

---

---

## **CAPÍTULO 4.**

### **LA INSTRUMENTACIÓN DE OBRAS CIVILES EN MÉXICO.**

La instrumentación de edificios en México, inicia en el año de 1950 con la instalación de transductores de desplazamiento en la Torre Latino Americana, en una primera etapa y posteriormente con la incorporación de algunos acelerógrafos (Alcántara et al., 2005). Después del sismo de San Marcos ocurrido en 1957, cuya magnitud fue de 7.5 en la escala de Richter y que derribó el monumento conocido como el Ángel de la Independencia, los ingenieros mexicanos reconocieron la necesidad de medir las ondas sísmicas generadas por temblores fuertes desde su origen, para estudiar sus efectos en el suelo y especialmente en las estructuras vulnerables a los daños que producen.

El resultado de los registros sísmicos obtenidos a partir de la segunda mitad del siglo XX en nuestro país fue una referencia para establecer los coeficientes sísmicos propuestos en las normas de construcción del Distrito Federal, los cuales, son fundamentales para el diseño sismo-resistente de edificios en la actualidad. Desafortunadamente esto no motivó el interés para instrumentar edificios a pesar de que la idea fue promovida por grandes personalidades de la Ingeniería civil como el Dr. Leonardo Zeevaert, así como por el Instituto de Ingeniería de la UNAM a través del Ing. Jorge Prince. La cantidad de edificios instrumentados en el país era prácticamente nula cuando ocurrieron los sismos de septiembre de 1985, por ello, se perdió la oportunidad de realizar evaluaciones estructurales cuantitativas en las construcciones de las poblaciones afectadas por el sismo de Manzanillo, el cual, resultó ser de gran intensidad y magnitud. A partir de estos acontecimientos, se han realizado grandes esfuerzos por lograr la expansión y modernización de la red acelerográfica mexicana a fin de caracterizar adecuadamente la respuesta sísmica en diversos sitios del país. De la información recabada, se han abierto diversas líneas de investigación, de las cuales, se han desarrollado algunos trabajos, tales como la elaboración de mapas de riesgo sísmico, la microzonificación de áreas de terreno blando donde se han desarrollado importantes asentamientos urbanos y la creación de un Atlas de riesgos sísmicos.

Actualmente, el número de edificios instrumentados en se reduce a menos de 30 en todo el país debido a lo elevado de los costo que implica el realización de estos trabajos (Alcántara et al., 2005). Sin embargo, el uso de instrumentación temporal para la realización de pruebas en campo ha comenzado a ganar terreno. Algunas instituciones tales como la Comisión Federal de Electricidad han solicitado al II-UNAM la realización de pruebas de vibración ambiental para la elaboración de estudios que permitan determinar la condición estructural de algunos de sus edificios. Por otra parte, el Gobierno del Distrito Federal a través del Comité Técnico que apoyó el desarrollo del proyecto del Distribuidor vial de San Antonio solicitó la elaboración de diversas pruebas para verificar los parámetros de diseño empleados en la construcción de las pilas que conforman la subestructura. Para este propósito, se llevaron a cabo, ensayos de carga con camiones de volteo y de tracción con grúa, de los cuales se midió la vibración del ambiente y los desplazamientos inducidos a las columnas. La figura 4.1 muestra algunos de los resultados obtenidos. Inclusive se tiene en mente la puesta en marcha de algunas pruebas para auxiliar el proceso constructivo de la línea 12 del metro en algunos puntos específicos. Lo cual, representa un panorama prometedor para la práctica del monitoreo estructural en nuestro país.

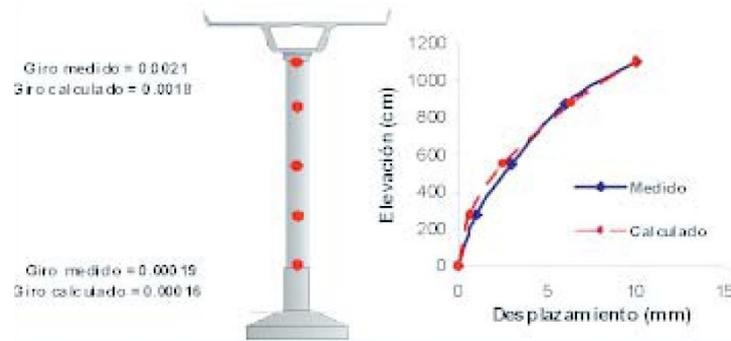


Figura 4.1: Deformación medida y calculada en el eje A15 para la prueba de tracción con grúa (CT, 2005)

