desarrollo tecnológico adicional. La tecnología existe y día a día mejora, sin embargo son necesarias mayores pruebas y mayor cantidad de estudios piloto, como los que aquí se han descrito, para que el monitoreo estructural, empleando esta tecnología, sea más confiable, disponible y rentable de lo que es ahora.

### 4.2 INCLINÓMETROS (BLANCO URRUTIA, Fidel, 2003)

#### 4.2.1 Generalidades

Los inclinómetros son equipos que, valiéndose de una tubería, denominada “tubería inclinométrica”, se ocupan para medir desplazamientos o deformaciones de un objeto en estudio respecto a una línea de referencia, ya sea vertical u horizontal. Estos equipos se caracterizan por su alta sensibilidad y precisión, su salida analógica y su bajo consumo de poder. Además, son instrumentos con mucha aplicación. Por ejemplo, en Geotecnia, los inclinómetros son utilizados para controlar movimientos laterales en terraplenes y en áreas de derrumbe (Fig. 4.4A), flexiones de muros de contención y pilares, deformaciones de las paredes de una excavación, túneles y pozos, y asentamientos de terraplenes y cimentaciones (Fig. 4.4B). En vulcanología, son empleados en el estudio de volcanes activos, pues pueden proporcionar información valiosa para la predicción de erupciones volcánicas. En Ingeniería Estructural, estos instrumentos son útiles para el monitoreo de cortinas en presas y otras estructuras, como edificios o puentes. También, estos aparatos son ocupados como accesorios de algunos vehículos, tales como embarcaciones o automóviles todoterreno. Recientemente, amén de las aplicaciones ya expuestas, se ha descubierto que estos aparatos pueden servir para pronosticar la ocurrencia de maremotos.



A

Fig. 4.4 Aplicaciones de una tubería inclinométrica

B



### 4.2.2 Equipo

El equipo para monitoreo inclinométrico generalmente consta de los siguientes componentes:

- Revestimiento inclinométrico o tubería inclinométrica
- Sonda inclinométrica (sondeos periódicos)
- Cables eléctricos
- Sistema polea/freno
- Unidad lectora o de almacenamiento
- Software de apoyo

En su conjunto, estos componentes permiten la captura, transferencia y procesamiento de la información. A continuación se describen, de forma más puntual, las características y funciones particulares de cada uno de estos componentes.

#### Revestimiento Inclinométrico o tubería inclinométrica

El “revestimiento inclinométrico” es un tubo que, dependiendo del estudio, puede embeberse en suelos, rellenos, roca y concreto, o simplemente ser fijado a una estructura. Este tubo cumple con tres funciones primordiales: 1) para el caso de sondeos periódicos, permitir el acceso y recorrido de la sonda inclinométrica y demás dispositivos; 2) para el caso de registros continuos y permanentes, permitir la estancia de los sensores de medición; y, 3) deformarse siguiendo el movimiento del material en el que se encuentra contenido o de estructura a la cual yace sujeto.

Este revestimiento es fabricado de plástico, aleaciones de aluminio o fibra de vidrio. La selección del material de este componente depende del entorno en que será instalado y de su facilidad de manipulación. Por ejemplo, las altas temperaturas pueden dañar las tuberías de plástico, altos o bajos valores de pH provocarán la corrosión acelerada de las tuberías de aluminio y la manipulación brusca de las tuberías de fibra de vidrio puede conllevar a su rompimiento.

Estas tuberías son fabricadas con diámetros de 48, 70 y 85 milímetros (Fig. 4.5), en piezas de 1.5 y 3.0 metros de largo. Las de mayor diámetro son las más recomendables para monitoreos prolongados por su mayor durabilidad, debido a que resisten grandes deformaciones. Sin embargo, usualmente el diámetro de la perforación es el que determina el diámetro de la tubería a instalar. Para la unión de estas piezas se utilizan acoples especiales, los cuales son recomendados por el fabricante.

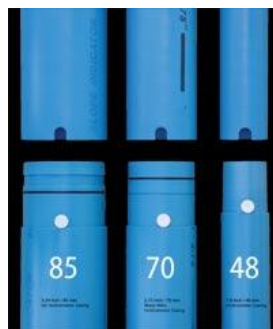


Fig. 4.5 Diámetros de fabricación de la tubería



Las tuberías inclinométricas contienen en su interior cuatro ranuras en todo su largo, orientadas a cada 90°, las cuales son utilizadas como guías para las ruedas de la sonda inclinométrica que es introducida al momento de realizar las mediciones (Fig. 4.6).

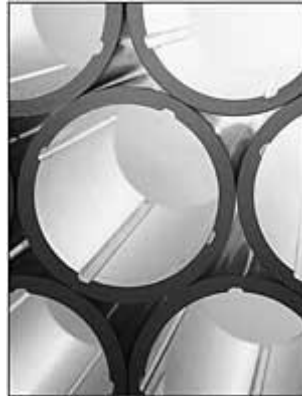


Fig. 4.6 Vista del interior de tuberías inclinométricas

#### Sonda Inclinométrica

Para la adquisición de datos sobre las deformaciones de las tuberías, existen dos tipos de sondas inclinométricas: las uniaxiales y las biaxiales. Ambas constan de sensores de inclinación (servo acelerómetros), que a su vez se componen de dispositivos electro-mecánicos, formados básicamente por un péndulo simple colocado dentro de un campo magnético de una bobina, el cual genera fuerzas de inercia en el péndulo cuando este último cambia de su posición original. Dichas fuerzas son transformadas en inclinaciones y transferidas a la unidad lectora mediante impulsos eléctricos.

Las sondas uniaxiales contienen un sensor que registra las inclinaciones en la dirección del plano de las ruedas que le sirven de guía. En cambio, las biaxiales contienen dos sensores orientados a 90° uno del otro, con los cuales en una misma medición se realizan lecturas ortogonales, proporcionando un análisis más completo y de una forma más eficiente y rápida.

Respecto a los ejes de las ruedas de dichas sondas, éstas se encuentran a 0.5 m de separación en el caso de sondas diseñadas en unidades métricas, y a 24 pulgadas para las diseñadas en unidades inglesas. Generalmente estas distancias representan el intervalo de profundidad al cual se deben tomar las lecturas al realizar los sondeos, no obstante estos intervalos de registro de datos podrían variar según el criterio del investigador.

También, es importante mencionar que la “rueda alta” del “eje superior” es la que indica la dirección en que se efectuará la medición.

#### Cables Eléctricos

El cable (Fig. 4.7) cumple tres funciones básicas, las cuales son: 1) proveer de energía eléctrica a los sensores de la sonda inclinométrica, 2) transmitir la información hasta la unidad lectora portátil y 3) establecer un control de los intervalos de lecturas, gracias a los puntos de control colocados en forma equidistante en toda su longitud y al uso de las quijadas o freno.



Fig. 4.7 Cable eléctrico

#### Sistema Polea/freno

Estos dispositivos mecánicos sirven para el adecuado manejo del cable eléctrico en el momento del registro de datos. Las poleas (Fig. 4.8) centran el cable en la tubería, mientras que las quijadas o freno fungen como referencia de la profundidad de cada uno de los puntos registrados en la unidad lectora y, a la vez, estabilizan la sonda.



Fig. 4.8 Polea

#### Unidad Lectora o de Almacenamiento

La unidad lectora (Fig. 4.9) es el dispositivo que registra las lecturas que le proporciona la sonda, por medio de los cables eléctricos, en el momento de la adquisición de datos en campo. También permite la comunicación con una computadora para poder almacenar y analizar los registros obtenidos.



Fig. 4.9 Unidad lectora

#### Software de Apoyo

Tiene como función transferir la información del colector de datos (unidad lectora) a la computadora, y de facilitar la presentación de resultados.

#### 4.2.3 Tipos de inclinómetros

Según las necesidades del proyecto, puede requerirse de una mayor o menor continuidad de los ensayos inclinométricos, por lo cual se puede optar entre “inclinómetros portátiles o inclinómetros fijos”.

Los inclinómetros portátiles son utilizados en aquellos casos en que los riesgos involucrados son menores y es factible la realización de ensayos con sondas inclinométricas de forma periódica (diarias, semanales, mensuales, etc.). Para este caso, por lo regular, se emplean uno o dos servo acelerómetros como dispositivos de medición. Uno, si sólo se desean obtener lecturas en una sola dirección, ya sea coincidente al plano de las ruedas de la sonda o al plano perpendicular a ellas; y dos, si el estudio solicita registros en ambas direcciones.

