



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LOS SISTEMAS DE
MONITOREO CONTINUO APLICADOS A LAS OBRAS DE
INGENIERÍA CIVIL”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A:

**LAURA JUSTINA OLIVARES
SÁNCHEZ DE TAGLE**

TUTOR:

ING. ABRAHAM ROBERTO SÁNCHEZ RAMÍREZ

SINODALES:

M. I. VÍCTOR FRANCO

M. I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA

M. I. HÉCTOR JAVIER GUZMÁN OLGUÍN

ING. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN.



México, D. F., agosto del 2012.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/093/11

Señorita
LAURA JUSTINA OLIVARES SÁNCHEZ DE TAGLE
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. ABRAHAM ROBERTO SÁNCHEZ RAMÍREZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

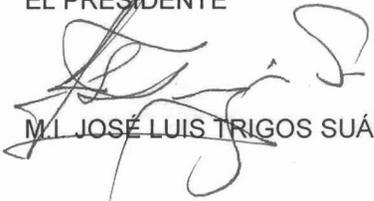
"ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LOS SISTEMAS DE MONITOREO CONTINUO APLICADOS A LAS OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. OBJETIVOS Y ALCANCES
- III. ANTECEDENTES
- IV. SISTEMAS DE MONITOREO CONTINUO
- V. APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO EN LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE DIVERSAS OBRAS CIVILES
- VI. CASO PRÁCTICO
- VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 14 de Septiembre del 2011.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JTS/MTH*gar.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por otorgarme la vida y el poder de discernir y de elegir, por las bendiciones recibidas y los retos que me pone delante y sobre todo, gracias por “coincidir” con las maravillosas familias de las cuales formo parte.

A mi esposo Javier y mis hijos Carlos, Irene y Regina por su gran amor, empatía, entusiasmo y enormes aportes de optimismo y energía, que contribuyeron en gran medida a que permaneciera en el camino.

A mis padres Tere y Chano, por darme la vida, por su gran amor, sabiduría, paciencia y persistencia y por su apoyo incondicional en todo momento. Por permitirme elegir mi sendero para aprender de mis errores y celebrar juntos mis aciertos. Gracias también por las maravillosas hermanas que me han regalado.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 OBJETIVOS Y ALCANCES	3
2 ANTECEDENTES	5
3 SISTEMAS DE MONITOREO CONTINUO	9
3.1 Monitoreo estructural	10
3.2 Sensores y transductores	13
3.3 Clasificación de los sensores por su principio de funcionamiento	14
3.3.1 <i>Sensores de funcionamiento eléctrico</i>	15
3.3.2 <i>Sensores de cuerda vibrante</i>	19
3.3.3 <i>Sensores inalámbricos</i>	20
3.3.4 <i>Sensores basados en tecnología MEMS y sensores inteligentes</i>	21
3.3.5 <i>Sensores de fibra óptica</i>	23
3.4 Clasificación de los sensores por la variable a medir	33
3.4.1 <i>Transductores de aceleración y vibración</i>	34
3.4.2 <i>Transductores con referencia gravitacional</i>	37
3.4.3 <i>Transductores de deformación</i>	39
3.4.4 <i>Transductores de fuerza, masa o peso</i>	42
3.4.5 <i>Transductores de desplazamiento, posición y movimiento</i>	42
3.4.6 <i>Transductores de esfuerzo o presión</i>	43
3.4.7 <i>Transductores para medición de asentamientos diferenciales</i>	44
3.4.8 <i>Transductores meteorológicos</i>	45
3.4.9 <i>Tecnología DGPS</i>	49

4 APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO EN LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE DIVERSAS OBRAS CIVILES	51
4.1 Plantas nucleares	52
4.2 Obras hidráulicas	55
4.2.1 Presas	55
4.2.2 Sistemas de abastecimiento de agua potable	57
4.3 Puentes	57
4.4 Túneles y obras subterráneas	58
4.5 Edificios históricos	60
4.6 Estructuras inteligentes	62
5 CASO PRÁCTICO	63
5.1 Breve descripción de la problemática que enfrenta el Palacio Nacional	63
5.2 Descripción del sistema de monitoreo automático	65
5.3 Descripción de las mediciones manuales	66
5.4 Análisis e interpretación de resultados	67
6 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES	71
RECONOCIMIENTOS	75
ANEXO	77
REFERENCIAS	85
TABLAS	89
FIGURAS	95

INTRODUCCIÓN

Las afectaciones en la economía, y sobre todo la pérdida de vidas humanas ocasionadas por fallas en las obras civiles debido a las incertidumbres sobre su comportamiento ante diversas solicitaciones y condiciones de apoyo, en especial de aquellas obras complejas, han sido una de las inquietudes y preocupaciones más antiguas que han surgido en los ingenieros encargados de realizar el diagnóstico y proporcionar las soluciones de carácter estructural y geotécnico para garantizar su estabilidad.

A partir del siglo XIX el monitoreo de la salud estructural se ha convertido en una herramienta más de la ingeniería para comprender mejor el desempeño de sus construcciones. Uno de los primeros ejemplos documentados data de finales de ese siglo, cuando los trabajadores de las vías de ferrocarril escuchaban las emisiones acústicas de las mismas a fin de detectar fallas o grietas; desde entonces, técnicas de reconocimiento auditivo o visual son utilizadas como alternativas cuando se carece de tecnología para realizar un estudio más detallado.

En los últimos cuarenta años, la ciencia y la tecnología han realizado esfuerzos importantes por desarrollar diversas técnicas, basadas en principios físicos y análisis más profundos, que permitan evaluar las condiciones de estabilidad de las estructuras para determinar, localizar y cuantificar daños en las mismas.

El monitoreo del comportamiento estructural, se ha extendido hoy en día a todas las áreas de la Ingeniería civil, como puentes, rascacielos, monumentos, canales, ductos, etc. Y muy particularmente se aplica en algunas ciudades y áreas geográficas con condiciones especiales de clima, actividad sísmica, y otras condiciones ambientales específicas, en las que se hace necesario llevar un control riguroso de la respuesta estructural para garantizar un comportamiento adecuado y la seguridad de los usuarios, así como para prolongar la vida útil de dichas estructuras.

En México, la aplicación de los sistemas de monitoreo estructural es aún muy limitada, centrándose principalmente en aquellas obras especiales y de alto riesgo como la central nuclear de Laguna Verde y las presas, obras de gran importancia económica para el país como son los puentes, y recientemente en obras de gran envergadura como el túnel emisor oriente (TEO) o el puente Baluarte en Sinaloa, así como los monumentos más emblemáticos del país como la Catedral Metropolitana y el Palacio Nacional.

Con este trabajo se pretende identificar algunos de los sistemas desarrollados para monitorear el comportamiento estructural y mostrar algunas de sus aplicaciones en las obras de ingeniería civil, especialmente aquellos sistemas basados en la transmisión de información a través de fibra óptica, dadas las bondades y ventajas que estos presentan, con relación a los sensores convencionales, por lo cual se le ha destinado una sección más amplia en el capítulo tres.

1. OBJETIVOS Y ALCANCES

Realizar una búsqueda bibliográfica para identificar y conocer los alcances de los programas de monitoreo implementados en diversos tipos de obras civiles para dar seguimiento a su comportamiento estructural, ya sean estructuras en proceso de construcción, en obras contemporáneas y construcciones consideradas como monumentos históricos.

Documentar el funcionamiento, los alcances y las aplicaciones más comunes de los sensores empleados en estos sistemas.

Describir la aplicación de estos sistemas en el seguimiento del comportamiento estructural de algunas de las principales obras para la sociedad.

Analizar e interpretar desde el punto de vista estructural la información obtenida de un sistema de este tipo implementado en el Palacio Nacional.

2. ANTECEDENTES.

El conocimiento de la respuesta de estructuras sometidas a diversas sollicitaciones inicia con la medición del comportamiento estructural de elementos básicos, como el de una viga en voladizo.

Galileo Galilei (1564-1642) fue el primero en estudiar la resistencia de los sólidos a la rotura, dando así inicio a lo que hoy conocemos como Mecánica de Materiales. En su segundo libro: *Diálogos sobre Dos Nuevas Ciencias*, afirmaba que “*un obelisco o columna de pequeña longitud podía ser tirado hacia abajo o levantado sin peligro de fractura, mientras que los elementos largos se harían pedazos bajo la acción de su propio peso*”.

Para probar lo anterior consideró la resistencia de los materiales sometidos a simple tensión (Fig. 1.1a), y afirmó que la resistencia de la barra es proporcional al área de su sección transversal, y es independiente de su longitud. A esta resistencia de la barra, Galileo la llamó “resistencia absoluta a la fractura”. Teniendo este dato, intentó calcular la resistencia a la fractura de la misma barra, trabajando como cantiliver con una carga al final (Fig.1.1b).

Galileo consideraba que la viga permanecía rígida, excepto en su extremo libre, y que la compresión se concentraba en la parte inferior de esta sección, con una tensión constante en el resto de ella. Este problema denominado “El problema de Galileo” no fue resuelto correcta y completamente; sin embargo, su trabajo llamó la atención sobre la existencia e importancia de lo que hoy denominamos la mecánica de los materiales, y fue necesario establecer descripciones experimentales y precisas de las propiedades mecánicas de los materiales.

Las contribuciones a la resistencia de materiales, han sido numerosas desde entonces, por ejemplo: Robert Hooke (1635-1703), desarrolló la Ley de las Relaciones Lineales entre la fuerza y la deformación de los materiales, o Ley de Hooke. John Bernoulli (1667-1748), formuló el principio del Trabajo Virtual, Leonhard Euler (1707-1783), resolvió el problema de la estabilidad de las barras esbeltas cargadas por comprensión axial e introdujo el concepto de momento de inercia.

Charles August de Coulomb (1736-1806), presentó el análisis de la flexión de las vigas elásticas. En 1776, publicó el primer análisis correcto de los esfuerzos en una viga de sección rectangular. Aplicó la Ley de Hooke a las fibras, situó la superficie neutra en su posición correcta, desarrolló el equilibrio de las fuerzas en la sección con las fuerzas externas y evaluó correctamente los esfuerzos. También consideró la etapa plástica, e indicó que en la falla, bajo ciertas condiciones, la superficie neutra debería moverse a otra posición. Presentó su famosa teoría sobre la presión de los suelos sobre muros de contención y enunció su teoría de la torsión de ejes.

El estudio teórico y experimental de esta materia fue emprendido principalmente en Francia, por personalidades como Navier y Saint-Venant, entre otros.

L. M. Navier (1785-1836). Resolvió el problema de la flexión en barras rectas y formuló la hipótesis de que las secciones transversales de una viga permanecen planas después de la deformación. Publicó en 1826, un tratado sobre el comportamiento elástico de las estructuras, considerado el primer libro de texto sobre la teoría moderna de la resistencia de los materiales.

Saint-Venant (1797-1886). Trabajó sobre la flexión de vigas curvas, las vibraciones y las deformaciones plásticas. Corresponde a Saint-Venant, el análisis correcto de la flexión en vigas.

Actualmente, con el desarrollo de la tecnología los ingenieros tienen la posibilidad de estudiar el comportamiento de grandes obras, sobre todo para corroborar los modelos analíticos que se emplearon para su erección ó para darle seguimiento a su comportamiento estructural a fin de detectar de manera oportuna síntomas de comportamiento inadecuado.

3. SISTEMAS DE MONITOREO CONTINUO

Una de las necesidades que ha tenido el ser humano desde tiempos remotos ha sido la de poder cuantificar o medir; esta necesidad ha ido evolucionando pasando de simples cuantificaciones de objetos a medir fenómenos en el entorno como la temperatura. Para poder realizar este tipo de mediciones, primeramente se realizaron mediciones directas y muy sencillas como distancias (Ref.1). Sin embargo, la necesidad de conocer más nuestro entorno y sus efectos, llevó al ser humano a crear sistemas de medición más complejos, comenzando por conocer y comprender los fenómenos existentes en la naturaleza, con lo que la aplicación de técnicas dirigidas a la cuantificación de los mismos generaron un área en la tecnología: la de los sistemas de medición y sensado.

Es a través de estos sistemas que surgen los sistemas de monitoreo continuo, cuyo desarrollo y aplicación actualmente es intenso en ingenierías aeronáutica, automotriz, eléctrica, electrónica, mecánica y civil, entre otras áreas. El enfoque de esta tesis está basada en los sistemas de monitoreo continuo, parámetros y dispositivos que son de interés en obras civiles.

Los sistemas de monitoreo estructural hasta hace relativamente poco tiempo, habían sido implementados sólo en obras civiles con un riesgo potencial como las presas y plantas nucleares a fin de tener un riguroso control de su comportamiento desde su construcción y ante solicitaciones de servicio, para garantizar una respuesta adecuada de la misma.

Alrededor de 1970, después de severos daños y/o colapsos de importantes estructuras, se identifica la necesidad de contar con un sistema que permita

analizar y evaluar de manera consistente y oportuna la respuesta estructural de obras civiles como puentes, túneles, estructuras geotécnicas, rascacielos, canales y monumentos históricos.

3.1 Monitoreo estructural

El término en inglés para este concepto, “Structural Health Monitoring o SHM” (monitoreo de salud estructural), es un término relativamente nuevo, por lo que una definición con un amplio consenso aún no se ha propuesto.

De la búsqueda bibliográfica se han encontrado diversas definiciones; algunas de las más representativas son:

Es el proceso continuo y sistemático de recabar información de manera rutinaria, mediante el cual, en el caso de obras civiles, damos seguimiento al comportamiento de una estructura sometida a diversas sollicitaciones.

El monitoreo de daño estructural es un proceso cuyo objetivo es proporcionar información precisa y en tiempo real sobre las condiciones estructurales y desempeño de una estructura. Consiste en el registro periódico de los parámetros representativos a corto o largo plazo (Ref.2).

El monitoreo consiste en mediciones de ciertos parámetros deseados, relativos al comportamiento estructural que permiten realizar un análisis de las condiciones de la estructura, y tomar decisiones y acciones que lleven a la misma a una condición más estable que la anterior (Ref. 3).

Resumiendo, de acuerdo a las definiciones consultadas, puede considerarse que un sistema de monitoreo continuo está formado por un conjunto de subsistemas, que pueden proporcionar información sobre las condiciones de la estructura, y que

permite evaluar la seguridad e integridad de la misma, y tomar decisiones y acciones que la lleven a una condición segura.

Este concepto ha ido ganando terreno en la ingeniería civil, y actualmente se utiliza en las estructuras para planear y diseñar actividades de mantenimiento preventivo; cuando se presenta algún tipo de daño en una estructura y es fundamental incrementar la seguridad dando seguimiento al comportamiento de grietas, deformaciones e inclinaciones y garantizar un comportamiento adecuado de la misma; para verificar hipótesis; reducir la incertidumbre; verificar la integridad de una estructura después de algún tiempo de servicio y/o ampliar el conocimiento concerniente a la estructura que está siendo monitoreada; y, aunque constituye una herramienta relacionada con la seguridad de las construcciones, su aplicación es aún incipiente.