#### 4.1 Algunos ejemplos de obras civiles instrumentadas en México.

La mayoría de las obras civiles que conforman la infraestructura de nuestro país y particularmente en la ciudad de México, se ven afectadas en gran parte por la propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo, por lo cual, el mayor porcentaje de los esfuerzos para instrumentar edificios se encamina a estudiar su respuesta sísmica (Alcántara et al., 1991; Meli et al., 1994). La gran mayoría se localiza en el Distrito Federal, por lo tanto, el II-UNAM ha instrumentado nueve estructuras de las cuales, cinco son edificios, un monumento histórico, una red de conducción de agua potable, un puente vehicular y un relleno sanitario, tal como lo indica la siguiente tabla:

Edificio	Puntos de Medición	Características
Córdoba	13	Edificio de concreto reforzado de 18 niveles
Juárez	5	Edificio de concreto reforzado de 12 niveles
Jalapa	14	Edificio de concreto reforzado de 14 niveles
Sistema Cutzamala	3	Tubería de abastecimiento de agua a la ciudad de México
Catedral	6	Monumento Colonial (Catedral Metropolitana de la ciudad de México)
Puente Impulsora	5	Puente Vehicular de concreto prefabricado
SIS	24	Edificio de concreto reforzado (Cd. de Acapulco) 18 niveles
Relleno Sanitario	5	Macroelda de un relleno sanitario en la zona de Texcoco
Telecomm	29	Torre de telecomunicaciones, edificio de concreto reforzado de 18 niveles

Tabla 4.1: Estructuras instrumentados por el Instituto de Ingeniería en México (Alcántara, et al., 2005)

Los primeros cinco edificios que aparecen en la tabla son de concreto reforzado, cuatro de ellos localizados en la ciudad de México (Córdoba, Juárez, Jalapa y Telecomm) y uno en la ciudad de Acapulco (SIS). Todos ellos cuentan con instrumentación sísmica permanente dotada por una red de acelerómetros triaxiales colocados en forma similar. Adicionalmente a los edificios que aparecen en la tabla 4.1 se han añadido otras construcciones, entre las cuales se pueden mencionar el puente Chiapas y el puente San Cristóbal que se localizan en el estado de Chiapas; la Torre del Centro Cultural Universitario de Tlatelolco y el Palacio Nacional, en el Distrito federal (aunque este último ya se encontraba instrumentado desde el año de 1994, se le han

incorporado más dispositivos últimamente). Y finalmente, un tramo del Viaducto Bicentenario, el cual fue inaugurado recientemente en el Estado de México. A continuación, se citan algunos ejemplos de construcciones dotadas con instrumentación sísmica, así como con otros tipos de instrumentación:

#### 4.1.1 Edificio Jalapa.

El edificio se localiza en una zona de suelo blando de la ciudad de México, en donde el espesor del suelo arcilloso es de 30 m y los depósitos profundos se encuentran a 38.5m. Está compuesto por una estructura de concreto reforzado con catorce niveles, un apéndice y un cuerpo anexo de tres niveles, los cuales están unidos en la planta del sótano y separados de los niveles restantes por una junta constructiva de 15 cm. Cuenta con una instrumentación sísmica la cual fue colocada durante el mes de octubre y noviembre de 1992.