Por el contrario, los inclinómetros fijos (Fig.4.10 (arriba)) son recomendados para estructuras o laderas que involucran un alto riesgo, por lo que es necesario un monitoreo automático y continuo mediante la instalación permanente de sensores dentro de la tubería, ubicados a intervalos de distancia predeterminados (Fig. 4.10 (abajo)). Por lo general, en este monitoreo, los servo acelerómetros son sustituidos por sensores de inclinación electrolíticos (Fig. 4.11). Dichos sensores operan de manera equivalente a un nivel de burbuja. Una burbuja está suspendida en un líquido electrolítico contenido dentro de un recipiente de vidrio. En la zona del menisco, el líquido está en contacto con dos electrodos de excitación, de forma que dependiendo de la posición de la burbuja respecto de esos electrodos, cambian las resistencias entre los dos electrodos de excitación. Estos cambios de resistencia son detectados con alta precisión mediante un circuito puente de Wheatstone, y son suministrados como una señal de voltaje asociada a un valor de inclinación del sensor. Los resultados son transferidos vía modem a centrales de procesamiento de información de manera automática.

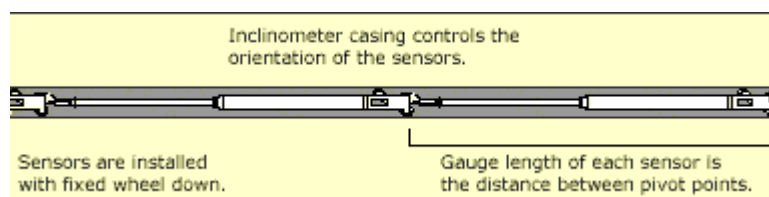


Fig. 4.10 Inclinómetros fijos (arriba)

Instalación de inclinómetros fijos dentro de la tubería inclinométrica (abajo)

Cabe mencionar que ambas clases de inclinómetros, portátiles o fijos, pueden ser instalados horizontal y verticalmente dependiendo del tipo de obra que se vaya a monitorear.

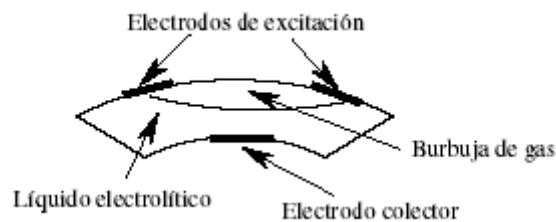


Fig. 4.11 Esquema del funcionamiento de un sensor electrolítico

### 4.3 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA (ENCICLOPEDIA LIBRE WIKIPEDIA)

#### 4.3.1 Generalidades

La fibra óptica puede definirse como la guía o conducto de ondas en forma de filamento, generalmente de vidrio, aunque también puede ser de materiales plásticos, capaz de transportar una potencia óptica en forma de luz, normalmente emitida por un láser o LED.

El principio de guiar la luz que se encuentra detrás de las fibras ópticas fue primeramente demostrado en la época Victoriana, sin embargo, las fibras ópticas modernas fueron desarrolladas hasta principios de los años 50s del siglo anterior. Las fibras ópticas llegaron a ser prácticas para su uso en comunicaciones hasta finales de los años 70s, y a partir de ese momento se han logrado varios avances técnicos enfocados a incrementar el desempeño y el alcance de estos conductos.

Actualmente, las fibras ópticas tienen su mayor campo de aplicación en las telecomunicaciones. Su capacidad para transmitir datos de cualquier clase a altas velocidades y su delgado perfil han extendido su uso por todo el mundo. Además de ello, hoy estas mismas capacidades se han extendido a áreas tales como la metrología y la instrumentación (hoy en día se fabrican sensores a base de fibra óptica), las cuales han comenzado a generar su propio conocimiento y técnica.

##### 4.3.2 Historia

La historia de conductos dieléctricos de luz se remonta a la época Victoriana, cuando el físico irlandés John Tyndall descubrió que la luz podía viajar siguiendo una trayectoria curva dentro de un material (agua) debido al efecto de reflexión interna total. Más tarde, en 1952, el físico Narinder Singh Kapany dirigió experimentos, basados en los estudios previos de Tyndall, que condujeron a la invención de la fibra óptica. Desarrollos posteriores, hacia la mitad del siglo XX, se concentraron en la creación de paquetes de fibra para la transmisión de imágenes, siendo su primer aplicación el gastroscopio. El primer gastroscopio con fibra óptica semi-flexible fue patentado por Basil Hirschowitz, C. Wilbur Peters y Lawrence E. Curtiss, investigadores de la Universidad de Michigan, en 1956. En el proceso de desarrollo del gastroscopio, Curtiss fabricó las primeras fibras de vidrio revestidas; las fibras ópticas anteriores habían recurrido al aire o a aceites y ceras imprácticas como material de revestimiento de bajo índice. Una variedad de otras aplicaciones para la transmisión de imágenes prontamente emergió.

En 1965, Charles K. Kao y George A. Hockham, miembros de la empresa británica Standard Telephones and Cables, fueron los primeros en advertir que la atenuación de las fibras contemporáneas era causada por impurezas, las que podían ser removidas, y no por efectos físicos fundamentales como la dispersión. Ellos demostraron que la fibra óptica podía ser un medio práctico de comunicación, siempre y cuando el efecto de atenuación se lograra reducir a menos de 20 dB/km. Con esta medida en mente, la primera fibra óptica práctica para las comunicaciones fue inventada en 1970 por Robert D. Maurer, Donald Keck, Peter Schultz y Frank Zimar, quienes servían para la fábrica de vidrio Corning Glass Works. Estos investigadores fabricaron una fibra con 17 dB/km de atenuación, fusionando sílice con titanio. Durante esta década las técnicas de fabricación se mejoraron, consiguiendo pérdidas de tan solo 0,5 dB/km.

El 22 de abril de 1977, la empresa General Telephone and Electronics envió el primer mensaje telefónico a través de fibra óptica, a una velocidad de 6 Mbit/s, en Long Beach, California. En 1978 ya se transmitía a 10 Gb km/s.

El amplificador de fibra dopado con erbio, el cual redujo el costo de los sistemas de fibra de larga distancia eliminando la necesidad de repetidores ópticos-eléctricos-ópticos, fue inventado por David Payne, de la Universidad de Southampton, y Emmanuel Desurvire, en los Laboratorios Bell, en el año de 1986. Ambos pioneros fueron condecorados con la medalla en Ingeniería Benjamín Franklin en 1988.

El primer enlace trasatlántico con fibras ópticas fue el TAT-8, basado en la tecnología optimizada de amplificación de láser de Desurvire. Éste comenzó a operar en 1988. Desde entonces se ha empleado fibra óptica en multitud de enlaces transoceánicos, y poco a poco se va extendiendo su uso desde las redes troncales de las operadoras hacia los usuarios finales.

En 1991, el campo naciente de cristales fotónicos condujo al desarrollo de la fibra de cristal fotónica, la cual conduce la luz mediante la difracción de una estructura periódica, en vez de mediante el efecto de reflexión interna total. Las primeras fibras de este tipo llegaron a estar comercialmente disponibles hasta

1996. Las fibras de cristales fotónicas pueden ser diseñadas para conducir mucho más energía que las fibras convencionales, y sus dependientes propiedades de longitud de onda pueden ser ajustadas para mejorar su desempeño en aplicaciones particulares.

##### 4.3.3 Características

Una fibra óptica está compuesta fundamentalmente de tres elementos: un núcleo, su cubierta o revestimiento, y un forro que los envuelve. Los núcleos y revestimientos (Fig. 4.12) pueden ser fabricados de vidrio o plástico, o en una combinación que sólo admite al vidrio como núcleo y al plástico como revestimiento. El forro puede ser de hule o algún otro material según se requiera. La temperatura máxima que soportan estos cables es de 80 grados centígrados para los que contienen plástico; mientras que los de vidrio pueden resistir hasta 600 grados.

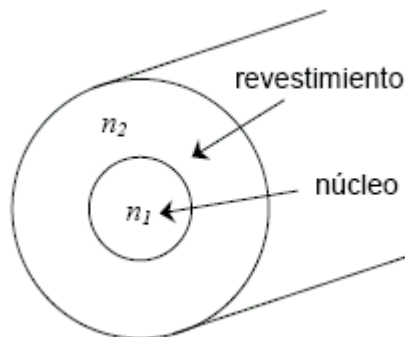


Fig. 4.12 Núcleo y revestimiento de una fibra óptica

Las fibras ópticas de vidrio generalmente están hechas de dióxido de sílice, sin embargo, otros materiales, tales como fluoruro de circonio, fluoruro de aluminio y anfígenido, son empleados en aplicaciones infrarrojas de longitudes de onda elevadas. Tal como otros vidrios, éstos poseen un índice de refracción cercano a 1.5. Comúnmente la diferencia entre el núcleo y el revestimiento es menor del 1%.