Los sistemas de monitoreo se emplean para medir el comportamiento de las estructuras ante sollicitaciones estáticas o dinámicas, y cuentan con dos o más de los siguientes componentes:

- Un sistema de sensores y transductores
- Un sistema de adquisición y procesamiento de datos
- Un sistema de comunicación y, en algunos casos, de alerta
- Un sistema de detección de daños y modelado (Ref.4)

El sistema de sensores puede registrar la información en un intervalo de tiempo predeterminado, o bien, generar un registro cuando el usuario lo requiera. Con frecuencia, entre los sensores y el sistema de adquisición de datos, se encuentran los acondicionadores de señal, los cuales son elementos encargados de preparar la señal proveniente del sensor o transductor, de tal manera que a la salida de éste se presente exclusivamente la señal de interés. Consisten normalmente en

circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras, las funciones de amplificación, filtrado, adaptación de impedancias y modulación o demodulación.

El sistema de adquisición (o tarjetas de adquisición), se encarga de convertir la señal analógica en digital, es decir, convierte la señal del parámetro que se mide (analógica), en información que pueda ser manipulada por un ordenador (digital). Su elección depende de varios criterios relativos al convertidor analógico-digital, como son: su resolución, tipo de conversión, velocidad de conversión o frecuencia de muestreo, número de canales de Entrada/Salida, flexibilidad, fiabilidad y la capacidad de expansión, entre otras. Una explicación más amplia al respecto puede consultarse en la (Ref.5).

El procesador de datos, es un sistema que se encarga de la recolección, evaluación y ordenamiento de los datos de entrada, mientras que el sistema de comunicación envía la información de la unidad periférica a la unidad central, la cual generalmente cuenta con un modem para interrogar de manera remota al equipo, así como paneles de advertencia ante uno o varios síntomas de comportamiento inadecuado tanto de la estructura como del mismo sistema y, finalmente, una computadora en la que se procesa y almacena la información.

Otra parte importante de los sistemas de monitoreo son los modelos de análisis, que utilizan la información básica de la estructura como la topología y leyes constitutivas de los materiales en combinación con los datos provenientes de los sensores. Los modelos más comunes emplean técnicas de elementos finitos, que se contrastan con un patrón de estructura sana.

Un esquema básico del funcionamiento de un sistema de medición se ilustra en la (Fig. 3.1).

En las obras civiles los parámetros a medir más relevantes son:

- Físicos: posición, deformaciones, inclinación, esfuerzos, fuerzas, presiones, velocidades, aceleraciones, vibraciones, temperatura de la estructura, etc.
- Ambientales: temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, radiación solar, precipitación pluvial, acumulación de nieve, nivel y flujo de agua, concentración de contaminantes, presión de poro.
- Químicos: humedad, pH, concentración de cloro, concentración de sulfato, concentración de carbonatación, oxidación de las barras de refuerzo, oxidación del acero, deterioro de la madera, etc.

3.2 Sensores y transductores

Para la cuantificación de los parámetros a medir, existen dispositivos llamados sensores o transductores. Aunque para fines de este trabajo utilizaremos indistintamente cualquiera de estos términos, de manera general se asume que el sensor forma parte de transductor.

Un sensor es un dispositivo que detecta una determinada acción externa como temperatura, presión, etc.; su función esencial es causar un cambio de una forma de energía de entrada (señal), para dar lugar a un correspondiente cambio en otra o la misma forma de energía.

Un transductor es un elemento que transforma el efecto de una causa física como la presión, la temperatura, la dilatación o la humedad en otro tipo de señal normalmente eléctrica (Ref.6), proporciona una salida utilizable en respuesta a una magnitud física, propiedad o condición que se desea medir (Ref.1). Son denominados por diferentes nombres en diferentes disciplinas técnicas; en procesos industriales son denominados transmisores, en algunos casos se denominan sensores (de presión, fuerza, temperatura, etc.), en algunos otros

campos se denominan detectores, galgas, captadores; aquellos que tienen configuraciones capaces de ser inmersas en un fluido son denominadas frecuentemente sondas.

Aún se utilizan muchas indicaciones de transductores con la terminación “metro”, por ejemplo: acelerómetro por transductor de aceleración, tacómetro por transductor de velocidad angular, etc.

De acuerdo con la Ref. 7, el término transductor se emplea para definir un aparato en el cual la magnitud de una variable aplicada es convertida en una señal eléctrica que es proporcional a la magnitud de la variable -estas variaciones son, en muchos casos, referidas al tiempo-, y un sensor es el elemento primario sobre el que actúa directamente la variable a medir, y cuya modificación por ella se convierte posteriormente en señal eléctrica para dar lugar al transductor completo.

En esta sección se describirán los principios básicos de funcionamiento de los principales sensores y transductores que pueden emplearse en la auscultación y monitoreo de obras civiles y, dado que este campo es del dominio de la ingeniería eléctrica y electrónica, en el anexo A se enlista una serie de conceptos y definiciones que pueden ser ayuda para una mayor comprensión de las principales características a considerar al momento de seleccionar los sensores, transductores y equipos de adquisición de datos que conforman un sistema de monitoreo.

3.3 Clasificación de los sensores por su principio de funcionamiento

Existen una gran cantidad de sensores para medir una amplia gama de parámetros; sin embargo, aquellos que por sus aplicaciones son de interés para la toma de decisiones en ingeniería civil pueden clasificarse como: de

funcionamiento eléctrico, de cuerda vibrante, sistemas inalámbricos, de tecnología MEMS y de fibra óptica:

3.3.1 Sensores de funcionamiento eléctrico. Estos sensores se dividen en pasivos o moduladores y activos o generadores. Los pasivos o moduladores requieren de una excitación para realizar su función, y de acuerdo con la propiedad eléctrica asociada a la variable a medir, pueden dividirse en: resistivos, capacitivos, inductivos, por reluctancia y fotoconductores.

Los sensores activos o generadores, a diferencia de los pasivos, producen una señal sin necesidad de una alimentación externa, y de acuerdo con la propiedad eléctrica asociada a la variable a medir se dividen en: electromagnéticos, piezoeléctricos, termoeléctricos y fotovoltaicos.

Sensores resistivos. Estos son, probablemente los más abundantes, ya que son muchas las magnitudes físicas que afectan el valor de la resistencia eléctrica de un material. Se les conoce como “resistivos” ya que convierten una variación en la magnitud a medir en un cambio en la resistencia eléctrica de un conductor o semiconductor, el cual puede realizarse por diversos medios, como una variación de temperatura, cuando es sometido a esfuerzos mecánicos, por humidificación o des-humidificación de ciertas sales electrolíticas o por movimientos en el brazo de la escobilla de un reóstato (Fig.3.2).

Un ejemplo de este tipo de sensores son las galgas extensométricas, cuyo fundamento es el efecto piezorresistivo, es decir, convierten un cambio en la magnitud a medir, en un cambio de resistencia debido a una “deformación” cuando es sometida a un esfuerzo mecánico; en términos eléctricos, el cambio en la resistencia debido a una deformación entre dos o cuatro brazos de un puente de Wheatstone (Fig. 3.3).

Sensores de reactancia variable. Muchos de estos sensores no requieren contacto físico con el sistema que se desea medir o tienen un efecto de carga mínimo. La falta de linealidad intrínseca en algunos de los principios de medida empleados se supera mediante el uso de sensores diferenciales. La máxima frecuencia de variación admisible en la variable medida es, sin embargo, una limitación debido a que ésta debe ser inferior a la frecuencia de tensión de alimentación empleada, generalmente alterna (Ref.8). Dentro de estos se encuentran los sensores capacitivos y los sensores inductivos que a continuación se describen.

Sensores capacitivos. Se denominan así aquellos elementos que convierten una variación en la magnitud a medir, en un cambio en la capacidad eléctrica o capacitancia, el cual puede presentarse en un condensador, básicamente mediante cambios de un material dieléctrico (aire o agua), situado entre dos electrodos fijos, o bien por el movimiento de uno de los electrodos al acercarse o alejarse del electrodo fijo, como se muestra en la Fig. 3.4. Algunos de los parámetros que se pueden medir en obras civiles, mediante este principio, son presiones, aceleraciones, inclinaciones y desplazamientos.

Sensores inductivos. Estos sensores convierten un cambio de la magnitud en un cambio en la auto inductancia, mediante el movimiento de un núcleo ferromagnético interior al devanado (embobinado), o mediante cambios de flujo inducidos externamente en un devanado con un núcleo fijo (Fig. 3.5).

Entre sus principales ventajas se tiene que imponen poca carga mecánica, les afecta poco la humedad ambiental y otros contaminantes, y, principalmente, su alta sensibilidad. Una de sus aplicaciones es, al igual que los sensores capacitivos, la medida de desplazamientos y posición, y los detectores de proximidad de objetos férricos (Ref.8).

El transductor LVDT o transductor diferencial de variable lineal (Fig. 3.6), es un subproducto de los transductores inductivos y consta, en términos eléctricos, de dos bobinas secundarias idénticas conectadas en serie-oposición y de un núcleo móvil de material ferromagnético, arrastrado por un vástago no ferromagnético, unido a la pieza que se desea medir.

El desplazamiento se obtiene gracias al movimiento del núcleo dentro del cuerpo del sensor, el cual modifica la amplitud de la señal inducida entre el embobinado primario y el secundario. El voltaje es inducido por la posición central axial.

Las ventajas del LVDT son múltiples: su resolución en la práctica es superior al 0.1%; tienen un rozamiento nulo entre núcleo y devanados, lo cual les da vida casi ilimitada y alta fiabilidad, en comparación con los potenciométricos; la fuerza magnética que se ejerce sobre el núcleo es cero en la posición central y aumenta linealmente con el desplazamiento. Ofrecen también aislamiento entre el sensor (vástago) y el circuito eléctrico ya que están acoplados magnéticamente, lo cual es prioritario al medir en atmósferas peligrosas.

Tienen además alta Repetibilidad por su simetría, sensibilidad unidireccional, alta linealidad (hasta del 0.05%), respuesta dinámica elevada y alta inmunidad a los campos magnéticos exteriores. Los alcances de medida pueden ir desde $\pm 100 \mu\text{m}$ a $\pm 25\text{cm}$, con frecuencias de 50Hz a 20 KHz. Las sensibilidades disponibles van de unos 0.1 V/cm a 40 V/ por cada voltio de alimentación. La resolución puede ser de hasta 0.1 μm .

Sus aplicaciones principales son para medición de desplazamientos y posición; y aunque es muy frecuente su uso como detector de cero en servosistemas de posición en aviones y submarinos, puede aplicarse a las medidas de aceleración e inclinómetros mediante un sistema inercial, y a la medida de presiones mediante un tubo Burdon (Ref.8).

Sensores por reluctancia. Convierten una variación en la magnitud a medir mediante el cambio en la resistencia que ofrece un circuito al flujo magnético, o reluctancia, entre dos o más devanados (bobinas), con una excitación C. A. aplicada al sistema de devanados. Dentro de éstos se incluyen los elementos de reluctancia variable, los elementos transformadores diferenciales y los de puente de inductancias (Fig. 3.7).

Sensores fotoconductores. Convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la resistencia o conductancia, de un material semiconductor, debida a un cambio en la cantidad de iluminación incidente sobre el material (Fig. 3.8).

Su elección debe hacerse en función de la longitud de onda a detectar, teniendo en cuenta que los materiales deben ser transparentes a las longitudes de onda de interés para evitar que se produzca una excesiva reflexión superficial. Los tiempos de respuesta van desde los 100ms en algunos modelos, hasta los 2 μ s. La tensión máxima que aceptan sin iluminación puede ir de 100 a 600V, y la disipación permitida a 25°C, de 50mW a 1W (Ref.8).

Sensores electromagnéticos. Convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la fuerza electromotriz o tensión de salida inducida en un conductor debida a un cambio en el flujo magnético en ausencia de excitación (Fig. 3.9).

Sensores piezoeléctricos. Convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la carga electrostática (Q) o tensión (E) generada por ciertos materiales cuando se encuentran sometidos a un esfuerzo mecánico como fuerzas de tensión, compresión o cortante (Fig. 3.10). Su uso en los transductores para medir aceleraciones y vibraciones es quizás, el más frecuente.

Sensores termoeléctricos. Convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la fuerza electromotriz o f. e. m., generada por la diferencia de

temperaturas existente entre las uniones de dos materiales diferentes (efecto Seebeck) (Fig. 3.11).

Sensores fotovoltaicos. Convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la tensión generada cuando la iluminación incidente sobre una unión entre ciertos materiales distintos, cambia. (Fig. 3.12).

Información detallada sobre el funcionamiento eléctrico de cada uno de los sensores mencionados puede consultarse en las (Refs.1, 5, 7 y 8).

3.3.2 Sensores de cuerda vibrante. Éstos consisten en un dispositivo en el cual un alambre de acero de longitud conocida, tensado y fijo en sus extremos a dos mordazas, es libre de vibrar a su frecuencia natural, como una cuerda de piano (Fig.3.13a).

La frecuencia de vibración cambia con la tensión del alambre y, por lo tanto, con ligeros movimientos de las dos mordazas en sus extremos. El alambre es excitado por una bobina eléctrica fija, cerca del punto medio del alambre, y con la misma u otra bobina, se mide la frecuencia de vibración.

La ecuación para determinar la frecuencia de vibración de una cuerda vibrante en términos de esfuerzos es (Ref.9):

$$f = \sqrt{(\sigma g / \rho)} / 2L,$$

En términos de la deformación:

$$f = \sqrt{(Eg\varepsilon / \rho)} / 2L,$$

Donde:

f = frecuencia natural (sec^{-1})

L = longitud de la cuerda vibrante

E = módulo de elasticidad del alambre por unidad de longitud

g = aceleración de la gravedad

σ = esfuerzo en la cuerda vibrante

ρ = densidad del material de la cuerda vibrante

Despejando la deformación:

$$\varepsilon = 4L^2 f^2 \rho / Eg = Kf^2$$

Pero como el transductor se instala con una tensión inicial, tanto la frecuencia inicial como la actual intervienen en la relación, quedando:

$$\varepsilon = K [f^2 - (f_0)^2]$$

Existen bajo este principio de funcionamiento transductores de: *desplazamiento* (para desplazamientos de hasta 50 μm); *de presión* (utilizan un cambio en la frecuencia de resonancia de un elemento mecánico vibrante debido a campos de presión y fuerza), *acelerómetros*, *calibradores de tensión* soldables, miniatura y embebidos en concreto; *medidor de espesores de grietas*; *piezómetros para medición de presiones de fluidos*; *celdas de presión de tierra*, *celdas de carga* y *extensómetros*. Los sensores de cuerda vibrante son conocidos por su estabilidad a largo plazo.

3.3.3 Sensores inalámbricos. Las aplicaciones de los sistemas inalámbricos van desde el cuidado de la salud y servicios básicos, hasta monitoreo remoto. Dentro de éste último, se tiene monitoreo ambiental de aire, agua y suelo, monitoreo estructural, monitoreo industrial para máquinas y monitoreo de procesos.

Una red de sensores inalámbricos consiste en dispositivos autónomos, distribuidos y espaciados, utilizando sensores para monitorear parámetros físicos o ambientales. Un sistema de redes inalámbricas cuenta con una entrada llamada Gateway, que provee conectividad inalámbrica de regreso a los cables, y nodos distribuidos.