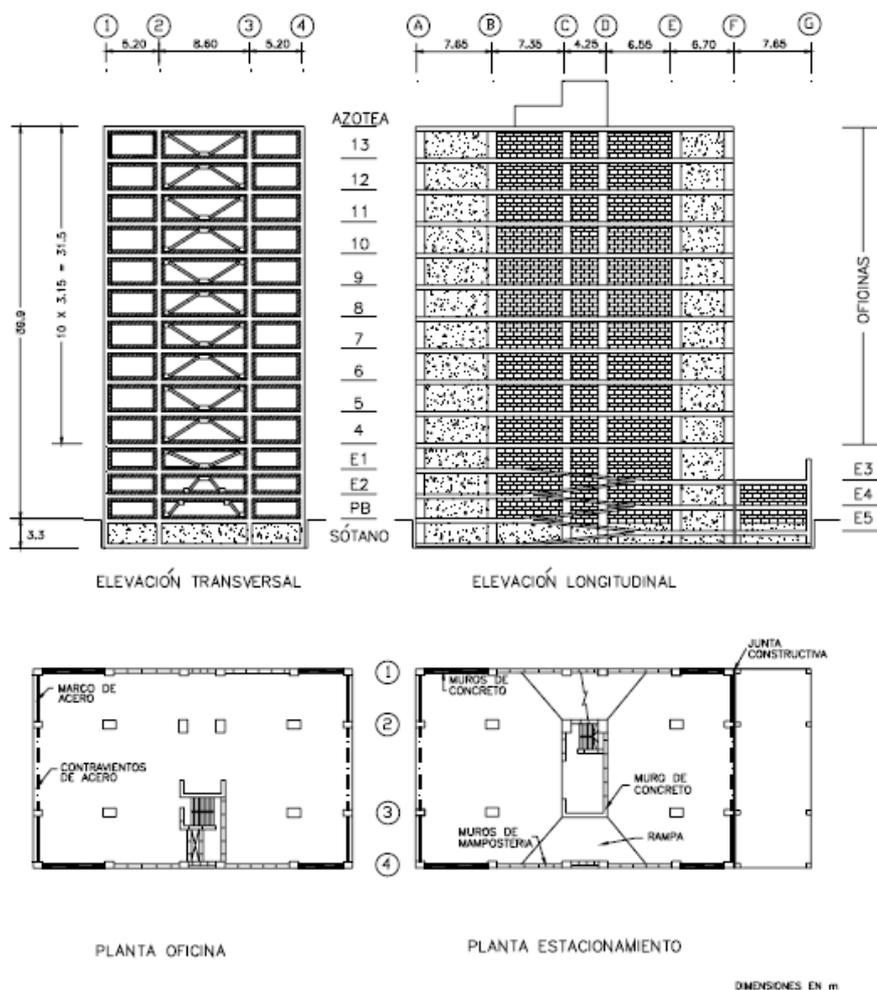


Figura 4.2: Plantas y elevaciones del edificio Jalapa.

Se seleccionaron un total de 14 puntos de observación donde se colocaron acelerógrafos triaxiales, de los cuales, dos se colocaron en pozos profundos a 20 y 45 m, uno al nivel del terreno, cuatro en el sótano, dos en el nivel 5, dos en el nivel 10 y tres en la azotea (Meli et al, 1998). La figura 4.3 muestra la localización de la instrumentación colocada en el edificio Jalapa, la cual tuvo que ser retirada por solicitud del propietario en el año 2006.

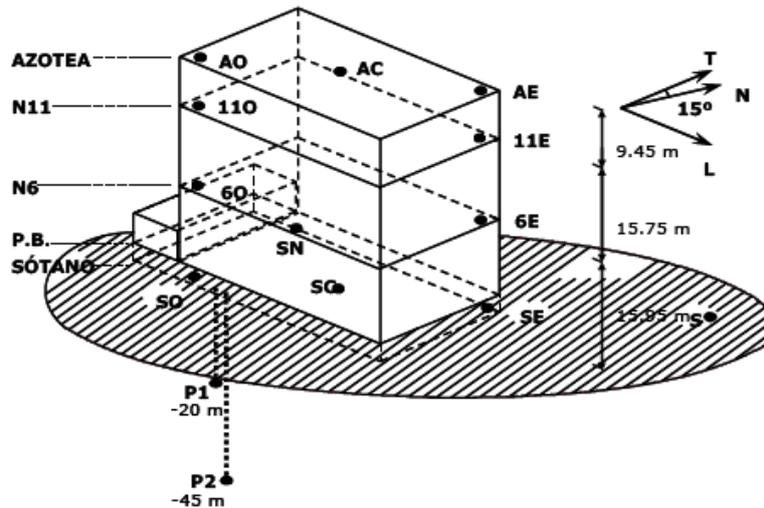


Figura 4.3: Instrumentación del edificio Jalapa.