Las fibras ópticas de plástico son generalmente del tipo multimodo, en particular del tipo salto de índice. El diámetro de su núcleo posee una magnitud superior a 1 mm. Por lo regular, el efecto de atenuación en este tipo de fibra es mucho más elevado que en la de vidrio; en otras palabras, la amplitud de la señal en las fibras de plástico decrece mucho más rápido (1 dB/m o mayor). Esta cualidad limita el rango de los sistemas conformados con fibras fabricadas de este material. A pesar de esta carencia, las fibras de plástico poseen una gran ventaja con respecto a las de vidrio: por su flexibilidad, permiten grados de curvatura más cerrados.

La fibra óptica ha representado una revolución en el mundo de las telecomunicaciones, por cuanto ha desplazado a los cables de cobre para la transmisión de grandes cantidades de información, sea en forma de canales telefónicos, televisión, datos, etc.

### 4.3.4 Principio de funcionamiento

Como se ha mencionado, una fibra óptica es un conducto dieléctrico por el cual se transmite un haz de luz a lo largo de su eje, bajo el proceso de reflexión interna total (Fig. 4.13). La fibra, como ya ha sido descrita, consiste de un núcleo rodeado por un revestimiento. Para confinar dentro del núcleo a la señal óptica, el índice de refracción del núcleo debe ser mayor al del revestimiento, o el ángulo de incidencia del haz siempre mayor al ángulo límite. El paso del núcleo al revestimiento puede ser abrupto (fibra salto de índice), o gradual (fibra índice gradual).

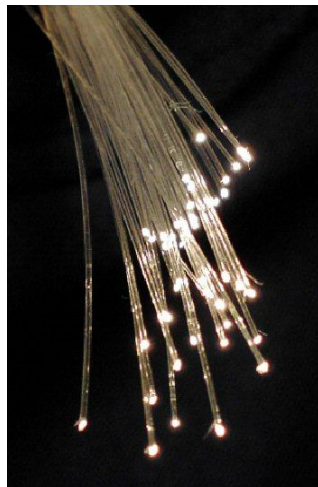


Fig. 4.13 Fibra óptica brillando cuando transmite luz

Los principios básicos de funcionamiento de una fibra óptica se justifican aplicando las leyes de la óptica geométrica, principalmente la ley de la reflexión y la ley de Snell.

### 4.3.5 Tipos de fibra óptica

Las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de una fibra se denominan modos de propagación. Y según el número de modos de propagación, tendremos dos tipos de fibra óptica: multimodo y monomodo.

#### Fibra Multimodo

Como su nombre lo revela, una fibra multimodo es una fibra que puede propagar más de un modo de luz (hasta más de mil modos de propagación). Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km. Resultan simples de diseñar y económicas. Se caracterizan por poseer un núcleo de diámetro grande (mayor a  $10\ \mu\text{m}$ ), lo cual facilita su conexión y le proporciona una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

El funcionamiento de este tipo de fibra se sustenta en la óptica geométrica. En una fibra de este tipo los rayos de luz son dirigidos a lo largo del núcleo mediante el principio de reflexión interna total. Los rayos que inciden sobre el límite entre núcleo y el revestimiento en un ángulo elevado (medido en relación a la línea normal del límite), mayor al ángulo crítico para este límite, son completamente reflejados (Fig. 4.14).

El ángulo crítico, o sea, el ángulo mínimo para que tenga lugar la reflexión interna total, está determinado por la diferencia entre los índices de refracción de los materiales del núcleo y del revestimiento. Por el contrario, los rayos que inciden sobre el límite en un ángulo pequeño, son refractados desde el núcleo hasta el revestimiento. De esta manera parte del haz de luz desaloja el núcleo, y por consiguiente parte de la información se pierde. El ángulo crítico determina el ángulo de aceptación de la fibra, a menudo reportado como una apertura numérica. Una apertura numérica alta permite que la luz se propague dentro de la fibra en rayos próximos al eje y en distintos ángulos, permitiendo el acoplamiento eficiente de la luz dentro de la fibra. Sin embargo, esta apertura numérica alta incrementa la cantidad de dispersión, ya que los rayos a diferentes ángulos poseen diversas longitudes de trayectoria y, por tanto, les toma tiempos distintos el recorrer la longitud total de la fibra. Una apertura numérica pobre puede ser por tanto lo más deseable.

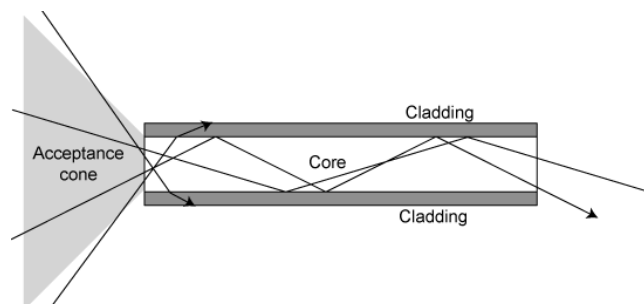


Fig. 4.14 Propagación de la luz a través de una fibra óptica multimodo

Dependiendo del tipo de índice de refracción del núcleo, tendremos dos tipos de fibra multimodo:

- Salto de índice (Fig. 4.15 (arriba)): en este tipo de fibra, el núcleo tiene un índice de refracción constante en toda su sección.
- Índice gradual (Fig. 4.15 (en medio)): el índice de refracción en la sección del núcleo es variable.

En el caso de las fibras de índice gradual, el índice de refracción en el núcleo decrece continuamente entre el eje y el revestimiento. Esta situación propicia que los rayos de luz se doblen suavemente al acercarse al revestimiento, en vez de reflejarse abruptamente desde el límite entre el núcleo y el revestimiento. Las trayectorias curvas resultantes reduce el efecto de dispersión multidireccional, debido a que mayor cantidad de rayos con ángulo elevado pasan a través de la periferia de bajo índice del núcleo, en vez del centro de elevado índice. El perfil del índice se elige para reducir al mínimo la diferencia de velocidades de propagación axiales de los rayos que fluyen por la fibra. El perfil del índice ideal está muy cerca de una relación parabólica entre el índice y la distancia desde el eje.

#### Fibra Monomodo

Principalmente se utiliza en aplicaciones de larga distancia, más de 300 km. Una fibra monomodo (Fig. 4.15 (abajo)) puede definirse como aquella fibra en la que sólo se propaga un modo de luz. Esta cualidad se consigue reduciendo el diámetro de su núcleo. Por ello, este tipo de fibra óptica se caracteriza por poseer un núcleo con diámetro diez veces menor a la longitud de onda de luz que se propaga por él, situación por la que no puede ser modelada valiéndose de óptica geométrica. En su lugar, ésta debe ser analizada como una estructura electromagnética, mediante la solución de las ecuaciones de Maxwell, al



reducir la ecuación de la onda electromagnética. El análisis electromagnético puede también ser requerido para entender algunos comportamientos, tal como el speckle, que ocurre cuando la luz coherente se propaga en una fibra multimodo. El comportamiento de una fibra multimodo puede ser igualmente modelado por medio de la ecuación de la onda, con la cual se puede demostrar que esta fibra permite más modos de propagación. Los resultados de este modelado coinciden aproximadamente con las predicciones arrojadas por la óptica geométrica.

Si se analiza a la fibra como un conducto de ondas, es posible demostrar que la energía de la luz dentro de la fibra no se encuentra completamente confinada dentro del núcleo. En su lugar, especialmente en las fibras monomodo, una fracción significativa de la energía viaja en el revestimiento como una onda evanescente.

El tipo más común de fibra monomodo posee un diámetro de 8 a 10  $\mu\text{m}$ . Es notable que la estructura modal depende de la longitud de onda de la luz empleada, de modo que la fibra permita un pequeño número de modos adicionales en las longitudes de onda visibles. Las fibras multimodo, por el contrario, son manufacturadas con diámetros de núcleo superiores a 50  $\mu\text{m}$ , y tan largas como cientos de  $\mu\text{m}$ .