Un nodo consta de varios componentes: radio, que provee un juego de enlaces de comunicación a nodos cercanos; batería; micro-controlador; circuito analógico y una interfaz a sensor, que se encuentran generalmente, organizados en tres tipos de topologías de red:

- De estrella, en la que cada nodo se conecta directamente a la entrada
- Topología de árbol, en la que cada nodo se conecta a un nodo de mayor jerarquía y de ahí a la entrada. Los datos son ruteados desde el nodo de menor jerarquía hasta la entrada.
- Redes tipo malla, en la que los nodos pueden conectarse a múltiples nodos en el sistema y pasar los datos por el camino disponible de mayor confiabilidad.

La selección de los sistemas inalámbricos depende de la aplicación; algunos estándares incluyen radios de 2.4 GHz -basados en los estándares IEEE802.15.4 o IEEE 802.11 (Wii-Fi), o radios, generalmente de 900 MHz. En la (Fig. 3.14) se muestra de manera esquemática un sistema de celdas de carga con transmisión inalámbrica.

3.3.4 Sensores basados en tecnología MEMS y sensores inteligentes. La tecnología MEMS se refiere a la tecnología empleada para integrar elementos mecánicos, sensores, actuadores y dispositivos electrónicos agrupados en su

conjunto en un sustrato común de silicio mediante el uso de la tecnología aplicada en micro-fabricación, en circuitos integrados (IC). Surge a principios de la década de los 90's, a partir de los avances en el desarrollo de los procesos de fabricación de los circuitos integrados.

Tienen dimensiones desde el orden de los micrómetros hasta algunos milímetros (MEMS), o de micrómetros a nanómetros (NEMS), en particular de sensores y actuadores miniaturizados, y cuyas aplicaciones son tan variadas como en la industria aeroespacial, biomédica, las comunicaciones inalámbricas, almacenamiento de datos y monitoreo estructural, entre otras. Los MEMS se clasifican en dispositivos pasivos y activos. Los pasivos incluyen líneas de transmisión, filtros y acopladores. Los activos, switches, capacitores variables, sintonizadores, etc.

Los MEMS se dividen también en actuadores y transductores. Los actuadores convierten una señal eléctrica en otro tipo de energía (mecánica, térmica, etc.); los transductores convierten formas de energía mecánica, térmica u otras formas de energía a energía eléctrica.

Los acelerómetros son quizás los dispositivos basados en MEMS más difundidos, capaces de medir las aceleraciones a que es sometido el mando de aparatos de video juegos como el Wii, y que, instalado en el dispositivo de disparo de las bolsas de aire de un coche, determina el momento justo en que se produce un choque y dispara el mecanismo de inflado de éstas; sin embargo existen también sensores de presión, temperatura y humedad construidos con esta tecnología.

Otras aplicaciones de esta tecnología son en aparatos electrónicos como el iPhone, teléfonos celulares, cámaras digitales. También se emplean MEMS en los cabezales de las impresoras de inyección de tinta como parte del dispositivo que produce la evaporación controlada de la tinta.

En la (Fig. 3.15) se muestran algunos sensores basados en la tecnología MEMS, así como algunas de sus aplicaciones en otras áreas.

Cabe mencionar en este apartado el concepto de “sensor inteligente”, que es aquel que combina la función de detección y algunas de las funciones de procesamiento de la señal y comunicación, las cuales suele realizarlas un microprocesador (μP), por lo que cualquier combinación de sensor y μP se denomina a veces inteligente. Éste está basado total o parcialmente en elementos miniaturizados, y con un encapsulado común.

Además de la detección o transducción pueden incluir: acondicionamiento de señal, correcciones de cero, ganancia y linealidad, compensación ambiental (temperatura y humedad), escalado y conversión de unidades, comunicación (bidireccional) digital, auto diagnóstico, decisión e incluso activación o acción sobre el sistema donde se conecta. Incluyen, además del sensor primario, cuando menos algún algoritmo de control, memoria y capacidad de comunicación digital.

Las ventajas que ofrecen los sensores inteligentes en un sistema de medida y control, son: reducen la carga sobre los controladores lógicos programables como PC u otros controles digitales, además de aumentar su fiabilidad (Ref.8).

3.3.5 Sensores de fibra óptica. Entre los años 1600 y 1700, Snell pronuncia las leyes de Reflexión y Refracción de la luz, mientras que Isaac Newton a través de sus experimentos con la luz, estudiándola como un fenómeno ondulatorio, encuentra que la luz se propaga de forma similar a las ondas sonoras, es decir que se puede estudiar como una onda mecánica.

En 1790 Claude Chappe construye un telégrafo óptico mediante un complicado sistema de telescopios para establecer un enlace entre París y Estrasburgo; por

medio de torres con señalizaciones móviles podía transmitir información a 200 km en 15 minutos. Fue remplazado luego por el telégrafo eléctrico.

Durante el siglo XIX, Fressnel establece las bases matemáticas sobre propagación de ondas; John Tyndall demostró que una fina corriente de agua podía contener y guiar luz; poco después recurrió a tubos de vidrio y más tarde a hilos gruesos de cuarzo fundido. Todos estos materiales son dieléctricos, pues en ninguno puede transmitirse la electricidad. Sin embargo, lo importante de este trabajo fue demostrar que la luz, al incidir en estos materiales a un determinado ángulo, se refleja dentro de ellos, es decir, queda confinada y puede propagarse a determinadas distancias debido al fenómeno de “reflexión interna total” (Fig. 3.16).

En este mismo período James Clerck Maxwell demostró que la luz puede estudiarse como una onda electromagnética; el ingeniero Chicolev (Rusia) conducía la luz solar a través de tubos metálicos huecos espejados por dentro, hacia recintos donde era peligroso el uso de antorchas o llamas, por ejemplo en fábricas de pólvora; Alexander Graham Bell inventó el fotófono para transmitir la voz. El sonido hacía vibrar una membrana espejada, la cual reflejaba la luz del sol, haciéndola más o menos divergente hacia el receptor colocado a unos 200 metros. Este consistía en un gran espejo parabólico en cuyo centro se encontraba un detector de selenio conectado a una batería y un auricular. Este método dependía de la luz solar y de la visibilidad (Fig. 3.17).

Paralelamente, el ingeniero William Wheeler patentó un proyecto conocido como “tuberías de luz” para edificios, que ideó a partir de un conjunto de tubos con revestimientos que permitiesen la reflexión óptica, para llevar luz a través de un edificio y difundirla en otras habitaciones. Un esquema de su proyecto patentado se ilustra en la (Fig. 3.18).

A principios del siglo XX, Hendros y Debye (Alemania) experimentan con varillas

de vidrio como guías de onda dieléctricas. Por su parte, Baird (Inglaterra) y Hansell (USA) patentan un sistema que puede transmitir imágenes por medio de fibras de silicio, y posteriormente, French patenta un sistema de varillas rígidas de vidrio que transmiten señales de voz.

En 1936 Estados Unidos comienza a utilizar fibras ópticas en telecomunicaciones. En 1959, se descubrió una manera de producir luz de una sola longitud de onda: el L. A. S. E. R. - amplificación de luz por estimulación de radiación-, (siglas en inglés de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). En 1970 Corning Glass Works manejaba fibras ópticas con una atenuación de 20dB/km a una longitud de onda de 633nm. En 1978 se logra una fibra óptica monomodo y en 1979 se consigue para ésta una atenuación de 0.20 dB/km a 1550nm. Un nanómetro (nm) = 1×10^{-9} m, o bien, una millonésima parte de un milímetro.

La fibra óptica consiste en una o varias hebras delgadas de vidrio o de plástico comparable con el grosor de un cabello, y se compone de una región cilíndrica llamada núcleo que varía entre 8 y 100 μm de diámetro y a través de la cual se efectúa la propagación de pulsos de luz, y de una zona externa al núcleo y concéntrica con éste, llamada revestimiento o envoltura que varía entre 125 y 140 μm de diámetro. Dicho revestimiento es una funda de plástico u otros materiales que lo protegen contra la humedad, los roedores y otros riesgos del entorno. El índice de refracción del material de revestimiento (es decir, la medida de su capacidad para desviar la luz), es menor que el índice de refracción del núcleo (Fig. 3.19).

Al igual que en los sistemas donde se utilizan señales eléctricas para enviar información, los sistemas de comunicación óptica envían generalmente la información en forma codificada cambiando en forma sistemática alguna característica de la onda de luz emitida por la fuente, es decir, cualquier agente externo actuando sobre el dispositivo genera cambios en la transmisión luminosa

funcionando como transductor de cambios de temperatura, esfuerzo, rotación o corriente eléctrica, en cambios en la radiación óptica.

La utilidad del sensor de fibra óptica dependerá por tanto, de la magnitud de este cambio y de su capacidad para medirlo y cuantificarlo en forma repetitiva, confiable y precisa. Las características más utilizadas para codificar la información son *amplitud*, *frecuencia* y *longitud de onda*.

La *amplitud* puede interpretarse como la cantidad de energía que lleva la onda, mientras que la *frecuencia* de la onda indica cuántas veces en un segundo la onda alcanza el punto de energía máxima, y en el sistema internacional de unidades, SIU, se mide en unidades de 1/segundo ($1/s$ ó s^{-1}), conocidas comúnmente como Hertz o Hz.

Finalmente, la *longitud de onda* puede interpretarse como el color de la luz, y, en el SIU se especifica generalmente en metros. Las longitudes de onda de la luz visible están en el intervalo de 400 a 700 nanómetros.

Según la variación del índice de refracción dentro del núcleo, y según la cantidad de MODOS o haces de luz, podemos clasificarlas en:

- Multimodal de índice escalonado [Multimode step index] MM
- Multimodal de índice gradual [Multimode graded index] MM
- Monomodo (índice escalonado) [Single Mode step index] SM

La llamada fibra multimodal de índice de refracción escalonado se usa en la transferencia convencional de imágenes, así como en la transmisión de datos en distancias cortas. La fibra multimodal de índice de gradiente o gradual, en la cual el índice de refracción del núcleo disminuye gradualmente del centro hacia fuera, es óptima para las distancias intermedias. Para largas distancias y gran velocidad

en la transmisión de datos se emplea la fibra monomodal, con poca diferencia de índice de refracción y núcleo de tamaño pequeño (Fig. 3.20).

La capacidad de transmisión de información depende básicamente de las siguientes características: el diseño geométrico de la fibra, las propiedades de los materiales empleados, diseño óptico, y el intervalo de longitudes de onda de la fuente de luz utilizada, cuanto mayor sea éste, menor será la capacidad de transmisión de información de la fibra.

Se utilizan en telecomunicaciones para el envío de datos a gran velocidad, así como en diversos tipos de sensores para medir parámetros como:

- Fuerza, presión, deformación y temperatura (directos)
- Aceleración, desplazamiento y parámetros químicos (indirectos)

Los sensores de fibra óptica utilizan luz para medir una perturbación externa, y fibra óptica para transmitirla desde la fuente hasta el detector. La configuración general de un sensor de este tipo se ilustra en la (Fig. 3.21). Un componente transmisor convierte la señal eléctrica en una señal óptica que puede estar formada por pulsos de luz (digital), o por un haz de luz modulado (analógica). La señal óptica viaja entonces a lo largo de la fibra óptica hasta llegar al receptor, en el que es convertida de nuevo en una señal eléctrica.

En función de cómo se realice la medición de la perturbación externa, podemos diferenciar dos clases de sensores: sensores extrínsecos y sensores intrínsecos (Fig.3.22).

Sensores extrínsecos (o con modulación externa). En éstos, la fibra transporta la luz, que es modificada o modulada en un elemento externo bajo la acción de la magnitud a medir. Hay sistemas basados en la transmisión, en la reflexión y en la fluorescencia.

Un sensor de este tipo, basado en la variación del acoplamiento entre dos fibras en función de su posición relativa, puede depender de la presión aplicada a un diafragma solidario con una de las piezas, o de la aceleración aplicada a una masa inercial.

El cambio entre la cantidad de luz transmitida entre dos fibras introducidas en un depósito puede aplicarse como detector de nivel, por ejemplo, para líquidos inflamables. La inducción de fluorescencia (Ref.8), se ha aplicado en reactores nucleares y en la medida de contaminación de aguas subterráneas.

Sensores intrínsecos. En éstos, la magnitud a medir afecta las características ópticas de la fibra, directamente o, a través de un recubrimiento dispuesto expresamente para ello. Los cambios inducidos pueden serlo en la intensidad de la radiación o en su fase (Ref.8). Por ejemplo, cuando la magnitud a medir (fuerza, presión, etc.), provoca micro-deformaciones en la fibra óptica, éstas generan una reflexión parcial diferente de la reflexión interna total, en proporción a la deformación.

Estos sensores basados en la variación de la fase y de la radiación emplean fibras monomodo en las que sólo se puede propagar una radiación monocromática. Otro ejemplo de este tipo de sensores consiste en una fibra en la que el material del núcleo y del recubrimiento se elige tal, que sus índices de refracción se aproximen al descender la temperatura, de forma que se va perdiendo luz a través del recubrimiento, lo cual ha permitido su uso en la detección de fugas de gas criogénico.

Los sensores de fibra óptica tienen diversas configuraciones:

- Interferométricos, entre los que se encuentran el interferómetro de Sagnac, el interferómetro resonante de Fabry-Perot, el interferómetro de Mach-Zehnder, y los interferómetros polarimétricos.

- Basados en intensidad
- Basados en interferencia espectral
- Redes de Bragg

Sensores interferométricos, (Sagnac, Michaelson y Mach-Zehnder), miden la diferencia de fase óptica entre dos ondas de luz. El interferómetro de Sagnac se utiliza principalmente para medir rotaciones. También se emplea para medir los efectos con variación en el tiempo, como acústicos, vibración y deformación. Su principal aplicación es el giroscopio de fibra óptica utilizado en los sistemas de navegación de automóviles, ubicación y rastreo de antenas satelitales y sistemas de medición inercial en aviación.

Interferómetros de Mach-Zehnder y Michelson poseen una geometría extremadamente flexible y alta sensibilidad, lo que permite la posibilidad de una amplia variedad de arreglos y alto desempeño de los elementos, con la diferencia de que en el interferómetro de Michelson los espejos han sido puestos en los extremos de las patas del interferómetro.

Interferómetro resonante (Fabry-Perot), mide la frecuencia de resonancia de una cavidad óptica. Consta de dos espejos de reflectancia R1 y R2 separados por una cavidad de longitud L. Son extremadamente sensibles a perturbaciones que afecten la longitud del trayecto entre los dos espejos. No cuenta con acopladores de fibra, componentes que pueden complicar el despliegue y la interpretación de los datos.

Tiene aplicación en la medición de temperatura, esfuerzos y presión ultrasónica en materiales compuestos. Pueden considerarse transductores ideales para aplicaciones en estructuras inteligentes; incluyen sensores que pueden ser embebidos en un metal o compuesto. Pueden ser sujetos a división de espacio, división de tiempo, división de frecuencia, y a técnicas coherentes de multiplexado para reducir el costo del monitoreo multipunto.

Sensores polarimétricos, miden el estado de polarización de las ondas de luz guiadas. Está relacionado con los cambios inducidos en el estado de polarización de la luz que viaja dentro de una fibra óptica. La descripción de este tipo de sensores, sale de los alcances del presente trabajo, por lo que puede ser consultada la (Ref. 10), para ahondar en este tema y, en otro tipo de sensores interferométricos de fibra óptica.