#### 4.1.2 Catedral metropolitana.

La Catedral Metropolitana es un monumento colonial histórico localizado en el centro de la ciudad de México, el cual ha sufrido los hundimientos diferenciales de la ciudad presentando un desnivel de 2.4 m. En 1997, durante el proceso de rehabilitación se decidió instrumentarla para conocer su comportamiento tanto durante el proceso de nivelación como ante la ocurrencia de temblores. A la fecha se han registrado cerca de 16 sismos y la información que han arrojado ha servido para la toma de decisiones correctivas que han llevado al monumento a condiciones de seguridad aceptables al disminuir el desnivel a 1m. La figura 4.4 muestra la localización de la red acelerográfica que está integrada por seis acelerógrafos triaxiales, cinco colocados en la estructura y uno de referencia fuera de la misma.

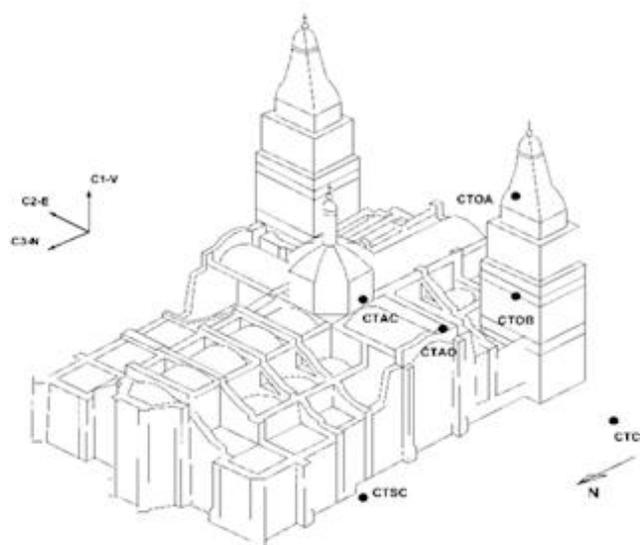


Figura 4.4: Instrumentación acelerográfica de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México

### 4.1.3 Centro Cultural Universitario Tlatelolco.

El centro cultural Universitario Tlatelolco (CCUT) se localiza al norte de la ciudad de México colindando con la Plaza de las tres culturas que forma parte del conjunto Nonoalco-Tlatelolco. En un principio, este recinto fue destinado para formar parte de las oficinas de la Secretaría de Relaciones Exteriores y posteriormente fue donado a la UNAM, por lo cual, en la actualidad es la sede de una exposición permanente en honor del movimiento estudiantil de 1968. Está conformado por una torre de 22 niveles y por tres edificios de un nivel que tienen un sótano en común.

La historia de movimientos verticales que ha sufrido el conjunto desde su construcción, señala que el conjunto del CCUT se comporta como un cuerpo quasi rígido, en donde los hundimientos menores se presentan en los edificios más bajos de la zona, mientras que los hundimientos máximos se localizan en el lado sur de la torre. La variación de los movimientos verticales concentrados en la esquina sur oeste ha variado de 2.18 a 39.7 cm desde el año de 1965 hasta el 2006.

Las actividades para instrumentar el CCUT se iniciaron en el mes de mayo del 2008 para conocer la evolución de las labores de rehabilitación de la estructura de la torre, las cuales concluyeron en diciembre del mismo año. La instrumentación está conformada por 3 antenas receptoras de GPS que miden el desplazamiento de la torre en tiempo real y 28 acelerómetros de 2g (6 triaxiales y 10 uniaxiales) localizados en diversos puntos de la estructura, los cuerpos bajos, el terreno y el subsuelo. La figura 4.5 muestra la localización de los sensores.