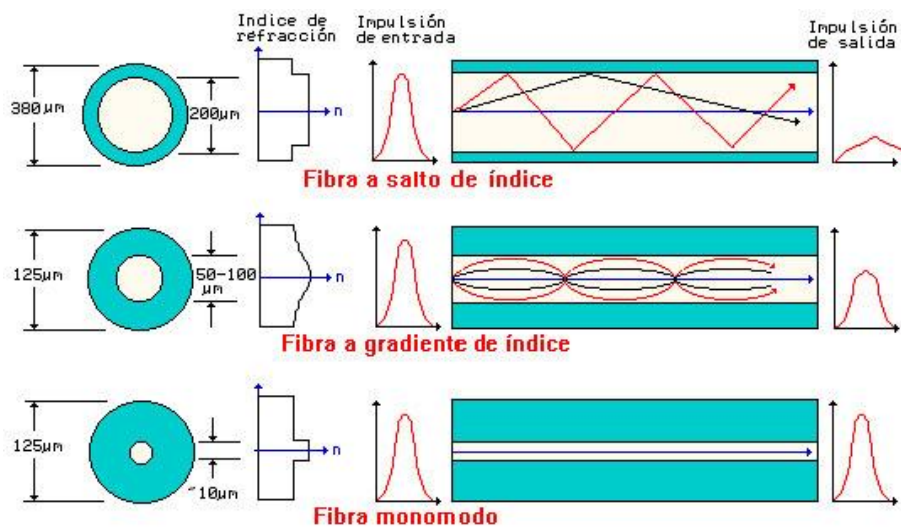


Fig. 4.15 Tipos de fibra óptica

#### 4.3.6 Fibras para propósitos especiales

Algunas fibras ópticas que serán empleadas para algún propósito en especial son construidas con una sección transversal no cilíndrica, usualmente con geometría elíptica, rectangular o en forma de D.

#### 4.3.7 Componentes de la fibra óptica

Dentro de los componentes que se usan en la fibra óptica caben destacar los siguientes: los conectores, el tipo de emisor del haz de luz, etc.

##### Tipos de Conectores

Estos elementos se encargan de conectar las líneas de fibra a un elemento, ya puede ser un transmisor o un receptor. Los tipos de conectores disponibles hoy en día (Fig. 4.16) son muy variados, entre los que podemos encontrar:

- FC que se usa en la transmisión de datos y en las telecomunicaciones.
- FDDI se usa para redes de fibra óptica.
- LC y MT-Array que se utilizan en transmisiones de alta densidad de datos.
- SC y SC-Duplex se utilizan para la transmisión de datos.
- ST se usa en redes de edificios y en sistemas de seguridad.

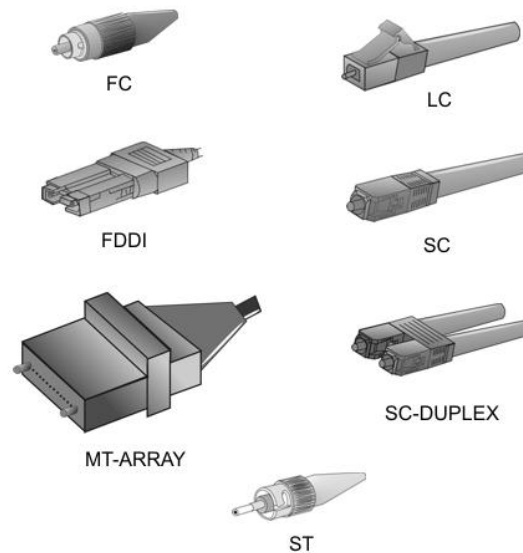


Fig. 4.16 Tipos de conectores de fibra óptica

##### Emisores del Haz de Luz

Estos dispositivos se encargan de emitir el haz de luz que permite la transmisión de datos, estos emisores pueden ser de dos tipos:

- LEDs. Utilizan una corriente de 50 a 100 mA. Su velocidad es lenta y sólo se pueden usar en fibras multimodo. Su uso es fácil y su tiempo de vida es muy grande, además de ser baratos.
- Lasers. Este tipo de emisor usa una corriente de 5 a 40 mA. Son muy rápidos y se pueden usar con ambos tipos de fibra, monomodo y multimodo, sin embargo su uso es complicado. Su tiempo de vida es largo pero menor que el de los LEDs, y también son mucho más caros.

### 4.3.8 Ventajas y desventajas

#### Ventajas

La fibra óptica se emplea en multitud de sistemas, y el actual auge de los sistemas de banda ancha se debe en gran medida a la elevada capacidad de tráfico que pueden transmitir las redes de las operadoras basadas en fibra óptica.

Dentro de las ventajas de la fibra óptica cabe destacar las siguientes:

- Su peso y tamaño es reducido.
- Permite su utilización segura en ambientes con riesgo de explosión, inflamables, en presencia de radiaciones ionizantes, e incluso en células y tejidos vivos.
- El material con el que están fabricadas no se corroe ni se deteriora, por lo que resultan más duraderas en comparación con sus competidores no ópticos.
- Su ancho de banda es muy grande, hay sistemas de multiplexación que permiten enviar 32 haces de luz a una velocidad de 10Gb/s, cada uno por una misma fibra, dando lugar a una velocidad total de 320Gb/s.
- Su atenuación es muy baja.
- Es inmune al ruido electromagnético
- La materia prima con la que se fabrica es abundante.

Si tenemos en cuenta también la capacidad de conducir información de las fibras, no resulta extraño que mercados como la industria petroquímica, las centrales nucleares, la medicina y la bioquímica clínica o la monitorización medioambiental hayan abierto sus puertas de par en par a la incorporación de estos dispositivos en sus modernas tecnologías.

#### Desventajas

La fibra óptica aunque parezca que no, también tiene desventajas, entre las que cabe destacar:

- El alto costo del proceso de fabricación.
- La fragilidad de las fibras.
- La disponibilidad limitada de conectores.
- La dificultad de reparar un cable de fibras roto.
- Hay que conseguir hacer procesos de conversión eléctrica-óptica.
- No existen memorias ópticas.

### 4.3.9 Algunos usos de la fibra óptica

- Se puede usar como una guía de onda en aplicaciones médicas o industriales, en las que es necesario guiar un haz de luz hasta un blanco que no se encuentra en la línea de visión.
- La fibra óptica se puede emplear como sensor para medir tensiones, temperatura, presión, así como otros parámetros.
- Es posible usar latiguillos de fibra junto con lentes para fabricar instrumentos de visualización largos y delgados llamados endoscopios. Los endoscopios se usan en medicina para visualizar

objetos a través de un agujero pequeño. Los endoscopios industriales se usan para propósitos similares, como por ejemplo, para inspeccionar el interior de turbinas.

- Las fibras ópticas se han empleado también para usos decorativos, incluyendo iluminación, árboles de Navidad, etc.

##### 4.3.10 Sensores de fibra óptica

Utilizando las señales luminosas y el recién conquistado "dominio" del fotón de luz, surgían los sensores basados en fibra óptica. Según Guillermo Orellana, investigador y director del Laboratorio de Fotoquímica Aplicada de la Universidad Complutense, "podría decirse que los sensores de fibra óptica son tan antiguos como el desarrollo de la propia fibra óptica moderna por Keck y Schultz en los laboratorios de la empresa Corning en los EE.UU., en 1970. Además de la increíble posibilidad que ofrecían los conductores de luz de transmitir ésta a grandes distancias con mínimas pérdidas, inmediatamente se reconoció la posibilidad de que alguna o varias de las mencionadas propiedades de la radiación luminosa de viaje por la fibra óptica, variaran de manera predecible y controlada ante los cambios en las condiciones físicas del medio. Así surgieron, rápidamente, los sensores de fibra óptica para dichos parámetros fijos, hoy en pleno auge comercial".

Dentro del concepto de sensores de fibra óptica deben incluirse todos aquellos sistemas de medida que contengan fibra óptica, cuenten con al menos una fuente de luz y contemplen una modificación de la señal de luz, producida por la magnitud a medir, que pueda ser detectada y cuantificada. Sensores de estas características se utilizan en aplicaciones tan dispares como la detección submarina, la monitorización de tensiones mecánicas en distintas clases de estructuras, los giróscopos, la medida de presión y temperatura, o los sensores químicos y biomédicos, entre algunos ejemplos. Desde hace más de dos décadas, diversas propuestas se encuentran en condiciones de competir con los sensores convencionales. A pesar de que el funcionamiento de los sensores clásicos está muy bien establecido, los sensores de fibras suponen a menudo la única alternativa eficiente para nuevas aplicaciones (como por ejemplo en el caso de la medida de deformaciones de estructuras de obra civil), además de poder ofrecer ventajas específicas en relación a las soluciones más tradicionales.