Sensores basados en modulación de intensidad. Un ejemplo de este tipo de sensores se muestra en la fig. 3.23. En ésta, el sensor consiste en dos fibras dispuestas muy cerca una de la otra. La luz que se propaga a lo largo de la fibra forma un cono de luz cuyo ángulo depende de la diferencia de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento. La luz que pueda ser acoplada por el otro extremo de la fibra depende igualmente del ángulo de aceptación propio y de la distancia “d” de separación entre las dos fibras. Cuando esta distancia cambia, ya sea por una vibración o un desplazamiento, la intensidad de la luz varía en consecuencia.

Sensores de fibra óptica basados en interferencia espectral. Dependen de la modulación del haz de luz en longitud de onda, debido a un efecto ambiental. Se incluyen dentro de este tipo de sensores, aquellos basados en radiación de cuerpo negro, absorción, fluorescencia, etalons, y rejillas de dispersión.

Sensores de redes o rejillas de Bragg (FBG). Una red de Bragg es un pequeño segmento de fibra óptica en el que se ha introducido una perturbación o variación periódica del índice de refracción a lo largo de su núcleo (Fig.3.24), el cual refleja las longitudes de onda de la luz que coinciden con el período de la rejilla, y transmite todas las demás; pueden ser clasificados como sensores espectrales. En éstos, la fibra óptica no solo se comporta como guía de onda segura con bajas pérdidas, sino que su estructura en sí misma es utilizada para la codificación espectral del parámetro a medir.

Basan su principio de funcionamiento en que, al aplicarle una perturbación a la fibra óptica, la longitud de onda cambiará de manera proporcional a través de la expansión o compresión del tamaño y tono de la rejilla debido a un cambio químico, mecánico, o a un cambio en la temperatura, variando, por lo tanto el índice de refracción efectivo de la fibra. La perturbación suele extenderse longitudinalmente desde apenas unos milímetros hasta algunos centímetros, con períodos que van desde décimas de micrón a fracciones de milímetro para el caso de las redes de período largo (Ref.11).

La longitud de onda de reflexión en una red de Bragg es:

$$\lambda_B = 2 \cdot \Lambda_B \cdot n_{ef}$$

Donde:

λ_B = longitud de onda de Bragg

Λ_B = es el período fundamental de la perturbación, normalmente de 250 a 500nm, y

n_{ef} = índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica.

Las redes grabadas de fibra son ampliamente usadas en la fabricación de sensores de temperatura, deformación, acelerómetros, sensores de presión, inclinómetros y sensores de desplazamiento (Ref.22). Entre sus principales características, se encuentran:

- inmunidad a las interferencias electromagnéticas, electrostáticas y de radio
- inmunidad a cortos eléctricos
- Intrínsecamente seguras
- bajas pérdidas de potencia
- tamaño pequeño y poco peso
- grandes distancias entre repetidores de la señal (son muy eficientes para transmitir señales a grandes distancias)
- posibilidad de operación multiplexada remota
- amplio ancho de banda (es decir, pueden enviar grandes cantidades de información).
- alta sensibilidad
- transporte de toda la información a velocidades cercanas a la de la luz (Ref.1), entre otras.

Existen diferentes tipos de sensado utilizando fibra óptica:

- Sensado puntual. En éste se cuenta con un sólo sensor por cada hilo de fibra, ubicado en un punto de interés en particular.

- **Sensado cuasi-distribuido.** Se instalan varios sensores en un mismo hilo de fibra, interrogados por división multiplexada de longitud de onda, por división multiplexada de tiempo, o una combinación de ambas, lo cual representa un ahorro importante en cuanto a instalación y mantenimiento del sistema, por lo que se utiliza con mayor frecuencia en aplicaciones de monitoreo estructural.
- **Sensado distribuido.** La misma fibra actúa como un sensor distribuido capaz de sensar en todos los puntos a lo largo del enlace. Se basa en el efecto Raman: es la llamada tecnología DTS. Aplica en aquellos casos en los que la variable a medir es la temperatura, como en los sistemas de detección de incendios (Ref.22).

A pesar de su alto costo en comparación con los sensores convencionales, el uso de los sensores de fibra óptica está teniendo cada vez mayor demanda en la aplicación de los sistemas de monitoreo estructural, debido a las múltiples ventajas que ofrece.

3.4 Clasificación de los transductores por la variable a medir.

Existen variables físicas, de flujo y caudal, térmicas, químicas, ópticas, acústicas, eléctricas, magnéticas y biológicas. Se proporciona una breve descripción de los sensores y transductores para medición de parámetros que por su naturaleza son de interés para el monitoreo de obras civiles, así como algunas de sus características. Para medición de otro tipo de variables pueden ser consultadas las Refs. 1, 7 y 8, entre otras.

La elección de un transductor depende del tipo de medición y de la magnitud a medir. Características como el intervalo de medición y la resolución serán

determinadas en base a su aplicación. Otras características del transductor dependen del equipo de captura que se tenga o se vaya a adquirir.

3.4.1 Transductores de aceleración y vibración. Los transductores para medir la aceleración se conocen como acelerómetros, acelerógrafos o sismógrafos, y son dispositivos cuya función es cuantificar la aceleración de un cuerpo en movimiento; usan un método sensor en el que la aceleración actúa sobre una masa sísmica formada por un muelle, y cuyo movimiento es normalmente amortiguado.

De acuerdo a su funcionamiento (secc.3.3), los acelerómetros se clasifican en potenciométricos, capacitivos, piezoeléctricos, por reluctancia, de galgas extensométricas o piezorresistivos, tipo servo, de cuerda vibrante, por giroscopio, de tecnología MEMS o basado en tecnología de fibra óptica (Fig.3.26). La selección de estos transductores depende, fundamentalmente, del rango y la respuesta en frecuencia o ancho de banda; existen sin embargo, otros factores a considerar, como la salida a fondo de escala o sensibilidad, sensibilidad a la aceleración transversal, errores de instalación, errores de temperatura, sensibilidad a niveles elevados de presiones sónicas y capacidad de la respuesta al sobrepasarse el rango de operación.

Su aplicación está directamente relacionada con su frecuencia de resonancia, la cual varía dependiendo de la tecnología del acelerómetro, así como de su respuesta en frecuencia. En base a ésta última, se diferencian acelerómetros para baja frecuencia, para frecuencias medias, para altas frecuencias y de alta sensibilidad. Existen también acelerómetros para altas temperaturas y acelerómetros de impacto (Ref.23). En la tabla 3.1 se resumen algunas características de diversos tipos de acelerómetros.

Debido al amplio rango de respuesta en frecuencia encontrado para diversos acelerómetros, desde DC, es decir, el valor del voltaje no cambia o se mantiene lineal en el tiempo, ó 0Hz hasta kHz, se ha considerado tomar los siguientes parámetros de frecuencias a manera de tener una referencia:

Acelerómetros para baja frecuencia (desde DC o 0Hz hasta 200 o incluso hasta 500Hz). Se utilizan los acelerómetros capacitivos, MEMS piezorresistivos o servoacelerómetros. Éstos han de tener una respuesta plana desde la menor frecuencia posible, siendo los acelerómetros MEMS los que cuentan con esa respuesta. Su principal aplicación son los ensayos donde la oscilación es muy lenta y para el monitoreo de obras civiles, ya que en ocasiones se miden vibraciones por explosiones o modos de vibración mayores a los de la frecuencia natural de una estructura.

Acelerómetros para frecuencias medias (de 500 a 10,000Hz). Se pueden conseguir frecuencias medias tanto en acelerómetros capacitivos o en MEMS piezorresistivos. Todo depende del rango de aceleraciones a medir. Para este rango de frecuencias, su aplicación es principalmente industrial.

Acelerómetros para altas frecuencias (mayor a 10,000Hz). Éstos se reservan para medición de vibraciones en maquinaria y aplicaciones especiales en los que, generalmente son utilizados acelerómetros piezoeléctricos.

Acelerómetros de alta sensibilidad: En aplicaciones donde los niveles de vibración son casi imperceptibles se utilizan servoacelerómetros o acelerómetros sísmicos. Su principal característica es que tienen una señal de salida muy alta, generalmente 1000mV/g, lo que provoca tener un valor alto de salida, incluso para valores bajos de vibración. Suelen ser modelos piezoeléctricos especiales, aunque también hay tipos piezorresistivos o MEMS.

Acelerómetros para altas temperaturas. Para esta aplicación se utilizan acelerómetros piezoeléctricos. Tienen un rango de temperatura extendido con salida de carga, de -73°C a $+260^{\circ}\text{C}$.

Acelerómetros de impacto. Se caracterizan por la detección de fuertes aceleraciones en períodos cortos de tiempo, como en el disparo de las bolsas de aire de los automóviles (secc. 3.3.4).

Acelerómetros Piezoeléctricos. El rango de frecuencias de estos acelerómetros, tiene usualmente un límite inferior entre 1 y 3Hz y un límite superior entre 2 y 10kHz, aunque algunas pueden superar los 25kHz o, en el caso de aplicaciones sísmográficas cuyo rango de frecuencias es de 0.04 a 150Hz.

Acelerómetros Potenciométricos. Se caracterizan por una señal de salida de nivel alto y un rango de frecuencias relativamente estrecho, del orden de 0 a 20Hz para rangos bajos de aceleración y hasta alrededor de 60Hz para rangos altos (rango más alto, muelle más tenso y mayor frecuencia natural).

Servo acelerómetros. Consisten en una masa suspendida en el campo magnético de un detector de posición. Cuando la masa es sujeta a la fuerza de la gravedad a lo largo de su eje sensible, trata de moverse, y esto causa un cambio de corriente en el detector. Dicho cambio es retroalimentado a una bobina por medio de un servo-amplificador impartiendo una fuerza electromagnética a la masa, igual pero en sentido opuesto a la fuerza inicial de gravedad, por lo que el resultado es que la masa no se mueve, y la corriente que se aplica a la bobina se mide mediante el voltaje a través de una resistencia de precisión. El voltaje es directamente proporcional a la fuerza inicial. Este principio operativo aplica de manera similar en servo inclinómetros. El rango de frecuencias en este tipo de transductores puede ir desde 0.1 a 15Hz, rango de medida desde 0.05 hasta 1g. Presentan una excelente estabilidad a cambios de temperatura y alta resistencia a vibraciones.

Existen diseños de servo acelerómetros basados en galgas extensométricas y sensores fotoeléctricos.

3.4.2 Transductores con referencia gravitacional. La fuerza de gravedad se usa como referencia para la determinación de un eje vertical. Los transductores utilizados para medir el movimiento angular respecto a la vertical son de diseño simple, con una masa líquida o sólida unida a un transductor o formando parte de éste. A este desplazamiento con respecto a la vertical se le denomina inclinación, y el tipo de transductores que se utilizan son conocidos como inclinómetros. Existen inclinómetros conductivos o electrolíticos, basados en tecnología MEMS, capacitivos y servoinclinómetros.

Sus principales aplicaciones incluyen el monitoreo estructural (Fig.3.27), y la auscultación geotécnica (Fig.3.28). En ésta última los movimientos vienen determinados por la inclinación del eje de la sonda respecto a la vertical a diferentes profundidades. Entre sus principales características se encuentran la resolución, la repetibilidad y el rango de medición.

Los *potenciómetros líquidos o electrolíticos* tienen una disposición especial, prevista para medir inclinaciones. Consisten en un tubo de vidrio curvado y cerrado herméticamente, parcialmente lleno con un fluido conductor, y en el que se forma una burbuja de aire. Dentro del tubo hay tres o cinco electrodos metálicos en contacto con el líquido. Entre los electrodos extremos se aplica una tensión alterna. Cuando el tubo está nivelado, la tensión aplicada en el electrodo de control, es 0V. Cuando el tubo se inclina, cambia la posición de la burbuja, y con ello la resistencia eléctrica entre el electrodo central y los otros electrodos (Fig.3.29).

Hay modelos con una resolución de hasta 10^{-8} rad, y rango de medición desde $\pm 0.5^\circ$ hasta $\pm 60^\circ$. Las imágenes de las figs. 3.27 y 3.29 muestran un inclinómetro de este tipo y un esquema de su funcionamiento, respectivamente.

Otro tipo de inclinómetros basados en este principio de funcionamiento son los denominados *de péndulo*, que consisten en un peso en el contorno de un segmento plano de un círculo, montado de manera que puede girar por medio de algún soporte alrededor del centro del círculo. El segmento está unido a un disco no conductor sobre el que se monta un elemento potenciométrico curvado centrado, un brazo de palanca se coloca solidario al soporte móvil del peso. Este brazo se apoya sobre el anillo potenciométrico, de manera que al girar el peso, el brazo recorre el elemento potenciométrico (Ref.1).

Servoinclinómetros: De manera similar a los servoacelerómetros, su principio de funcionamiento se basa en la realimentación en corriente debida al movimiento de un elemento sísmico que está sumergido en aceite cuando está sujeto a una inclinación o aceleración que, tenderá a moverse con respecto a la carcasa. Dicho movimiento es registrado por un detector óptico y transformado en corriente, la cual es realimentada a una bobina. La corriente traerá a la masa sísmica de regreso a una posición neutra. La medición de la corriente requerida para mantener a la masa estable es proporcional a la inclinación o aceleración aplicada.

La tecnología servo permite trabajar con una alta estabilidad térmica gracias a su baja deriva térmica por compensación de temperatura, y estabilidad mecánica frente a vibraciones, golpes, choques, etc., gracias a que mantiene la masa sísmica del sensor sumergida en aceite y realimentada en corriente.

Algunas características de diferentes modelos que se ofrecen en el mercado son: Rango de medición $\pm 1^\circ$ a $\pm 90^\circ$; salida analógica en corriente y tensión y digital; linealidad 0.1%; frecuencia de respuesta 5Hz $\pm 10\%$, 0.1 a 5Hz; temperatura de

operación -40°C a +85°C. Entre sus principales aplicaciones se tiene el monitoreo estructural de edificios, viaductos y puentes, para el control de movimientos angulares y nivelación de plataformas.

3.4.3 Transductores de deformación. Aunque las deformaciones pueden medirse por los métodos de reluctancia, capacitiva y cuerdas vibrantes, así como por métodos foto-ópticos (foto-esfuerzos), el dispositivo más comúnmente usado para esta medida son los transductores de deformación resistivos, o “galgas extensométricas”, que consisten esencialmente en un conductor o semiconductor de pequeña sección que se monta sobre la superficie a medir, de manera que sigue las pequeñas elongaciones o contracciones debidas a las tensiones o compresiones de la superficie. Como consecuencia la galga sufre un cambio de resistencia debido al esfuerzo conocido como efecto piezorresistivo (Fig.3.30a). La fig. 3.30b, muestra una aplicación de éstas en un cilindro de concreto y en un tubo de acero que serán sometidos a pruebas de compresión.

El esfuerzo se relaciona con la deformación a través de la Ley de Hooke (siempre y cuando no se supere su límite elástico): el módulo de elasticidad es la relación entre el esfuerzo y la deformación. Si se conoce el módulo de elasticidad del objeto cuya deformación se mide, se puede determinar el esfuerzo soportado. Esto es cierto teóricamente, aunque sólo se use una única galga. Cuando se utilizan dos o más galgas, se pueden medir los esfuerzos en las direcciones de orientación de éstas.

$$\sigma = F/A = E \cdot \varepsilon = E (dl / l),$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad del material, denominado módulo de Young,

σ es el esfuerzo axial y

ϵ es la deformación unitaria.