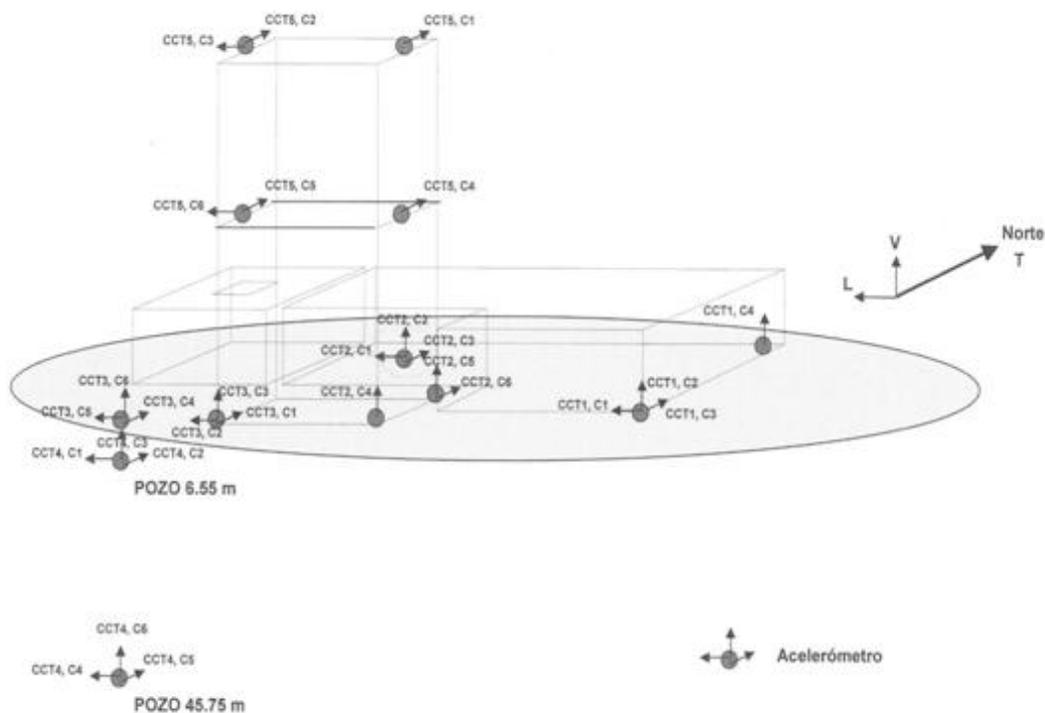


Figura 4.5: Distribución de los sensores instalados en el CCUT

Para registrar las aceleraciones se cuenta con un sistema conformado por cinco registradores, marca Kinematics modelo k2, autónomos de alta resolución de 19 bits con rango dinámico de 120 dB y de bajo consumo de energía. Entre sus principales características destaca su capacidad para registrar tanto la aceleración de las vibraciones ambientales como la de sismos intensos, en manera independiente o con umbrales de activación seleccionables. Los instrumentos almacenan sus funciones en circuitos de memoria internos que pueden ser actualizados de forma remota mediante una conexión directa a una computadora o a través de un modem inalámbrico. Además tiene una capacidad de almacenamiento y transferencia de datos que no requiere de la presencia del usuario en el sitio. Cada registrador cuenta con una señal de tiempo controlada través del GPS con la finalidad de obtener un registro sincronizado que permite conocer con precisión el movimiento relativo de todos los puntos de medición.

#### 4.1.4 Puente impulsora.

El puente Impulsora está ubicado al noreste de la Ciudad de México en el límite con el estado de México, en el municipio de Netzahualcóyotl. Se utiliza para cruzar la línea B del metro. Fue construido a base de traveses de concreto, unas apoyadas en una serie de columnas (traveses de apoyo TA), y otras libremente apoyadas sobre las anteriores (traveses centrales TC), las cuales permiten mitigar el daño producido por los asentamientos diferenciales entre uno y otro apoyo. Las traveses son preesforzadas mediante torones de acero de alta resistencia. La longitud del puente es de 405m, las traveses centrales tienen una longitud de 49 m en el claro central y 17 m en su anchura máxima, lugar donde se encuentran dos carriles de tránsito continuo, dos bahías de ascenso y descenso de pasaje y dos accesos peatonales a la estación del metro ubicada debajo del puente.