Una ventaja destacable de los sensores de fibra óptica es la naturaleza dieléctrica de la fibra y, en consecuencia, la posibilidad de simplificar substancialmente el aislamiento de las cabezas sensoras respecto a tierra. Con ello, se reduce la contaminación asociada a la rotura de los aislantes en caso de accidente y, también, el coste de los mismos. La sustitución de las líneas de transmisión de cobre por fibras ópticas supone otra ventaja remarcable, al facilitar, por ejemplo, la monitorización de sensores a grandes distancias e incorporar todas las ventajas de los sistemas de comunicaciones ópticas. Para que los sensores de fibra óptica acaben de fructificar, el avanzado estado de desarrollo de los componentes y sistemas de fibra necesita complementarse con un esfuerzo por idear formas sencillas y robustas de monitorizar el estado de los elementos sensores, los cuales, a su vez, deberán ser robustos y presentar alta sensibilidad.

Los sensores de fibra suelen clasificarse en intrínsecos y extrínsecos. En los primeros, la interacción que fundamenta la medida ocurre en el interior de un dispositivo construido con la propia fibra, mientras que en los segundos la fibra sólo se aprovecha para guiar la luz hasta el elemento sensor y recoger la salida del mismo, que es externo a la fibra. Los sensores de fibra también se clasifican en puntuales, cuando se evalúa una magnitud en un lugar específico, distribuidos, si la medida es continua a lo largo de la fibra, o casi distribuidos, cuando mediante alguna técnica de multiplexación el sistema incorpora una serie de

sensores puntuales distribuidos a lo largo de la fibra. La técnica más común de monitorización de un sensor distribuido corresponde a las medidas de OTDR (Reflectometría Óptica en el Dominio del Tiempo), empleada para medir, por ejemplo, la distribución de temperatura a lo largo de una fibra por dispersión Raman, Rayleigh o Brillouin.

En cuanto a la forma de codificar la información, los sensores de fibra pueden valerse de varios parámetros de la luz como son su frecuencia o longitud de onda, la intensidad, la fase y la polarización. Finalmente, el detector óptico que se emplee proporcionará una señal eléctrica. Podemos distinguir, en estos momentos, tres grandes grupos de sensores. En primer lugar, los codificados en amplitud, en los que la intensidad óptica se relaciona directamente con la magnitud a medir, idealmente mediante una relación lineal; el flujo de luz es continuo, sólo varía su luminosidad. En segundo lugar, los sensores codificados en frecuencia, en los que la intensidad de la señal óptica proporcionada por el sensor está modulada en frecuencia y dicha modulación es la que contiene la información de la magnitud a medir; la luz se enciende y apaga como lo haría un foco. Finalmente, en tercer lugar, los sensores codificados en longitud de onda en los que es el contenido espectral de la señal óptica, proporcionada por el sensor, el que contiene la información de la medida. Este último tipo de sensor se fundamenta principalmente en el empleo de redes de Bragg como elementos sensores.

Podemos avanzar que la codificación en frecuencia, junto a la codificación en longitud de onda, son formas muy robustas de codificar la información, por lo que este tipo de sensores presenta un interés intrínseco destacable. Las ventajas generales de los sensores de fibra óptica, frente a otras clases de dispositivos radican en las siguientes propiedades:

- Son ligeros y de tamaño reducido, lo que puede facilitar su transporte, instalación y mantenimiento.
- La capacidad de multiplexación de sensores es alta. Además, la posibilidad de compatibilizar en una misma red de fibra las aplicaciones de comunicaciones con las de metrología permite incrementar su eficiencia. La multiplexación de sensores en una red reduce los costos al disminuir el número de fuentes de luz y de sistemas de detección necesarios, así como la longitud de la fibra de interconexión.
- Presentan un alto grado de inmunidad a la interferencia electromagnética.
- Son intrínsecamente aislantes. En una red de alta tensión, los sensores de fibra de voltaje y corriente garantizan la separación galvánica entre el punto de medida a alto voltaje y los equipos de lectura a tierra, en contraste con la inseguridad potencial de los cables conductores presentes en los sistemas de medida convencionales.
- No necesitan alimentación eléctrica en el punto de medida.
- El costo de la fibra es bajo o por lo menos más competitivo que el de una línea de transmisión de cobre.
- Pueden trabajar en entornos peligrosos, como son los radioactivos. Permiten la operación remota y son mínimamente invasivos.
- Generalmente proporcionan un amplio ancho de banda (necesario en sensores de voltaje y corriente para la medida de armónicos y transitorios).
- Los sensores ópticos intrínsecos pueden ofrecer un gran rango dinámico, sin saturación, ni histéresis, al no existir un límite de saturación de las propiedades de la luz medidas.
- La conexión de las señales ópticas de salida con instrumentos electrónicos es fácil y el nivel de las señales es compatible con el requerido en el procesado digital.

Los sensores de fibra óptica permiten la conexión de “tuberías de luz” llamadas cables de fibra óptica. La luz emitida por la fuente se envía a través de fibras transparentes en los cables y emerge en el extremo de la fibra. El haz transmitido o reflejado es llevado entonces al receptor a través de fibras diferentes. Ideales para detectar objetos pequeños, los cables de fibra óptica se pueden montar en lugares que de otra forma serían inaccesibles para los sensores fotoeléctricos. Otras características o ventajas de los sensores de fibra óptica incluyen:

- Algunas puntas de fibra óptica de vidrio tienen la capacidad de resistir altas temperaturas.
- Soportan choques y vibraciones extremos
- A menudo sus tiempos de respuesta son bastante cortos

Hoy en día, una gran cantidad de sensores de fibra óptica ya han sido desarrollados. Sensores detectores de parámetros acústicos, eléctricos, magnéticos, de medición de rotación, aceleración, presión y temperatura, así como de vibración en estructuras civiles, aeroespaciales y aeronáuticas, fueron aplicados a hidrófonos, magnetómetros, giróscopos, acelerómetros, y otros dispositivos que, entre las ya comentadas ventajas que ofrecen, poseen una gran sensibilidad.

#### **4.4 INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICA**

Hasta la fecha, a pesar de que los sistemas comerciales de monitoreo están siendo continuamente optimizados en su diseño para ser perfectamente adecuados a pruebas sobre estructuras a escala, la mayoría de estos sistemas ofrecidos en el mercado, e instalados, siguen empleando múltiples cables para su operación. Extensas longitudes de cable son instaladas en la estructura para enlazar la comunicación de forma directa entre los sensores y el sistema central de depósito de datos. Desafortunadamente, cuando estos sistemas son implementados en estructuras complejas de escala real, como los son puentes o edificios, no resultan ser tan convenientes; tanto el tiempo de instalación como el costo pueden elevarse considerablemente. Por ejemplo, el tiempo de instalación de un sistema de monitoreo de tamaño moderado puede consumir alrededor del 75% del total del tiempo de una prueba, con un costo aproximado de instalación del 25% del costo total del sistema. En California, por mencionar algo, 61 de los 22 000 puentes construidos en dicho estado han sido instrumentados con un costo cercano de \$300 000 USD por unidad, para un sistema de 60 canales.

Por lo anterior, y gracias al desarrollo tecnológico de los dispositivos de medición así como de las comunicaciones, actualmente es posible constituir un sistema de monitoreo sísmico con elementos de detección (sensores) inalámbricos, que además de ofrecer la enorme ventaja de no lidiar con cables en su instalación, resulta confiable y más benévolo en cuanto a costo. Al erradicar la necesidad del uso de cables, el sistema inalámbrico reduce significante el costo así como la dificultad y el tiempo de instalación. En otras palabras, el sistema de monitoreo inalámbrico, además de entregar una ventaja costo-beneficio, garantiza una instalación rápida y flexible.

La flexibilidad de la red de comunicación inalámbrica entre sensores permite la modulación del sistema, al mismo tiempo que reduce la dependencia sobre una única unidad centralizada de adquisición de datos para la coordinación de las actividades del sistema. Los nuevos sistemas inalámbricos son llamados Wireless Modular Monitoring Systems (WiMMS).

Otra innovación significativa de este sistema es la migración de la energía de cómputo de la unidad centralizada de adquisición de datos a los sensores. Así, teniendo la energía de cómputo distribuida en las unidades de detección, se puede facilitar potencialmente el procesamiento paralelo de la información, pues todos los sensores activos que participan en la prueba, simultáneamente, y por sí mismos, podrán ejecutar un procesamiento local de la información que han adquirido de la estructura. Dicho de otra manera, las unidades de detección poseen una funcionalidad autónoma. Esta propiedad, aunada a algunos algoritmos propuestos para este tipo de sensores, permite contar con aplicaciones como la detección, en tiempo real, de daños presentes en una estructura.