La sensibilidad de una galga extensométrica se denomina Factor de la galga, y se define como la relación entre el cambio unitario en resistencia y el cambio unitario en longitud, o

$$GF = (\Delta R/R) / \Delta L/L = (\Delta R/R) / \epsilon,$$

En donde

GF = factor de la galga

$\Delta R/R$ = cambio unitario de resistencia

$\Delta L/L$ = cambio unitario de longitud

ϵ = deformación ($\mu\epsilon$)

Existen diferentes tipos de galgas extensométricas, como son: de hilo metálico, de lámina metálica, de metal depositado, fijadas con calor, semiconductoras y de aplicaciones especiales (Ref.1).

De hilo metálico. Son las más sencillas y pueden ser de: fijación o soldables. Las de fijación están pegadas a una base o elemento portador, de dimensiones estables; de superficie transferible, están pensadas para extraerlas cuidadosamente del portador y pegarlas sobre la superficie a medir. Las segundas están embutidas entre dos armaduras de metal delgado y rodeado por material aislante y cuyo encapsulado se finaliza cerrando las armaduras entre sí.

De lámina metálica. Entre sus ventajas se tienen que son fabricadas en dimensiones diversas, incluso muy pequeñas, tienen un costo reducido, presentan buena estabilidad en el tiempo, son más estables térmicamente y debido a su

pequeña superficie siguen mejor la temperatura de la superficie medida; la más común es una rejilla con una longitud mucho mayor para el eje sensor, como las que se observan en la Fig.3.30.

De metal depositado. Este tipo de galga se utiliza en los diafragmas de sensores de presión.

Fijadas con calor. Se utilizan en superficies que estarán expuestas a ambientes muy hostiles, como las paredes de un cohete.

Semiconductoras. Al estar fabricadas de silicio son muy frágiles, por lo que este tipo de galga tiene restricciones de aplicación, su cambio resistivo no es lineal y tiene una gran dependencia con la temperatura; sin embargo debido a su capacidad de producir tensiones de salida elevadas con pequeñas deformaciones, éstas se utilizan en transductores como acelerómetros, transductores de fuerza y presión, entre otros.

De aplicaciones especiales. Dentro de éstas se encuentran las “galgas post recuperación” que se utilizan para medir la deformación producida después de que el objeto ha sido cargado alrededor del punto de fluencia, así como las “galgas de vida-fatiga”; se pueden obtener datos indicativos sobre las fatigas destructivas de una estructura instalando galgas en una réplica de la estructura y aplicándole una excitación a la misma hasta su ruptura, midiendo la historia de las fatigas con la galga.

Las características de una galga típica son: factor de calibración entre 2.0 y 2.2; resistencia sin deformación de $120 \pm 1\Omega$, linealidad dentro de $\pm 0.3\%$, deformación máxima por tensión de $+2 \times 10^{-2}$, deformación máxima por compresión de -1×10^{-2} , temperatura máxima de operación de 150°C , entre otras.

3.4.4 Transductores de fuerza, masa o peso. Los transductores de fuerza se denominan frecuentemente *celdas de carga*. Convierten una fuerza aplicada en un desplazamiento mecánico, que mediante un elemento transductor se convierte en una señal de salida. Dos características de deformación elástica se utilizan en la transducción de fuerzas: la deformación local y la deflexión.

Un valor máximo de cada uno se detecta en algún punto del elemento sensor -no necesariamente en el mismo punto ambos-, y es este valor el que da la magnitud transducida. Los elementos sensores son, generalmente, de los siguientes tipos: vigas, anillos, columnas o diafragmas (Fig.3.31).

La característica principal es el rango de medida, el cual es muy amplio, desde unos pocos gramos hasta cientos de toneladas.

3.4.5 Transductores de desplazamiento, posición y movimiento. Este tipo de transductores permiten conocer desplazamientos, detectar movimientos o medir posición por medio de sus ejes sensores, excepto los dispositivos sensores de desplazamiento sin contacto, en los que se utiliza un acoplo óptico, inductivo u otros similares, entre el objeto sensor y el elemento que se quiere medir.

Los hay bajo diversos principios de funcionamiento como son: del tipo capacitivo, inductivo, por reluctancia, por galgas extensométricas, potenciométricos, de cuerda vibrante y fibra óptica, siendo estos tres últimos los más empleados en el monitoreo estructural. Principios de funcionamiento de estos transductores para otras aplicaciones pueden consultarse en la (Ref.1).

En la figura 3.32 se muestran diferentes sensores de desplazamiento potenciométricos. En el desarrollo de esta tesis, se encontró la aplicación de estos instrumentos en el seguimiento del comportamiento de aberturas entre arcos en el

interior del Palacio Nacional (Fig.3.33), Catedral y El Sagrario Metropolitano, así como en ensayos de columnas para el viaducto bicentenario (Fig.3.34).

Otro tipo de dispositivos utilizados para la medición de desplazamientos en obras civiles, son los péndulos (directos e invertidos), los cuales miden los desplazamientos en los ejes X y Y, preestablecidos.

Telecoordenómetro. Consta de un péndulo directo con Telecoordenómetro, cuyo principio de funcionamiento se basa en su posibilidad de determinar las coordenadas X y Y de la línea vertical de una plomada, a través de la intersección de ésta con dos barreras de luz, montadas en un carro que es conducido por un actuador lineal de precisión (Fig.3.35). Se realizan barridos con dos haces luminosos, de los cuales uno es paralelo al eje Y, y el otro está dirigido en un ángulo de 45° , con el objetivo de interceptar con estos tanto las referencias extremas R1 y R2 en los ejes (Y, X), respectivamente, como el punto de ubicación de la plomada, y por medio de cálculos trigonométricos, se determinan de manera automática las coordenadas Y, X (Fig.3.36).

3.4.6 Transductores de esfuerzo o presión. Se denominan celdas de presión; están compuestas por dos placas circulares de acero inoxidable soldadas en su perímetro y con una separación que contiene una estrecha cavidad con aire y aceite. Cuando la presión del suelo cambia, ésta oprime las dos placas, lo cual origina un incremento de presión del fluido dentro de la celda. El transductor de presión, convierte esta presión en una señal eléctrica que se transmite como frecuencia por cable a la consola lectora (Fig.3.37) La presión se detecta mediante elementos sensores mecánicos, electromecánicos o electrónicos, como una membrana elástica, una lámina, una corteza, o un tubo que ofrecen a la presión

(fuerza), una superficie de actuación (área). Se mide como la fuerza por unidad de área (N/m^2).

Los *transductores de presión mecánicos* se dividen a su vez en:

- elementos de medida directa, que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas.
- elementos primarios elásticos que se deforman por la presión directa del fluido que contienen.

Los *transductores electromecánicos* utilizan un elemento mecánico elástico (que puede ser un tubo de Burdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o un desplazamiento mecánico), combinado con un transductor eléctrico que genera la señal correspondiente. Cuando esta fuerza no está equilibrada por otra fuerza igual actuante en la superficie opuesta del elemento sensor, el elemento entra en flexión, que se traduce como un desplazamiento o una deformación.

Según su principio de funcionamiento, se clasifican en: transmisores eléctricos de equilibrio de fuerzas, resistivos, magnéticos, capacitivos, extensométricos y piezoeléctricos. En la Ref.7 pueden observarse de manera general diversas imágenes de estos dispositivos.

3.4.7 Transductores para medición de asentamientos diferenciales. De acuerdo a la bibliografía consultada, se encontró que los sistemas para medición de asentamientos diferenciales, cuya aplicación es principalmente geotécnica, pueden realizarse por medio de extensómetros magnéticos o a través de sensores de presión de cuerda vibrante, de fibra óptica y funcionamiento hidráulico. Sus

principales aplicaciones son la medición de asentamientos en presas, en rellenos y terraplenes, cimentaciones, túneles, caminos, así como la obtención del perfil de asentamientos.

En el primer caso, una sonda se introduce en un tubo guía telescópico para detectar y medir la posición de los anclajes magnéticos situados alrededor del mismo a varias profundidades a lo largo de la perforación o del relleno. Las anclas de araña, se utilizan en pozos de sondeo. Los anclajes de placa magnética son utilizados en el relleno en suelos blandos (Figs.3.38 y 339).

Los sensores de funcionamiento hidráulico (Fig.3.40), miden los asentamientos diferenciales mediante un sensor de presión conectado a un sistema de vasos comunicantes en cuyo interior se localizan uno o dos tubos de cristal, los cuales contienen líquido y están interconectados entre sí. La presión dentro de los tubos es sensada por el transductor, el cual da la medida de la diferencia de la carga hidráulica entre el sensor y el depósito.

3.4.8 Transductores meteorológicos. Existen diversos parámetros ambientales de los cuales, la temperatura, la radiación solar y la velocidad y dirección del viento afectan de manera directa y permanente el comportamiento estructural de las obras civiles.

Transductores de temperatura. Los sensores de temperatura o termómetros, se caracterizan por tener en un mismo elemento las funciones sensoras y de transducción. Se basan en fenómenos que son influidos por la temperatura, como son:

Variación de resistencia de un conductor (conocidas como *sondas de temperatura o RTD's*); midiendo el valor de corriente que circula a través del RTD, se mide la

temperatura con precisión. Aunque se emplean conductores como el cobre o níquel en su fabricación, el material más utilizado es el platino por las ventajas que ofrece:

- Alta resistividad
- Margen de temperatura bastante amplio
- Proporciona medidas con mayor exactitud y repetitividad
- El valor de resistencia del sensor RTD puede ser ajustado con gran exactitud, de manera que la tolerancia sea mínima.
- Son los más estables con el tiempo, presentando derivas en la medida del orden de 0.1°C/año .
- Alta linealidad (la relación entre la temperatura y la resistencia es la más lineal)
- Tienen una sensibilidad mayor que los termopares.

No obstante, es importante considerar también las desventajas que éste presenta:

- Su costo es más elevado que el de un termistor o un termopar.
- Debido a un mayor tamaño y masa de un sensor RTD, con relación a un termistor o un termopar, se verá limitada su velocidad de reacción.
- Se alimentan con tensiones muy bajas para evitar el auto-calentamiento.

Son menos durables que los termopares ante vibraciones, golpes, etc.

Variación de resistencia de un semiconductor, (conocidos como termistores). El elemento sensible a la temperatura es la resistencia del semiconductor. Tienen un coeficiente de temperatura de resistencia negativo (NTC) o positivo (PTC), de valor elevado, por lo que presentan cambios grandes y extremadamente rápidos para variaciones pequeñas de temperatura. Se fabrican de óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, titanio y otros metales. Tienen su principal aplicación en la compensación de temperatura, como temporizadores y como

elementos sensibles en vacuómetros. Las limitaciones al aplicar termistores son similares a las consideradas en los RTD. Mención particular merece la estabilidad del termistor con el tiempo y el medio.

Fuerza electromotriz o f. e. m. creada en la unión de dos metales distintos. Basados en el efecto Seebeck -descrito en la sección 3.3.1-; se denominan *termopares*. Un termopar está constituido por dos metales diferentes unidos en sus extremos, a través de los cuales circula una corriente eléctrica, pero al existir un cambio en la temperatura en el punto de unión de los dos metales, se genera una deflexión mecánica y por lo tanto el área de contacto entre los dos metales se modifica, lo que produce un cambio en la resistencia eléctrica del circuito que circula por los dos metales y que puede cuantificarse.

Las especificaciones de diversos detectores de temperatura resistivos se muestran en la Tabla 3.2.

Transductor de intensidad de la radiación total emitida por un objeto (pirómetros de radiación). Se incluyen en este punto instrumentos como piranómetros de radiación solar global, reflejada, difusa, pirheliómetro Angstrom y pirradiómetros, entre otros, y cuyas características se describen en la Ref. 1.

Piranómetro de Radiación solar global. Mide la radiación solar recibida desde todo el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal terrestre. Su principio de funcionamiento es a través de termopares, los cuales al calentarse como producto de la radiación del sol, emiten una pequeña fuerza electromotriz (tensión o mini voltaje), pudiendo ser medidas por algún otro instrumento.

Radiómetro UV. Es un instrumento que se utiliza para medir la radiación ultravioleta recibida desde todo el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal terrestre en un rango espectral de 280 a 320nm.

Las figuras 3.41 y 3.42 muestran un termómetro utilizado para medir la temperatura en el exterior de la Catedral, así como un radiómetro, también instalado en el exterior de ésta.

Transductores de velocidad y dirección del viento. En algunas obras civiles es particularmente importante el monitoreo de parámetros dinámicos, como es la velocidad del viento, y en algunos casos, también su dirección; por ejemplo en puentes la información del viento es importante para estudiar la vibración de los cables, así como para estimar la carga del viento sobre su estructura y sobre el tráfico de vehículos. Para ello, se utilizan instrumentos meteorológicos para medición de la dirección y velocidad del viento o anemómetro, así como sensores para la medición de humedad.

Existen en el mercado diferentes tipos de anemómetros, entre los que se encuentran: de hilo caliente, de rueda alada, y ultrasónicos.

Un *anemómetro de hilo caliente* consiste en un hilo de platino o níquel calentado eléctricamente; la acción del viento tiende a enfriarlo haciendo variar así su resistencia; por consiguiente, la corriente que atraviesa el hilo es proporcional a la velocidad del viento.

Los anemómetros de rueda alada son instrumentos para medición de la velocidad del viento y del caudal volumétrico. Obtienen una precisión máxima en velocidades a partir de 0.25 m/s. Algunos modelos miden además otros parámetros como humedad, temperatura y presión atmosférica.

Los anemómetros ultrasónicos como el que se aprecia en la Fig. 3.43, se basan en que la velocidad de propagación del sonido depende de la velocidad del viento; se mide el tiempo que demora una señal de sonido en atravesar una distancia

conocida, normalmente unos 20 cm). Son de construcción robusta, sin partes móviles; suelen dar una medida más precisa de la velocidad y dirección del viento, por lo que entre sus aplicaciones principales destacan aquellas relacionadas con las obras civiles. Algunas de sus características son, para la velocidad del viento: rango de 0 y hasta 85m/s, precisión 0.014m/s, .01m/s, 0.3m/s; resolución de 0.01 a 0.30m/s. Para la dirección del viento; rango de 0 a 359°; precisión $\pm 1^\circ$, $\pm 2^\circ$, $\pm 3^\circ$, resolución 1° , temperatura de operación -35°C a $+70^\circ\text{C}$.

3.4.9 Tecnología DGPS (Sistema de posicionamiento global diferencial). Los desplazamientos relativos son básicos para evaluar las condiciones de seguridad en una estructura (Ref.13). Un dispositivo GPS no solo permite ubicar un punto o una serie de puntos respecto de un sistema de referencia global y/o local, pueden realizarse también pruebas experimentales estáticas y dinámicas, así como realizar pruebas a gran escala.

Su funcionamiento está basado en el principio de triangulación que realizan algunos de los 26 satélites NAVSTAR que orbitan alrededor de la Tierra, a unos 20,000 km sobre la superficie de ésta, y que constantemente transmiten su posición (x, y, z), con respecto a un punto de referencia, y la hora actual mantenida por el reloj atómico.