La instrumentación de la superestructura está integrada por dos acelerógrafos de seis canales conectados a dos sensores triaxiales, instalados en el interior de las traveses centrales, un sensor triaxial de superficie y un sensor triaxial de pozo profundo. Uno de los acelerógrafos controla el inicio de operación de un registrador modelo CR9000 que adquiere 53 señales entre deformímetros y medidores de desplazamiento LVDT (figura 4.6). La instrumentación es monitoreada remotamente por medio de una línea telefónica convencional.

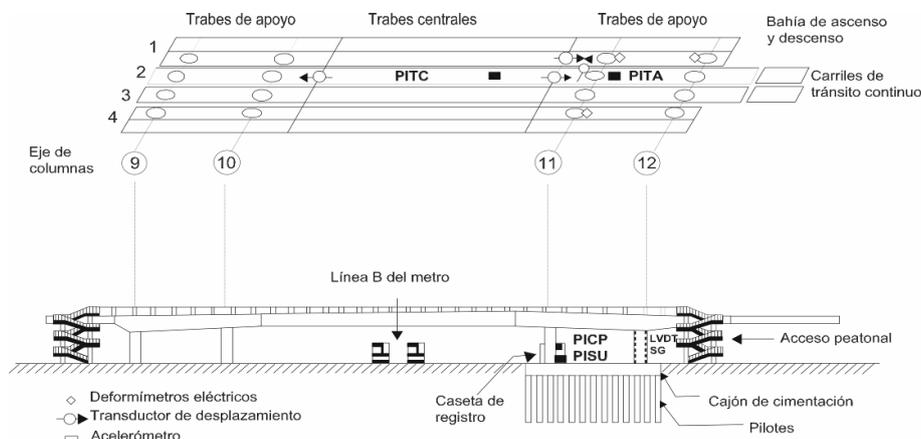


Figura 4.6: Instrumentación sísmica de un puente vehicular.

#### 4.1.5 Puente Chiapas.

Debido a que algunos requisitos previstos en el diseño y construcción de la superestructura del puente Chiapas no se cumplieron plenamente y considerando su importancia y características únicas, se decidió realizar una revisión del diseño original, la cual, dictaminó la necesidad de implementar una red de instrumentación y monitoreo del puente durante el lanzamiento de la superestructura (Gómez et al, 2003b; Gómez et al, 2004; Gómez et al, 2004b). El sistema de instrumentación fue diseñado especialmente para complementar los resultados del modelo matemático utilizado en el diseño y preservar la integridad de la superestructura del puente proporcionando avisos cuando alguno de los parámetros medidos excede los límites de seguridad admisibles. Con tal motivo, fue necesario configurar el sistema para registrar el historial de temperaturas y esfuerzos presentes en el puente mediante el uso de transductores de temperatura, deformímetros, anemómetros y LVDT's. Adicionalmente se incluyó un arreglo móvil de dos acelerómetros orientados en la dirección vertical para medir las vibraciones producidas durante cada ciclo de lanzado. Las siguientes figuras muestran el procedimiento de lanzado y la distribución de los sensores en la superestructura del puente Chiapas:



Figura 4.7: Superestructura del puente Chiapas durante su lanzamiento (Monitor, 2008).

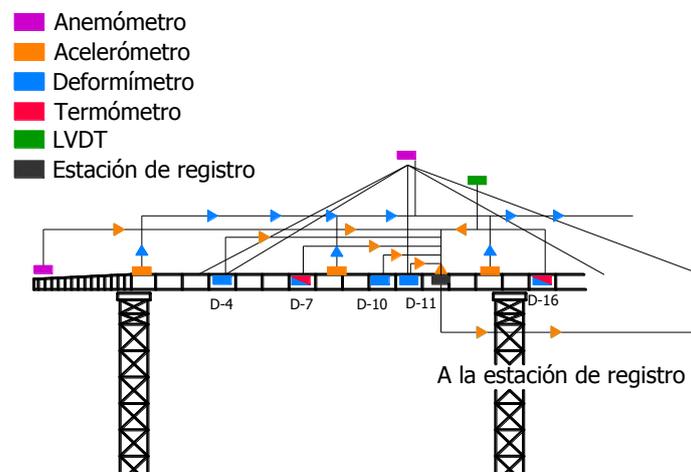


Figura 4.8: Localización de los sensores a lo largo del cantiléver de la superestructura del puente Chiapas (Monitor, 2008)