Muchos investigadores ya han explorado el uso de los sensores inalámbricos en acciones relativas al monitoreo estructural. Straser y Kiremidjian son pioneros en la adopción de sensores inalámbricos de bajo costo en sistemas estructurales de monitoreo. A partir de su estudio, una gran variedad de sensores inalámbricos prototipo han sido creados por otros investigadores -Lynch (2002), Casciati (2003) y Shinozuka (2003)-. Amén de estos esfuerzos, otros investigadores han concentrado su interés en la aplicación, para estructuras civiles, de soluciones genéricas de los sensores inalámbricos que se ofrecen por el sector comercial. Una plataforma de sensor inalámbrico especialmente popular, denominada Sistema Mote, fue desarrollada en la Universidad de Berkeley y comercializada por compañías tales como Crossbow e Intel.

Hoy en día, sensores inalámbricos prototipo ya han sido instalados tanto en modelos estructurales de laboratorio como en estructuras de escala real. Investigadores como Ruíz Sandoval, Spencer y Murata (2003), y Glasser (2004), han aplicado sensores inalámbricos Crossbow MICA Mote para monitorear estructuras a escala en laboratorio. Otros sistemas de este tipo han sido exitosamente montados sobre el Puente del Cañón de Alamosa en Nuevo México y sobre el Puente Guemdang en Korea.

Los requisitos de funcionamiento de los sensores inalámbricos pensados para la supervisión estructural son muchos. Primero, los sensores inalámbricos no deben ser costosos, con el fin de hacer económicamente factible la instalación de diversas unidades, quizá centenares de ellas, en una misma estructura. Debido a que los sensores inalámbricos poseen una fuente de alimentación limitada, comúnmente un paquete de baterías, estos deben ser capaces de operar bajo un consumo diminuto de energía y ser programados con algoritmos de uso eficiente de energía. Con el empleo de unidades de detección inalámbricas, pueden ser alcanzados métodos más efectivos para la identificación de daños, gracias a su capacidad de colaboración peer-to-peer y a su distribución en toda la red. Para lograr esto, el rango de comunicación de las unidades de detección debe ser lo suficientemente adecuada para permitir un espaciamiento óptimo entre éstas. En otras palabras, dicho espaciamiento no debe estar restringido por el rango de comunicación de las unidades. Para conseguir el uso eficiente de energía, tal sistema requiere la minimización de la comunicación entre los sensores, ya que, generalmente, el radio es el mayor consumidor de energía dentro de la unidad.

Los sensores inalámbricos poseen el potencial de cambiar radicalmente la forma en que serán diseñadas las futuras generaciones de sistemas de monitoreo. Las próximas unidades de detección se apegarán al desarrollo tecnológico, incorporando las nuevas aplicaciones que apenas emergen en el mercado. Los esfuerzos se concentran en investigar avanzados dispositivos inalámbricos que son energéticamente más eficientes que el actual modem inalámbrico ProxLink. Un modem inalámbrico Bluetooth, apoyando el protocolo de red inalámbrico ad-hoc Bluetooth, está siendo considerado como una alternativa para ser incorporado dentro de la unidad de detección.

## CAPÍTULO 5

### PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN FUTURA

El desarrollo de este capítulo se centra, primero, en justificar el uso de la tecnología electa para realizar el proyecto de monitoreo estructural continuo del sistema estructural en estudio, y, más adelante, en presentar la propuesta estratégica, en función de los recursos disponibles del proyecto, del arreglo de instrumentos de medición que deberán instalarse para conseguir toda la información de interés.

#### **5.1 ¿POR QUÉ INSTRUMENTAR AL CONJUNTO CON UN SISTEMA COMBINADO GPS-ACELERÓMETRO?**

El principal objetivo del monitoreo estructural continuo en tiempo real, como ya se comentó, es registrar los desplazamientos o los cambios en las características dinámicas de una estructura por efecto de algún evento extraordinario, en su mayoría sismos. Dicha información es empleada más tarde para detectar daños estructurales o zonas de vulnerabilidad que más adelante tendrán que ser reforzadas.

Puesto que los daños en una estructura normalmente se traducen en una pérdida de su rigidez, y las frecuencias naturales están directamente relacionadas con tal parámetro, típicamente, y como ya se comentó en el capítulo anterior, se recurren a registros de aceleración para buscar cambios en dichas frecuencias que denoten la presencia de algún daño.

No obstante, de acuerdo a la experiencia ganada de algunas estructuras estudiadas, tal procedimiento ha demostrado ser poco confiable. Por ejemplo, por un lado se ha observado que, debido a que la respuesta dinámica de una estructura dañada es no lineal, y en muchos casos de tipo plástica, los cambios plásticos en la rigidez propician que las frecuencias naturales varíen rápidamente durante los movimientos que ocasionan los daños. Tales variaciones generalmente pasan desapercibidas por los instrumentos de aceleración. Por lo que, aunque una estructura se encuentre dañada, las frecuencias antes y después del evento sísmico pueden resultar muy semejantes, ya que el daño ha ocurrido en la forma de desplazamientos permanentes (desplazamientos estáticos y rotaciones).

Por otro lado se ha observado que un cambio en una frecuencia no siempre representa un daño en la estructura. El análisis de registros de seis sismos, al igual que de registros obtenidos de pruebas de vibración ambiental, todos ellos provenientes de un edificio de estructura metálica de 40 niveles en Los Ángeles, ha demostrado que, aunque el edificio no presentó daño alguno por efecto de alguno de estos fenómenos, sus frecuencias de vibración cambiaron hasta en un 30% debido a las no linealidades en su respuesta y a los efectos de interacción suelo-estructura. Algunas observaciones similares fueron hechas en otros edificios del área de Los Ángeles. En otro estudio, se ha demostrado, analizando registros continuos a lo largo de dos años de la Biblioteca Millikan de Caltech, que las frecuencias naturales de un edificio pueden cambiar significativamente debido a factores ambientales, tales como la precipitación, velocidad del viento y temperatura.



Por lo anterior, se puede afirmar que la detección precisa de los daños en una estructura no puede ser confiada únicamente a los cambios en las frecuencias naturales de la misma, sino que también, y más importante aún, se deberá poner especial atención en los cambios permanentes que ha sufrido la configuración tridimensional de la estructura en estudio.

Estos cambios permanentes (deformaciones) de una estructura, pueden ser detectados actualmente de forma directa y precisa mediante algunos instrumentos de medición, tales como los dispositivos GPS. Hoy en día, por mencionar algo, diversas instrumentaciones tradicionales que empleaban únicamente sensores de aceleración, están siendo complementadas con este tipo de dispositivos, que, debido a los grandes beneficios que ofrecen y a su tecnología creciente, se han convertido en los instrumentos de medición más promisorios en el futuro del monitoreo estructural.

Enunciado lo anterior, para el proyecto de monitoreo del Conjunto Tlatelolco, se ha optado por utilizar sensores de aceleración (acelerómetros), junto con dispositivos de medición GPS. Estas dos tecnologías trabajando simultáneamente proporcionarán información de la cual se desprenderán conocimientos de gran valor, no sólo en cuanto al comportamiento estructural de este sistema en particular, sino de manera general, sobre el comportamiento de todos los sistemas estructurales que yacen sobre el suelo blando de la Ciudad de México.

### 5.2 PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN

El arreglo de instrumentos de medición que aquí se recomienda, ha sido pensado estratégicamente considerando dos aspectos muy importantes: el primero, optimizar los recursos disponibles del proyecto, específicamente hablando de los instrumentos de medición; y, el segundo, que a través de este arreglo se logre conseguir toda la información requerida del estudio.

Siguiendo estas dos consideraciones, el sistema de instrumentación propuesto estará compuesto, como ya se comentó, por dos tipos de sensores: sensores de aceleración o acelerómetros, de los cuales se tendrán de dos tipos: uniaxiales y triaxiales; y, sensores de desplazamiento o dispositivos GPS.

Como es sabido, la ventaja del uso de acelerómetros triaxiales respecto de aquellos que limitan su medición a una sola dirección, es que proporcionan simultáneamente registros en 3 direcciones ortogonales. No obstante, para el proyecto de monitoreo a efectuarse se valdrán de acelerómetros tanto triaxiales como uniaxiales, pues, por un lado, no se cuenta con los suficientes dispositivos triaxiales para todos los puntos de medición, y, por otro, que en determinados puntos de medición nuestro interés se centra primordialmente en el registro de una o, a lo más, dos direcciones, por lo que un tercer registro en ese punto no tendría demasiada relevancia para fines del estudio.

Entendido lo anterior, en la siguiente figura (Fig. 5.1) se muestra el arreglo propuesto para el monitoreo estructural del Conjunto, el cual se explica en los párrafos siguientes.