Estos sistemas constan de dos partes básicas: dos antenas GPS, una que se utiliza como punto móvil y otra como punto de referencia, que captan las señales de los satélites en el espacio; y un registrador en el que las señales que captan las antenas del espacio son almacenados y se bajan a un programa de cómputo instalado en una PC a través del cual las señales se procesan para obtener los desplazamientos registrados en los puntos móviles, con respecto al punto de referencia. Pueden integrarse con otros métodos geotécnicos y topográficos para

la auscultación durante la fase constructiva y el seguimiento en la fase de operación. Hoy en día alcanzan precisiones de 1 a 3mm; el proceso en tiempo real proporciona, además de la posición, la posibilidad de establecer umbrales de movimiento y alarmas que se notifiquen automáticamente cuando estos umbrales se exceden.

La distancia de un satélite “j” a la posición desconocida en la Tierra se calcula midiendo el tiempo necesario para la propagación de una señal de satélite para llegar a la antena receptora del usuario. Debido a que no dependen ni de las variaciones atmosféricas ni de temperatura, estos dispositivos son una buena opción para medir desplazamientos locales y/o globales de manera directa, en comparación con los acelerómetros, velocímetros y sensores láser, en algunos de los cuales los desplazamientos deben obtenerse por integración.

En las imágenes de la fig.3.44 se aprecian las antenas GPS, el registrador y su funcionamiento.

4. APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO EN LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE DIVERSAS OBRAS CIVILES.

Edificios, carreteras, puentes, túneles, presas y centrales hidroeléctricas y nucleares, entre otras, son un indicativo importante del desarrollo económico de una sociedad. Por lo tanto, un buen diseño, calidad en la construcción, así como la explotación duradera y segura de éstas son objetivos primordiales de Ingeniería.

El desconocimiento de las propiedades del concreto, la fatiga del acero, estructuras complejas o muy altas, la edad avanzada de ciertas construcciones, así como deformaciones, inclinaciones o desplazamientos que éstas sufren son consideraciones importantes para buscar herramientas de investigación y aplicación como el monitoreo estructural, que permitan conocer el comportamiento de las construcciones en condiciones de servicio.

Debido a las incertidumbres que pueden llegar a surgir sobre el comportamiento estructural de algunas obras civiles, que a continuación se comentan, ya sea por su complejidad, importancia económica o por su interacción con el medio circundante, surge la necesidad de implementar sistemas de monitoreo, mismos que pueden concebirse desde la etapa de diseño, e implementarse ya sea durante la construcción o después de ésta, o durante ambas etapas.

Dada la diversa simbología encontrada, se ha propuesto una simbología para mantener la uniformidad en los esquemas de instrumentación de obras civiles (Tabla 4.1).

4.1 Plantas nucleares

En cualquier tipo de construcción sus estructuras se deterioran con el tiempo debi-

do a múltiples factores, afectando su capacidad. Los procesos de envejecimiento son difíciles de cuantificar porque normalmente inician a nivel microscópico, afectando a la estructura interna de los materiales que los debilita gradualmente pudiendo llegar a provocar problemas de estabilidad.

En el caso particular de las plantas nucleares, se presta especial atención a: las soldaduras del revestimiento de acero inoxidable de la vasija del reactor, las tuberías, al agrietamiento de los robustos muros de concreto reforzado, cuyo espesor es del orden de 1.5m, los cuales constituyen la contención primaria y secundaria, y que, en conjunto, forman el edificio del reactor o edificio de contención, y a las piscinas de enfriamiento, entre otros elementos. Se ha identificado que las partes vulnerables están asociadas a deficiencias en el diseño, así como a los nunca exentos errores humanos, como es el caso de accidentes en la central nuclear de Three Mile Island, Pensilvania, Estados Unidos en 1979 y de Chernóbil, Ucrania, Rusia en 1986 (Fig.4.1 y 4.2).

Es precisamente en casos como éstos en los que la prevención, a través del uso de sistemas de monitoreo, juega un papel fundamental en la detección oportuna de cualquier síntoma de comportamiento inadecuado.

Desafortunadamente no se encontró información sobre la instrumentación estructural en este tipo de obras, excepto para la central nuclear de Olkiluoto 3, en Finlandia cuyo sistema de monitoreo está formado por más de 500 sensores convencionales, incluyendo cuerdas vibrantes, deformímetros y celdas de carga, sistemas de péndulo, sensores de temperatura y humedad (Smartec, 2011). Cuenta también con más de 1,500 metros de sensores de fibra óptica para la medición de esfuerzos y temperatura, y una unidad de medición central con el

software personalizado para el tratamiento, visualización y almacenamiento de los datos.

El sistema de monitoreo en esta estructura fue concebido para dar seguimiento a deformaciones, esfuerzos, asentamientos, desplazamientos e inclinaciones del contenedor general de concreto, así como de los esfuerzos en el revestimiento de acero, prestando especial atención también a diversos parámetros como la humedad y temperatura, así como para evaluar el desempeño físico y mecánico, y salvaguardar la integridad y hermeticidad de la contención durante la etapa de construcción, así como a lo largo de toda su vida útil.

En la figura 4.3 se aprecia un ejemplo de la instrumentación en una central nuclear, en la cual, los esfuerzos en el edificio de contención son medidos mediante deformímetros de cuerda vibrante embebidos en la losa de cimentación, muros y cúpula; el registro de asentamientos y la temperatura del edificio de contención se lleva a cabo por medio de medidores de asentamientos ó nivelómetros, y termopares, también embebidos en el concreto; la desviación vertical y desplazamientos del edificio de contención interior son medidos con péndulos; la medición del desplazamiento horizontal de los muros se realiza por medio de medidores de convergencia de hilo invar, y, el esfuerzo y pre-tensado de cables es medido por medio de celdas de carga (Ref.3 Internet).

El caso de la central nucleoelectrica de Fukushima, aunque no se tienen antecedentes de fallas estructurales derivadas de los efectos del terremoto ocurrido en Japón el 11 de marzo de 2011 y, posteriormente del tsunami, se ha visto seriamente afectada hasta la fecha, a causa de las explosiones en tres de sus reactores, derivadas de la falta de funcionamiento de los sistemas de enfriamiento, con el consiguiente daño estructural a los edificios que los resguardan, en especial el edificio de la unidad 4 (Figs.4.4 y 4.5), poniendo en evidencia la vulnerabilidad de estas estructuras cuando otros sistemas complementarios fallan o son sobrepasadas las condiciones de diseño por eventos

naturales sin precedentes; es decir, ocurrencias no consideradas en el diseño por su baja probabilidad, que ponen en riesgo no sólo a la estructura misma, sino al medio ambiente y a la población en general.

Ante la severidad de los acontecimientos, es necesario resaltar la eficacia con que los sistemas de contención diseñados para estos reactores soportaron las secuelas del evento.

Los sistemas de barrera intrínsecos en el diseño de estos reactores contuvieron en su interior casi la totalidad de los materiales de fisión del combustible, teniendo un impacto a la población y el ambiente muy por debajo de lo sucedido en Chernóbil (Ref.14).

Los accidentes en las centrales nucleares Three Mile Island y Chernóbil condujeron a mejoras en la contención primaria ante accidentes de la fundición del núcleo y al rediseño del sistema de venteo en las contenciones primarias. Se espera que, derivado de los eventos en Fukushima, el estudio de accidentes severos se enfoque a todas aquellas actividades tendientes a evitar o reducir la magnitud de daño al núcleo, a preservar las capacidades de la contención y a reducir las consecuencias de una descarga radioactiva al ambiente.

En México, sólo se cuenta con la central nucleoelectrónica Laguna Verde, ubicada en la localidad denominada Punta Limón, en el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, Veracruz; está integrada por dos unidades con una capacidad de 682.44 MWe (Mega Watts eléctricos); los reactores son tipo Agua Hirviente (BWR-5) y la contención tipo Mark II de ciclo directo (Fig.4.6 y 4.7). Información detallada sobre la planta se encuentra en la (Ref.15), así como en diversos informes de la Comisión Federal de Electricidad.

Aunque se desconoce cómo está configurada la instrumentación en esta central nucleoelectrónica, después de la experiencia lamentable de Fukushima, se espera que dicha instrumentación preste especial atención a los diversos elementos que

garanticen la seguridad de la estructura, sobre todo de las cámaras de contención. Se considera que un buen ejemplo a seguir es la instrumentación estructural detallada e implementada en la planta nuclear de Olkiluoto 3. Las imágenes de las figuras 4.8 y 4.9, muestran la vista general de las centrales nucleoelectricas de Olkiluoto 3 y Laguna Verde.

4.2 Obras hidráulicas

4.2.1 Presas. Una presa es una barrera que se ubica estratégicamente, para embalsar el agua de un cauce natural que será aprovechada posteriormente, ya sea para abastecimiento de agua a la población, para riego, para regulación de avenidas o para generación de energía eléctrica.

Por sus dimensiones y proceso constructivo, las presas presentan un alto grado de complejidad. Esto, aunado a la carencia de registros prolongados de escurrimientos y lluvias en la cuenca de un río o condiciones topográficas, geológicas y sismológicas, puede generar retrasos importantes en su construcción, derivados de una errónea evaluación en la etapa de diseño, poner en riesgo la integridad de la presa debido al deslizamiento masivo de laderas al embalse, u obras de excedencia inadecuadas que pueden resultar en la pérdida del bordo libre o destrucción de la presa o, en el mejor de los casos, en una ampliación posterior de las estructuras.

El propósito de la instrumentación y monitoreo en presas es evaluar de manera continua ciertos parámetros de forma confiable, y saber si el comportamiento de la presa es el esperado o bien alertar sobre aquellos cambios en la estructura de la misma o sus laderas, que podrían poner en peligro su integridad, así como a poblaciones o alguna otra presa construida aguas abajo de la primera.

El tipo de presa está definido básicamente por la forma en que ésta deberá resistir el empuje del agua y evacuar los caudales excedentes, así como por el uso del agua contenida en la presa. Dependiendo de su funcionamiento estructural, éstas pueden clasificarse como: de tierra y enrocamiento, de gravedad, de arco o bóveda, de doble curvatura y de contrafuertes.

En el caso de presas de materiales sueltos la erosión interna o tubificación puede constituir el mayor riesgo para su estabilidad. En las presas de concreto, su cimentación; en una presa tipo arco, el origen de los puntos de falla puede encontrarse en la cimentación, en la presa misma o en el embalse.

Entre los principales problemas que se han observado en las presas pueden mencionarse los siguientes: deformación y agrietamientos en la cortina; asentamientos en la cimentación con la posible creación de fisuras; deslizamientos de la cimentación con falla del apoyo y consecuentes daños a la misma; la erosión de la cimentación debido a flujos de agua de descarga; así como deslizamientos de laderas. Algunos ejemplos de estos problemas se aprecian en las imágenes de la figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13.

La instrumentación en presas está enfocada a vigilar la verticalidad, esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y aceleraciones de la cortina, la cimentación, los estribos, el embalse y las laderas y su relación con la variación de temperatura, mediante la instalación de péndulos directos e invertidos, inclinómetros, deformímetros, extensómetros, celdas de presión, piezómetros, medidores de aceleración sísmica, termómetros y dilatómetros, y se complementa con instrumentación geotécnica de las laderas adyacentes al embalse. Recientemente se han incluido sistemas de posicionamiento satelital, GPS, para dar seguimiento a los desplazamientos que experimentan las cortinas de estas importantes obras de infraestructura.

En las figuras 4.14 a 4.16 se presentan dos ejemplos de instrumentación; uno corresponde a la presa “La Angostura” ubicada en el Estado de Chiapas, se trata de una presa tipo gravedad construida de tierra y enrocamiento; y el segundo a la presa “Manuel M. Diéguez”, esta última es de tipo arco, construida a base de concreto y se ubicada en el Estado de Jalisco. Información más detallada sobre el comportamiento de éstas y otras presas construidas en México, puede consultarse en la Ref.16.

4.2.2 Sistemas de abastecimiento de agua potable. El monitoreo en obras hidráulicas se extiende también a obras de abastecimiento de agua potable. En el Sistema Cutzamala, por ejemplo, una de las tuberías rígidas, que sirven de abastecimiento de agua potable a seis millones de habitantes de la Ciudad de México, se instrumentó para monitorear la variación espacial de los movimientos producidos por los sismos, así como las condiciones de esfuerzo-deformación en las juntas de unión entre sus tramos.

El monitoreo periódico de estas estructuras permitirá identificar de manera oportuna síntomas de comportamiento inadecuado a lo largo de la tubería, para evitar el desabasto imprevisto de este vital líquido a la población.

La Fig.4.17 muestra el arreglo con 3 acelerómetros uniaxiales, dos de ellos sobre la tubería en dirección paralela a la dirección de conducción, y uno de referencia sobre el terreno natural.

4.3 Puentes

De todas las estructuras hechas para el uso público ninguna requiere de tantos niveles de cuidados como los puentes ya que, además de su importancia económica y funcional en las redes de comunicación, están sometidos, a lo largo

de su vida útil, a fuertes acciones de carácter dinámico que con el tiempo pueden llegar a producir efectos que mermen la funcionalidad ó seguridad de la obra.

Accidentes como el colapso del puente Tacoma Narrows en noviembre de 1940 en Estados Unidos, de los puentes Seungsu, sobre el río Han en Seúl, Corea en 1994, del Puente San Cristóbal en Chiapas, México, en octubre de 2004, del Puente Minneapolis, Estados Unidos, en agosto de 2007 (Figs. 4.18 a 4.20) y muchos otros, han generado que se emitan requerimientos más estrictos y programas operativos, que incluyen inspecciones visuales, instrumentación, pruebas de capacidad de carga y mediciones en campo para la verificación del diseño y construcción, así como la evaluación del funcionamiento del sistema de monitoreo a largo plazo.

En estas estructuras resulta particularmente importante efectuar una adecuada selección de puntos a instrumentar como son los apoyos, las pilas a nivel de la cimentación, subestructura y superestructura y las cubiertas al centro de los claros para la medición de giros, desplazamientos, deformaciones y aceleraciones, que permitan dar seguimiento al comportamiento de la estructura en tiempo real y su evolución a lo largo del tiempo, por lo que se utilizan en éstos, deformímetros para mediciones estáticas y dinámicas, termómetros, anemómetros, acelerómetros, sismómetros e inclinómetros, entre otros. (Fig. 4.21 y 4.22).

4.4 Túneles y obras subterráneas

Se puede definir a un túnel como un paso subterráneo, abierto artificialmente a través de un monte o una montaña, por debajo de un río, de una carretera, incluso de una ciudad.

De las obras de ingeniería, los túneles son quizás algunas de las obras más complejas, debido principalmente a la incertidumbre que una excavación genera

acerca del comportamiento y la deformación de la masa del suelo que lo circunda, consecuencia de la alteración del estado natural de equilibrio de los esfuerzos, de una redistribución de éstos, así como de los esfuerzos inducidos por las nuevas estructuras construidas; es decir, por la interacción entre los elementos de soporte, revestimiento y terreno, así como la rigidez de éstos y el tiempo en que la interacción se desarrolla.

Al perforar un túnel, hay tres condiciones naturales que dan lugar a problemas de inestabilidad: orientación desfavorable de discontinuidades, orientación desfavorable de los esfuerzos respecto al eje del túnel, y flujo de agua hacia el interior de la excavación (Fig.4.23 y 4.24), por lo que la instrumentación y monitoreo constituyen uno de los elementos de juicio con que cuenta el ingeniero de túneles para la toma de decisiones.