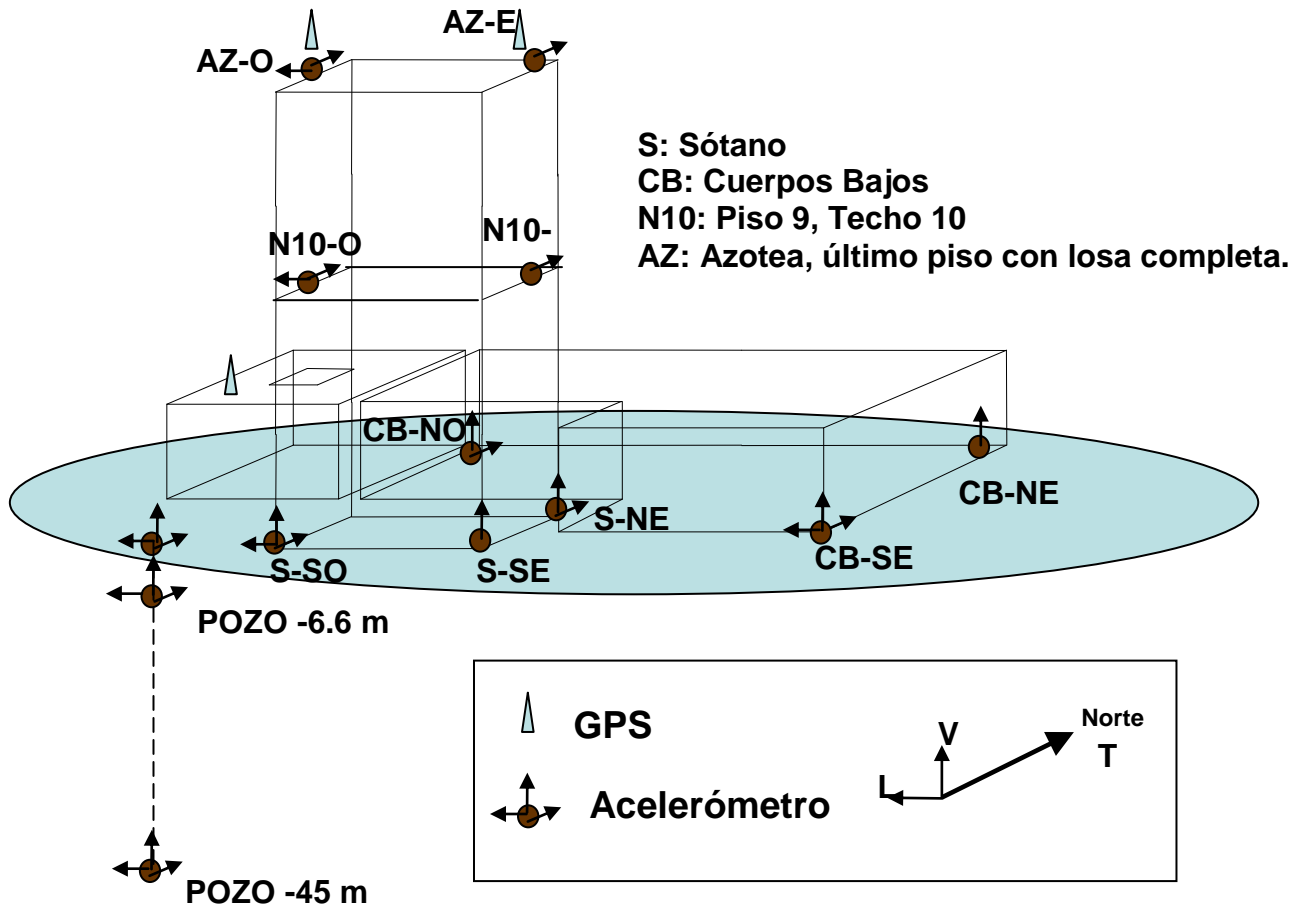


Fig. 5.1 Arreglo de instrumentos de medición sobre el Conjunto

Como se puede observar en la figura anterior, en el arreglo propuesto aparecen tres dispositivos GPS, de los cuales dos se recomienda ser instalados sobre el nivel más elevado de la Torre para poder registrar con ello los desplazamientos más críticos del inmueble. Estos dos dispositivos además deberán guardar posiciones opuestas, ya que con ello será posible valorar las torsiones del edificio. La tercera unidad, que servirá como referencia para las unidades de la azotea, podrá ubicarse en cualquier sitio del terreno, lo más próximo a la base de la Torre o, de otra manera, sobre algún cuerpo lo suficientemente rígido para que las mediciones provenientes de este instrumento sirvan realmente como referencia.

Otra consideración importante para la ubicación de estos instrumentos, es que el lugar electo deberá tener una excelente visibilidad al cielo para que éstos puedan comunicarse libremente con al menos cinco satélites de la constelación GPS. De otra manera las señales entre éstos y los satélites pueden verse afectadas, lo que propiciaría vacíos o errores mayores a los especificados en los registros de estos dispositivos.

## 5. PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN FUTURA

---

Afortunadamente, como se puede apreciar en la Fig. 5.2, en las proximidades del edificio no se encuentran construidos edificios de mayor altura o cuerpos de estatura considerable que pudiesen obstruir las señales dirigidas hacia los equipos GPS.

De cualquier modo, es aconsejable que antes de colocar formalmente cada equipo GPS sobre el sitio seleccionado, se verifique, mediante unidades portátiles GPS, la buena comunicación entre satélites y unidades de recepción.

Mencionado lo anterior, las posiciones electas para los dispositivos de azotea son: Azotea-Oeste y Azotea-Este (AZ-O y AZ-E, ver Fig. 5.1), mientras que el instrumento de referencia, por cuestiones de seguridad, se colocará en la azotea del Cuerpo Bajo (CUA).



Fig. 5.2 Foto panorámica del Conjunto

Respecto a los acelerómetros, de éstos se contarán con 5 unidades de tipo triaxial y 12 unidades de tipo uniaxial. Dos de las unidades triaxiales serán ubicadas en dos pozos yacentes a distinta profundidad: 6.6 m y 45 m, a partir del nivel de banquetta (Fig. 5.1). Los registros provenientes de estas dos unidades serán de gran importancia, pues con ellos se podrán conocer, de manera cuantitativa, los efectos en las aceleraciones de las ondas sísmicas debidos a los estratos potentes de arcilla, característicos de la Zona Lacustre de la Ciudad de México.

Los tres dispositivos triaxiales restantes serán posicionados, uno, a nivel de banquetta y fuera de cualquiera de los inmuebles del conjunto para servir como referencia, mientras que los otros guardarán las posiciones Sótano Suroeste de la Torre y Cuerpo Bajo Sureste (S-SO y CB-SE). Estos dispositivos permitirán, entre otras cosas, conocer los efectos del cabeceo en la cimentación del Conjunto.

## 5. PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN FUTURA

---

Los instrumentos uniaxiales (servoacelerómetros) seguirán el siguiente arreglo: 9 serán colocados en la Torre, de los cuales, para medir las traslaciones en ambas direcciones horizontales, cuatro serán montados al Oeste de este inmueble: dos en la azotea y dos en el nivel 10. Los registros obtenidos de estos instrumentos se trabajarán conjuntamente con aquellos proporcionados por el acelerómetro triaxial posicionado en el punto S-SO de la Torre.

Los cinco servoacelerómetros más destinados a la Torre, se ubicarán al Este de este edificio: uno en la azotea orientado en la dirección transversal y que estará alineado con un segundo instrumento, con la misma orientación que el primero, ubicado en el nivel 10. Las otras tres unidades se montarán a nivel del sótano, dos en el punto S-NE, ofreciendo medidas en la dirección vertical y transversal, y uno más en el punto S-SE, proporcionando registros en la dirección vertical. Los registros de las tres unidades de este lado de la estructura orientados hacia la dirección transversal, además de ofrecer información de las traslaciones en esa dirección, al ser trabajados conjuntamente con los registros proporcionados por los instrumentos del lado oeste que guardan la misma orientación, se podrán obtener resultados sobre la torsión de la Torre. Los datos de los instrumentos orientados en la dirección vertical, al ser trabajados conjuntamente con los registros de la misma dirección provenientes del instrumento triaxial del punto S-SO, proporcionarán información relativa al cabeceo del inmueble.

Finalmente, y para completar las doce unidades uniaxiales, dos instrumentos más serán colocados en el punto CB-NO, brindando medidas en las direcciones transversal y vertical, y un último en el punto CB-NE, arrojando información en la dirección vertical. Básicamente estas unidades serán ocupadas también para estudiar efectos de cabeceo en la cimentación del conjunto.