Algunos ejemplos de situaciones de graves consecuencias, debido a este tipo de inestabilidades en la construcción de túneles y obras geotécnicas, se observan en las figuras 4.25 a 4.28.

Al realizar excavaciones de túneles, suelen medirse los siguientes parámetros:

- desplomos en edificaciones y columnas de estructuras viales vecinas, mediante plomadas electrónicas o inclinómetros (Fig. 4.29).
- Presiones del agua contenida en el subsuelo, de la masa de suelo y del suelo actuando sobre las paredes del túnel, utilizando piezómetros, piezoceldas y celdas de presión (Fig.4.30 y 4.31).
- vibraciones provocadas por la ocurrencia de sismos o por el procedimiento constructivo del túnel por medio de sismómetros o acelerómetros.
- deformaciones del terreno en el entorno de la excavación, hasta la profundidad del túnel o profundidades moderadas y a lo largo del eje del

túnel por medio de extensómetros de barra y deformímetros de cuerda vibrante (Fig.4.32 y 4.33).

- desplazamientos verticales y horizontales tanto en la superficie del terreno, como en el interior del subsuelo mediante la ubicación de bancos de nivel, inclinómetros y medidores de asentamientos (Fig.4.34).
- y convergencias de la periferia hacia el interior del frente de excavación, medidas con cintas métricas invar con tensado controlado (Fig.4.35).

De todos estos parámetros, los más importantes son las velocidades con que ocurren las deformaciones, ya que permiten juzgar la tendencia de la excavación a alcanzar su estabilidad en cierto plazo o bien la toma de decisiones acerca de la necesidad de reforzar o eliminar los soportes, deducir algunos parámetros de comportamiento mecánico del terreno circundante ó anticipar la forma y magnitud de la presión del terreno. La Fig. 4.36 muestra un ejemplo de instrumentación en la sección transversal de un túnel con sensores convencionales.

Los principios de funcionamiento de los sensores utilizados en estos tipos de obras se basan principalmente en cuerda vibrante, potenciómetros, MEMS y, en algunos casos, por medio de fibra óptica, estos últimos, con excelentes resultados

4.5 Edificios Históricos

La conservación y rehabilitación de edificios históricos es fundamental para la preservación de la cultura e historia de un país. Conlleva el trabajo de un equipo multidisciplinario en el que intervienen historiadores, arquitectos, e ingenieros civiles, entre otros profesionales, cuyo objetivo es la realización de tareas conducentes a prolongar la vida de estas estructuras, así como salvaguardar los valores intrínsecos de la misma: artístico, arquitectónico, histórico, estructural y económico.

A diferencia de una construcción reciente o nueva, en el estudio de estructuras antiguas, los modelos matemáticos no logran simular con precisión el comportamiento de las mismas, por lo que es importante que el ingeniero civil tenga un entendimiento global de la estructura, a través de realizar un análisis de las condiciones pasadas, las condiciones actuales y prever las condiciones futuras de la misma.

Derivado del proceso constructivo, la complejidad de este tipo de estructuras de edad avanzada, radica en diversos factores como son: peso propio de elevada importancia, ya que por sí solas transmiten esfuerzos considerables al suelo que las sustenta; las condiciones geológicas e hidráulicas que inducen asentamientos diferenciales; las solicitaciones a que se encuentra sometida a lo largo de su vida, o sus deformaciones.

Estas estructuras transmiten el peso de la cubierta hacia la cimentación esencialmente mediante cargas axiales en las bóvedas, columnas, arcos y muros. Es de interés por lo tanto, para el ingeniero civil, conocer y monitorear de manera permanente, aquellos parámetros como evolución de grietas, asentamientos diferenciales, deformaciones, o inclinación de los elementos verticales que puedan poner en peligro la estabilidad e integridad de la estructura o alguna parte de esta, así como su relación ante variaciones de temperatura y humedad.

En México se tienen instrumentados con equipos eléctricos tres edificios históricos: El Palacio Nacional, La Catedral y El Sagrario Metropolitano (Fig.4.37). En países como Italia, hay diversas estructuras antiguas que se han instrumentado, entre las que se encuentran: la Catedral de Sta. María del Fiore, en Florencia; la torre y la Catedral de Pavía; la Basílica de San Marcos y el campanario de la Iglesia de San Estefano en Venecia; la Catedral de Bitonto; la Torre de Pisa en Toscana; el templo de Rómulo en Roma; la Catedral de Orvieto y la Torre Aquila en Italia y la Casa de la Misericordia, en Aveiro.

En otros países también existen diversos edificios históricos que han sido objeto de monitoreo estructural, como el Castillo de San Marcos en St. Augustine, Florida, Estados Unidos; la catedral de Sta. María, en Letonia; la Iglesia de Gandria, en Ticino Canton, Suiza; la Pagoda Seok-Ga en Kyunj-Ju en el sur de Corea y la Catedral de la Anunciación, en Kremlin, Moscú, Rusia (Figs.4.38 a 4.40) por citar algunos.

4.6 Estructuras inteligentes.

En este tipo de estructuras se espera que: cada parte de éstas pueda detectar situaciones indeseables relacionadas con fuentes de excitación diversas como temperatura, sobrecargas o vibraciones; las diagnostique, identificando la naturaleza y extensión del problema; reporte y acumule información para aprender ante situaciones similares en lo futuro.

Para responder al entorno, una estructura inteligente debe estar dotada de sistemas de monitoreo en sus estados interno y externo, que no afecten su integridad, sus propiedades ni sus funciones, por lo que, particularmente para este tipo de estructuras, la fibra óptica puede ser el material ideal para el *sistema nervioso* de dichas estructuras.

5. CASO PRÁCTICO

Debido a los problemas de hundimientos diferenciales que presentan gran parte de las construcciones asentadas en la zona centro de la Ciudad de México, especialmente los edificios históricos han sufrido múltiples daños en sus estructuras, así como deformaciones, desplazamientos, inclinaciones y asentamientos; éstos últimos fueron agravándose durante el siglo XX, producto de la explotación desmedida de los mantos acuíferos para abastecer de agua potable a la población, y en ciertos casos han puesto en riesgo la integridad de dichas estructuras, por lo que en algunos de estos edificios han tenido que realizarse intervenciones en su cimentación y en el subsuelo sobre el cual están asentados.

Para estudiar el comportamiento de algunas de las principales estructuras afectadas por los asentamientos diferenciales, se han instalado sistemas de monitoreo automático. Un caso de particular interés lo constituye el sistema de monitoreo del Palacio Nacional, mismo que se describe en este capítulo, incluidos algunos de los primeros resultados obtenidos.

5.1 Breve descripción de la problemática que enfrenta el Palacio Nacional.

El Palacio Nacional, está asentado sobre un terreno en el que estuvieron situadas diversas construcciones; durante el Imperio Mexica las casas nuevas de Moctezuma Xocoyotzin y parte del Templo de Tezcatlipoca (Fig. 5.1); alrededor de 1540 Hernán Cortés construyó un conjunto de casas de estilo arquitectónico rudimentario, mismo espacio que posteriormente fuera destinado a la construcción

del primer Palacio Virreinal en la parte sur poniente del terreno y de allí fue extendiéndose la construcción hasta lo que ahora puede observarse.

Es posible que, desde el inicio de su construcción, se hayan presentado problemas derivados de los efectos de los hundimientos diferenciales a causa de la consolidación de las zonas más compresibles del terreno, así como a los diversos grados de pre-consolidación debido a la presencia de las estructuras prehispánicas mencionadas, que generaron la aparición de las llamadas zonas “duras”, las cuales, al descender a diferente velocidad, han afectado severamente la estructura del edificio, a consecuencia de los movimientos diferenciales que se han producido en su cimentación.

Otros factores que contribuyeron a incrementar la magnitud de los hundimientos diferenciales fueron la construcción de un colector de aguas semiprofundo, y de la línea 2 del metro.

El colector, de 3m de diámetro, está asentado a una profundidad de 15m y se localiza cerca de donde se asienta el torreón norte, con una trayectoria a lo largo de la calle de Moneda y en el entronque con la Plaza de la Constitución se cruza con la estructura del túnel de la línea 2 del metro, situación que, según un estudio de las condiciones hidráulicas del subsuelo (Ref.20), revela que ambas estructuras están funcionando como drenes, lo que ocasiona una depresión de las aguas freáticas de esa zona en particular.

Las imágenes de la Fig.5.2 muestran la deformación acumulada en las cuatro fachadas desde el inicio de su construcción, la cual es convexa en todos los casos y, en la esquina norponiente, el hundimiento diferencial excede 1.80m, por lo que ésta última fue recimentada mediante la instalación de pilotes de control con funda antifriccionante, colocados en la cimentación de los edificios que actualmente ocupa la Secretaría de Hacienda (Ref.20). Los pilotes forman parejas en un

arreglo conocido como mancuerna y están apoyados en la primera capa dura a una profundidad media comprendida entre los 36.3 y 38.3 metros; su localización en planta se aprecia en la Fig. 5.1, y los detalles típicos de este tipo de pilotes aparecen en la figura 5.3.

El seguimiento del hundimiento de la estructura actualmente se realiza a través de nivelaciones topográficas, además de un sistema de medición automático y mediciones manuales.

5.2 Descripción del sistema de monitoreo automático.

Un primer sistema de monitoreo automático para dar seguimiento al comportamiento estructural de la esquina nor-poniente del Palacio Nacional fue desarrollado por el Instituto de Modelos Estructurales, ISMES, de Bérgamo, Italia y donado en 1994 por el gobierno del mismo país. Su instalación en la estructura la realizó el mismo Instituto en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el que desde esa fecha, se ha hecho cargo de su mantenimiento y de la interpretación de los resultados.

En 2009 el Instituto de Ingeniería implementó un nuevo sistema de monitoreo automático, el cual abarca casi la totalidad de la parte más antigua del inmueble, con la finalidad de tener un conocimiento más amplio de la respuesta estructural del conjunto arquitectónico.

El nuevo sistema está constituido por una red de 53 inclinómetros, 30 extensómetros, estaciones de registro y una computadora central en donde se recaba toda la información. La distribución de los sensores que integran este sistema se presenta en la Fig.5.4.

Los inclinómetros están basados en la referencia gravitacional y son de tipo potenciómetro líquido o electrolítico, modelo Tuff-Tilt 420, cuyas principales características son: rango angular $\pm 0.5^\circ$, linealidad 1% de fondo de escala, Repetibilidad $< 0.0002^\circ$, frecuencia natural 3Hz, temperatura de operación y almacenamiento de -40°C a $+85^\circ\text{C}$. Éstos se encuentran fijados a una base especial de acero, la cual a su vez, está anclada en el extremo superior de columnas y muros (Fig. 5.5). Éstos se encuentran orientados hacia el norte, es decir, el cable de alimentación siempre sale hacia el norte, para asegurar que la convención de signos sea la correcta, de acuerdo a los ejes de referencia. Cada inclinómetro cuenta con un sensor de temperatura integrado a éste.

Los extensómetros instalados en el Palacio Nacional son potenciómetros o sensores de posición lineal Duncan 600 Series, entre cuyas características se tienen: carrera eléctrica activa = 1.00 pulgada nominal, linealidad = $\pm 0.70\%$, rango de resistencia = $1.0\text{K}\Omega$, rango de temperatura de operación = -55°C a $+125^\circ\text{C}$.

Éstos combinan una acción mecánica con una eléctrica: el potenciómetro, unido a una base fija mide el desplazamiento vertical que experimenta un cilindro sólido de acero cuando los arcos cambian la longitud de su claro (Fig.5.6).

Actualmente el Instituto de Ingeniería se encuentra elaborando un informe detallado sobre este sistema y los resultados obtenidos durante los últimos 2 años. En la sección 5.4 y de manera breve, se comentan algunos de los primeros resultados que dicho Instituto ha obtenido.

5.3 Descripción de las mediciones manuales.

Como parte del programa de monitoreo, se han implementado una serie de mediciones manuales en 46 índices colocados en las cuatro caras de trece

columnas del Patio Central (Fig.5.7 y 5.8), a las que se le ha prestado especial atención, debido a la abertura de las juntas horizontales entre hiladas de sillares, producto de la flexión de la estructura que se genera en esa zona (Fig. 5.9); las mediciones en estos puntos se realizan semanalmente.

Los asentamientos diferenciales de la cimentación de los edificios de la Secretaría de Hacienda, son medidos mediante un sistema de vasos comunicantes, denominados nivelómetros, localizados en la esquina nor-poniente del Palacio Nacional (Fig. 5.10), dentro de la galería de los pilotes de control, con una longitud total de 74m; 36.6m sobre la fachada poniente y 37.5m sobre la fachada norte. Este sistema forma parte de la primera etapa de instrumentación (Ref.20); sin embargo, la parte electrónica ha dejado de funcionar, por lo que el seguimiento de las mediciones que se realizan con éste, ahora se realizan de manera manual, en base a las lecturas del tirante de aceite, obtenidas de las reglas que se encuentran en el interior de los vasos (Fig.5.11 y 5.12).

El principio bajo el cual funcionan es el conocido en hidrostática como *vasos comunicantes*, y consta de una serie de vasos cilíndricos de cristal transparente interconectados entre sí a través de mangueras, cuyo fluido es aceite de silicón. Los vasos tienen 300 mm de altura y 25 mm de diámetro interior y están montados sobre un marco de acero inoxidable (Fig.5.13).

5.4 Análisis e interpretación de resultados

Los registros obtenidos con los nivelómetros en los últimos cuatro años en la esquina nor-poniente del edificio (Figs.5.14 a 5.18) indican la configuración de los hundimientos diferenciales que se han generado; asimismo se observa un movimiento muy uniforme en la fachada norte ya que los movimientos de la

sección localizada entre los nivelómetros 6 y 10 siguen una configuración muy similar (Figs.5.16 a 5.18).

El efecto de las acciones relacionadas con la operación de los pilotes de control, así como del mejoramiento al subsuelo, son marginales en los nivelómetros. Sin embargo puede apreciarse en los nivelómetros 1 y 2 (Fig.5.14), que durante el período de mejoramiento al subsuelo, en estos puntos se presenta elevación.

Por otra parte, se observa que los sismos ocurridos en diciembre de 2011, así como en marzo y abril de 2012 no modificaron la tendencia de movimiento general de la estructura de esta esquina.

Las nivelaciones topográficas realizadas entre diciembre de 2007 y abril de 2011 (Figs.5.19 a 5.21 y Tabla 5.1), muestran que la zona del Patio Central presenta un patrón complejo de deformaciones, lo cual produjo agrietamientos y sobre todo ocasionó la abertura de juntas horizontales entre hiladas de sillares, especialmente en la parte baja del fuste de las columnas, por lo que a trece de ellas se les instalaron índices para dar seguimiento a la abertura que se está produciendo en dichas juntas, y en tres de éstas se colocaron doce índices en cada una, para medir la variación de espesor de dos juntas horizontales consecutivas que se encuentran abiertas.

Los resultados obtenidos durante el período monitoreado muestran que las juntas de las columnas B12 y L2 son las más activas, presentándose en éstas los valores de cierre y abertura de mayor magnitud. En éstas se observa que las juntas de la columna B12, durante los trabajos de mantenimiento a los pilotes, se han estado abriendo (Fig.5.22), mientras que en la columna L2 dichas juntas mantienen su espesor y en ciertos casos, incluso, algunas de ellas se cierran (Fig.5.23).