En resumen, siguiendo el arreglo descrito anteriormente, se obtendrán valores de traslación en las direcciones transversal y longitudinal de la Torre. Adicional a ello, se conseguirá información relativa a la torsión del inmueble, y, mediante los instrumentos de medición posicionados en vertical, se conseguirá información sobre el fenómeno de cabeceo en la cimentación del conjunto. Finalmente, a través de los instrumentos ubicados en los pozos, se recavará información valiosa relativa al efecto que sufren en su aceleración las ondas sísmicas cuando se propagan a través de los materiales que componen el subsuelo característico de la Zona Lacustre de la Ciudad de México.

Con la información anterior, además de los beneficios ya citados que se obtendrán de realizar este estudio, debido a la condición de desplome que actualmente presenta la Torre, se podrá evaluar la eficacia de algunos de los trabajos de rehabilitación ejecutados sobre la misma, lo cual alimentará el criterio para conducir las futuras intervenciones de rehabilitación.

## CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado en el presente trabajo, podemos concluir lo siguiente:

- Las pruebas de vibración ambiental son útiles principalmente para el estudio de estructuras flexibles, como es el caso de la Torre, de la cual fue posible determinar sus frecuencias de vibrar en traslación y torsión correspondientes a modos de vibrar superiores.

Para el caso de cuerpos rígidos, como lo son los Cuerpos Bajos (CUA) y (L), el método de vibración ambiental para la determinación de propiedades dinámicas no es muy recomendable, ya que debido al bajo nivel de excitación con el que se trabaja, los resultados que pueden recogerse por lo general son pobres y, además, contienen un alto grado de incertidumbre. Por este motivo, aunado al hecho de que en este estudio en particular los Cuerpos Bajos no pueden ser estudiados de manera independiente por poseer una cimentación compartida con la Torre, los resultados de frecuencias obtenidos tuvieron que ser manejados por intervalos, además de que resultó imposible asociarlos a algún modo de vibrar en específico.

- La evidente diferencia de las frecuencias resultantes de los Cuerpos Bajos respecto de aquellas obtenidas para la Torre, claramente denotan cuán más rígidos son los primeros en comparación de la segunda.
- El efectuar dos análisis paralelos para la Torre, uno con 2048 y otro con 4096 puntos, permitió verificar que, aunque la resolución de los espectros aumenta al doble entre unos y otros, las diferencias de los valores de frecuencia obtenidos por ambos caminos resultan poco significativas.
- El hecho de resultar menores los periodos de la Torre en la dirección T, respecto de los de la dirección L, permite deducir que este edificio es más rígido en la primera dirección.
- Según los valores de amortiguamiento obtenidos para la torre en traslación, éstos resultan mayores, del orden del 9%, si se considera un sistema suelo-estructura, que para el caso de un sistema de base empotrada. Con ello se comprueba que el efecto de interacción suelo-estructura se traduce en una diseminación de la energía de la estructura.

Los cuerpos bajos, a pesar de que presentaron la misma tendencia, en la dirección T se presentó un mucho mayor amortiguamiento que en la dirección L.

## CONCLUSIONES

---

- Los efectos de Interacción Suelo-Estructura para la dirección L de la torre resultan moderados para los dos casos presentados (con y sin cuerpos bajos). Por el contrario, para la dirección T, dichos efectos son considerables, aumentando en ambos casos 36% en promedio el periodo fundamental de la Torre en esta dirección.
- Para el caso de la Torsión, el incremento del periodo torsional de la torre para los dos casos presentados, resultó poco significativo.
- Para tener mayor certeza sobre los resultados referentes a los efectos de interacción suelo-estructura, resultaría conveniente que dichos efectos fueron evaluados mediante otro método, ya que el Método de Luco, aquel con el que fueron obtenidos los valores presentados en este trabajo, es un método simplificado que puede conllevar a resultados desapegados de la realidad.
- Los valores desprendidos de las pruebas de vibración ambiental, además de ser utilizados para alimentar modelos analíticos de la estructura con los cuales es posible simular de manera más aproximada el comportamiento de la misma, servirán como referencia para el proyecto de monitoreo estructural continuo a implementarse sobre el conjunto.
- La disponibilidad de instrumentos sofisticados de medición (equipos GPS y acelerómetros de alta resolución) para el proyecto de monitoreo estructural a efectuarse, permitirá conocer, por un lado, los desplazamientos de la Torre de forma directa y, por otro, la evolución de las propiedades dinámicas del Conjunto durante el periodo de instrumentación. Esta información servirá para detectar posibles daños que podría sufrir la estructura por efecto de sismos y, en función de ello, tomar las medidas pertinentes para corregir el inadecuado comportamiento de los elementos afectados. Además, debido al estado de desplome que presenta la Torre, mediante este estudio será posible evaluar la eficacia de las diferentes acciones de rehabilitación que paulatinamente serán tomadas para corregir esta hostil condición.

Paralelamente, dado que los instrumentos GPS han sido recientemente adquiridos, este proyecto permitirá conocer los alcances y las limitantes de esta tecnología.

Para concluir, cabe resaltar que, a pesar de que el estudio será efectuado sobre una estructura en particular, el conocimiento ganado no será único de esta estructura, sino que reforzará el panorama sobre el comportamiento estructural de todos aquellos inmuebles que se desplantan sobre el suelo lacustre de la Cd. de México.

## REFERENCIAS

### **BIBLIOGRAFÍA**

ÁLVAREZ TORRESVALLE, Jhave *Estudio de Vibración Ambiental en el Tramo Barranca del Muerto-Las Flores del Segundo Nivel del Periférico de la Ciudad de México*, UNAM, México, 2004

BLANCO URRUTIA, Fidel *Monitoreo Inclinométrico de Taludes*, Ministerio de Obras Públicas, Vivienda y Desarrollo Urbano, República de El Salvador, 2003

CAMARGO, José y CRUZ, Carlos *Determinación Experimental de Propiedades Dinámicas y Efectos de Interacción Suelo-Estructura en un Edificio de 18 Niveles Desplantado en la Zona Lacustre de la Ciudad de México*, UNAM, México, 2004

CLEMENT, Ogaja y otros *Advances in Structural Monitoring with Global Positioning System Technology: 1997-2006*

CRUZ, Manuel *Determinación Experimental de los Efectos de Interacción Suelo-Estructura en dos edificios localizados en la Cd. de México*, UNAM, México, 2007

LYNCH, J.P. y otros *Post-seismic Damage Assessment of Steel Structures Instrumented with Self-Interrogating Wireless Sensors*, 2006

LYNCH, J.P. y LOH, Kenneth *A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring*

LÓPEZ ACOSTA, N *Proyecto de Rehabilitación del Edificio de la Torre Mayor del Centro Cultural Universitario Tlatelolco*, 2005

LÓPEZ MORALES, Juan *Diseño de un sistema de Adquisición de Datos para Medición de Vibración Ambiental en Campo*, UNAM, México, 2003

MENDOZA CARBAJAL, Roberto *Propiedades Dinámicas del Puente Coatzacoalcos II*, UNAM, México, 2004

SILVA LANG, Enrique *Comparación de la Respuesta Sísmica de un Edificio de Concreto de Cuatro Niveles con Resultados de Propiedades Dinámicas Obtenidas Experimentalmente*, UNAM, México, 2005

URIBE CASTAÑEDA, B *Algunas Consideraciones Sobre el Conjunto de Edificios de la Secretaría de Relaciones Exteriores en Tlatelolco*, 2005

Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, 2004

**HEMEROGRAFÍA**

**MÉXICO DESCONOCIDO**

Dirección Web: <http://www.mexicodesconocido.com.mx/notas/4555-Visita-de-Hernán-Cortés-a-Tlatelolco>

**CIUDAD DE MÉXICO**

Dirección Web: <http://www.ciudadmexico.com.mx/sitios/tlatelolco.htm>

**DELEGACIÓN CUAUHTÉMOC**

Dirección Web: <http://www.cuauhtemoc.df.gob.mx/delegacion/mapa/colonias.html>

**UNIVERSIDAD DE FLORIDA – EXTENSIÓN IFAS**

Dirección Web: <http://edis.ifas.ufl.edu/IN657>

**ENCICLOPEDIA LIBRE WIKIPEDIA**

Dirección Web: [http://es.wikipedia.org/wiki/Conjunto\\_Urbano\\_Nonoalco\\_Tlatelolco](http://es.wikipedia.org/wiki/Conjunto_Urbano_Nonoalco_Tlatelolco)

**NASA**

Dirección Web: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AIPC.1020..848C>