La actividad de estas juntas sugiere que estas columnas están flexionándose a causa de los hundimientos diferenciales.

En las columnas B11 y B10 se observa un efecto de flexión principalmente hacia el oriente, ya que las juntas localizadas en la cara poniente se abren, mientras que las correspondientes a la cara oriente se cierran (Figs.5.24 y 5.25), lo cual es congruente con los registros automáticos de los inclinómetros 1 y 2 (Figs.5.26 y 5.27). En éstos se aprecia que la inclinación medida es marginal en ambos ejes; sin embargo, predomina la inclinación hacia el oriente.

La junta localizada en la cara poniente de la columna B5 se abre (Fig.5.28), y dado que sólo este lado está instrumentado, se requiere añadir puntos de referencia adicionales para tener una visión más amplia acerca del comportamiento de la columna. Al comparar esta gráfica con la correspondiente al inclinómetro 03 cuya ubicación coincide con la misma columna, se aprecia que la inclinación de ésta es hacia el sur-oriente (Fig.5.29), lo cual es congruente con el resultado obtenido de las mediciones de los índices en este punto.

En la columna B4, se observa que el espesor de la junta en los lados oriente y poniente se abre siguiendo el mismo patrón, lo que sugiere que la sección de la columna en la zona de la junta, se mantiene plana.

El análisis de los registros de los índices indica que la columna B4 está oscilando en la dirección perpendicular al plano que contiene la arquería ubicada en el lado norte del patio central; además, se aprecia que la columna se flexiona en la dirección norte-sur, ya que tanto en la cara oriente como en la poniente se abre la junta (Fig.5.30).

En el caso de la columna B3 se aprecia un efecto franco de flexión hacia el oriente, así como oscilación de la columna en la dirección norte-sur (Fig.5.31).

Los índices en las caras poniente, sur y oriente de la columna B2 se abren, en tanto en la cara norte de la junta horizontal se cierra (Fig.5.32), lo que implica que la columna se flexiona hacia el norte.

La variación del espesor de la junta horizontal de la columna L12 indica que ésta oscila en la dirección oriente-poniente, mientras que en dirección norte-sur el movimiento es del mismo tipo pero de menor magnitud. La variación de mayor amplitud del espesor de la junta se observa en su lado oriente (Figs.5.33).

La columna L11 muestra flexión hacia el oriente, con el cierre de la junta en esa cara, y apertura en el lado poniente (Fig.5.34). La junta de la columna L10 abre del lado oriente y cierra del poniente (Fig.5.35), lo que implica flexión en esta última dirección. No obstante, se considera necesario incrementar los índices en la cara poniente de esta columna, a fin de conocer mejor el comportamiento de las tres juntas consecutivas que se presentan en ésta.

La gráfica correspondiente a la junta en la columna L4, indica que no se incrementa la abertura de la junta, por lo que la columna sólo oscila en dirección norte-sur, y que afortunadamente su inclinación no se incrementa (Fig.5.36).

En la columna L3 se observa un ligero efecto de flexión hacia el oriente, así como oscilación de la misma en dirección perpendicular (Fig.5.37).

Del análisis de los registros se observa que todas las columnas se flexionan en forma biaxial, por lo que será necesario continuar dando seguimiento para identificar de manera oportuna algún comportamiento inadecuado de las mismas. Asimismo, se determinó que se requiere añadir algunos puntos complementarios de monitoreo para tener una mayor visión de los efectos de flexión que se presentan en las columnas centrales instrumentadas.

Con relación al monitoreo automático, puede decirse que durante el período de observación que abarca del 01 de septiembre de 2010 al 30 de abril de 2012 las columnas del patio central se han inclinado principalmente hacia el norte; además un grupo de ellas se inclina hacia el oriente y un número reducido hacia el poniente (Fig.5.38).

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La planeación, diseño, e implementación de sistemas de monitoreo de obras de ingeniería civil, son actividades en las que interviene un equipo multidisciplinario.

El monitoreo estructural constituye una valiosa herramienta para el ingeniero, ya que le permite conocer el comportamiento estructural de manera detallada y continua en aquellas etapas en las que se tiene dificultad para comprenderlo o cuando se requiere comprobar dicho comportamiento ante diversas solicitaciones, además permite verificar que los modelos matemáticos empleados en el diseño de las estructuras sean representativos. Asimismo, permite evaluar y mejorar los códigos y reglamentos para la reducción de riesgos y costos en la construcción, y para determinar las medidas de intervención más convenientes en el caso de aquellas estructuras que deban ser rehabilitadas.

Entre los países con mayor experiencia en el monitoreo de estructuras destacan: Estados Unidos, Italia, Japón y China. En México esta actividad se presenta como un nicho de oportunidades tecnológicas y científicas, ya que su aplicación aún se limita a un reducido número de construcciones como edificios, presas, puentes, la central nuclear de Laguna Verde y, recientemente, obras de gran envergadura como el Túnel Emisor Oriente, el puente Baluarte y monumentos como la Catedral Metropolitana de la ciudad de México y el Palacio Nacional, por lo que se espera que este trabajo sirva de base a futuros ingenieros para despertar su interés por ampliar sus conocimientos sobre este tema, e incrementar su aplicación en las obras civiles para conocer de mejor manera su comportamiento estructural, y prevenir daños tanto en la infraestructura como en las personas que las utilizan o que las construyen.

El avance de la tecnología de la fibra óptica en las comunicaciones, ha llevado su aplicación al desarrollo de sensores para los sistemas de monitoreo automático con muy buenos resultados, dadas las múltiples ventajas que ésta tiene con relación a los sensores convencionales. Entre éstas, las de mayor uso en la instrumentación de obras civiles son los sensores de fibra óptica basados en redes de Bragg. Sin embargo, configuraciones como los interferómetros de Fabry-Perot y Sagnac, entre otros, también pueden aplicarse en la auscultación y monitoreo estructural. Su costo, sin embargo, aún mantiene a esta tecnología fuera del alcance en muchas aplicaciones debido a que transductores convencionales como las galgas extensométricas y los potenciómetros, siguen siendo una muy buena opción por su menor costo y su mayor disponibilidad en el mercado.

Si bien es cierto que la tecnología de fibra óptica aplicada a los programas de monitoreo estructural presenta ventajas respecto a los sistemas tradicionales, también es necesario mencionar que no se cuenta con especialistas en este campo, principalmente en América Latina, por lo que se prevé que en el futuro próximo se incremente la demanda de especialistas en el manejo de fibra óptica aplicada al monitoreo estructural.

Un buen sistema de monitoreo debe basarse en un análisis detallado de los parámetros que se desean evaluar, de las condiciones ambientales en las que se encuentra la obra, así como el período durante el cual se dará seguimiento al comportamiento de la estructura. Para ello, será necesario identificar la instrumentación más apropiada a las necesidades de cada obra, manteniendo una adecuada relación costo-beneficio, esto incluye conceptos relacionados con el mantenimiento, operación e interpretación de datos.

Los resultados obtenidos a través del programa de monitoreo permiten constatar que en la estructura del Palacio Nacional se generan mecanismos de deformación

estructural muy complejos a causa de los hundimientos diferenciales que se producen en su base. Durante el período en el que se ha dado seguimiento a la estructura, las deformaciones son de magnitud reducida, lo que dificulta definir el mecanismo bajo el cual ésta se deforma, por lo que se considera necesario continuar con este programa para lograr identificar dichos mecanismos en la medida en que progresen los hundimientos diferenciales.

Por último, puede decirse que se prevé que en los próximos años, la ingeniería estructural dependerá más de estos sistemas, debido a la magnitud y complejidad de las grandes obras de infraestructura que requiere nuestro país, por lo que es deseable que las nuevas generaciones se familiaricen con estos temas, debido a que en México, si bien es marginal el avance en este tema, hay que reconocer que ha habido importantes esfuerzos por aplicar los sistemas de monitoreo a las obras de mayor envergadura que actualmente se construyen, por consiguiente se necesita impulsar en nuestro país el desarrollo científico y tecnológico de ésta área.

RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ingeniería y a mis maestros por los conocimientos adquiridos.

Al Instituto de Ingeniería por los recursos económicos y las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

A mis compañeras(os) Yasmine Baranda Laguna y Navani Cadena Martínez, por su maravillosa actitud y valiosa colaboración en la elaboración de la mayoría de las imágenes presentadas, Xenia Miranda Martínez, Yusef Zavalza Cabello, José Luis Palomino Aguado, Luis Ibáñez, por sus comentarios, apoyo y colaboración en diversas actividades relativas al monitoreo de monumentos históricos.

Al Sr. José Rosales Enríquez, por su colaboración en todas aquellas actividades relacionadas con la realización del presente trabajo.

Al Dr. en I. Fernando Peña Mondragón, al M. en I. Miguel Ángel Rodríguez Vega y a los Ingenieros Miguel Ángel Mendoza García y Gerardo Rodríguez Gutiérrez por sus valiosos comentarios, observaciones e información proporcionada.

Muy especialmente al Ing. Abraham Roberto Sánchez Ramírez, por su paciencia, confianza, su siempre amable orientación, e invaluable comentarios que llevaron a la conclusión de esta tesis.

A N E X O

GLOSARIO DE TÉRMINOS EMPLEADOS EN LOS TRANSDUCTORES

Los términos descritos son sólo algunos de los muchos que están relacionados directamente con los transductores, o con las funciones y equipos que le son propios (Ref.7).

Aceleración: Grado de variación de la velocidad en función del tiempo.

Amplitud: Medida de la desviación de un fenómeno con relación a su posición media. Cuando el término se aplica a condiciones vibratorias corresponde generalmente a la magnitud de cresta de la aceleración aplicada.

Atenuación: Reducción en amplitud de una variable o señal dadas.

Calibración: Valores conocidos de la variable medida que se aplican mientras se observa o se registra la señal de salida del transductor. Los datos de calibración proporcionan información correspondiente a la condición de no linealidad, falta de linealidad combinada con histéresis y/o las características de histéresis del transductor.

Capacidad eléctrica o capacitancia (C): Razón entre la carga en uno de los conductores de un condensador (habiendo una

carga igual u opuesta en el otro conductor), a la diferencia de potencial entre los conductores

Compensación: Provisión de un aparato suplementario o de materiales especiales para contrarrestar fuentes conocidas de error.

Condiciones estáticas: Ambiente de un instrumento o sistema que se parece estrechamente a condiciones de laboratorio.

Curva de calibración: Representación de los datos obtenidos durante la calibración.

Deriva: Variación en la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales.

Efecto de temperatura: Diferencia entre la señal de salida de un transductor a temperatura ambiente y la salida del mismo transductor a cualquier otra

temperatura especificada. Esto puede medirse a cualquier otro valor de la variable dentro del intervalo de medida del instrumento. Está especificado generalmente en porcentaje de la señal de salida de la escala total por 100 grados de variación, o para cualquier otro valor discreto de temperaturas.

Elemento sensible primario: Elemento del transductor que es desplazado directamente por la variable aplicada.

Estabilidad: Capacidad de un transductor para retener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificados.

Exactitud: Referida a un transductor es la concordancia entre el valor medio y el valor real de la variable medida. Se suele expresar en porcentaje del valor de fondo escala.

Excitación: Tensión eléctrica exterior y/o corriente aplicadas a un

transformador para su funcionamiento adecuado.

Fiabilidad: Estimación de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.

Frecuencia: Número de ciclos por unidad de tiempo. Es el recíproco del período.

Frecuencia natural: Cuando un elemento sensor de un transductor se coloca en oscilación libre, la frecuencia de esta oscilación es la frecuencia natural.

Frecuencia de resonancia: Frecuencia de la medida para la cual el transductor responde con la amplitud de salida máxima.

G: Los acelerómetros miden la aceleración en unidades “g”. Un “g” se define como la fuerza gravitacional de la Tierra

aplicada sobre un objeto o una persona.

Histéresis: Diferencia máxima en la señal de salida en cualquier valor de la variable medida, dentro del campo especificado cuando se llega a ese valor, primero aumentando la variable y después disminuyéndola.

Impedancia eléctrica: Oposición total que presenta un circuito a una corriente alterna (Ref. 21).

Impedancia de entrada: Impedancia que presenta el transductor a la fuente de excitación. Se mide entre los terminales de excitación del transductor, sin estimulación y con los terminales de salida en circuito abierto.

Impedancia de salida: Impedancia que presenta el transductor al circuito de acondicionamiento, medida en ohms. Se mide entre los terminales de salida de aquél con los terminales de entrada en circuito abierto. Es importante

para determinar las necesidades de conexión hacia un equipo de acondicionamiento o instrumento de lectura.

Linealidad: Aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada.

Multiplexado: Transmisión simultánea de dos o más señales a través de un canal único. Los dos métodos básicos de multiplexado implican la separación de señales por división de tiempo o de la frecuencia.

Período fundamental: Es el primer período, o período de oscilación más amplio de una estructura.

Precisión: Relación entre el error y la señal de salida de la escala total, o bien la relación entre el error y la señal de salida expresada en tanto por ciento. Referida a un transductor representa la dispersión de valores de la salida obtenibles debidos a todos los efectos

parásitos, expresada en tanto por ciento del valor de la medida en cada punto de la escala.

Rango: se especifica como los límites superior e inferior de los valores de la magnitud a medir. Esta puede ser unidireccional (por ejemplo de 0 a 2.5cm), o bidireccional, simétrico ($\pm 45^\circ$), o asimétrico (de -2 a +10g), o desplazado (70 a 120 rads/s).

Rango de temperaturas operativo: es el rango de temperaturas ambientales, dado por sus extremos superior e inferior, dentro del cual el transductor opera dentro del rango de especificaciones definido.

Reactancia: Impedancia ofrecida por un circuito eléctrico en el que existe inducción o capacidad, sin resistencia (Ref. 6).

Reactancia capacitiva: Reactancia debida a la capacidad de un condensador o circuito.

Reactancia inductiva: Reactancia debida a la inductancia de una bobina o un circuito

Reluctancia magnética: Medida de la oposición presentada al flujo magnético en un circuito magnético, análoga a la resistencia en un circuito eléctrico.

Repetibilidad: Capacidad de un transductor para reproducir lecturas de la señal de salida cuando se aplica repetidamente el mismo valor medido, bajo las mismas condiciones y en el mismo sentido.

Resolución: Magnitud de los cambios en escalón de la señal de salida (expresado en tanto por ciento de la salida de toda la escala), al ir variando continuamente la medida en todo el campo.

Respuesta frecuencial o respuesta dinámica: Variación con la frecuencia de la relación de amplitudes señal de salida/variable medida para una

medida de variación senoidal aplicada a un instrumento dentro de un campo establecido de frecuencias de la variable medida. Se especifica usualmente en Hz.

Ruido: Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseadas que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.

Señal: Salida, o información que emana de un instrumento. Información representativa de un valor cuantificado.

Señal de salida: Cantidad eléctrica producida por un transductor que es una función de la variable medida.

Señal de salida analógica: Señal de salida del transductor que es una función continua de la variable medida excepto si es modificada por la resolución del transductor.

Señal de salida digital: Señal de salida del transductor que

representa la magnitud de la variable medida en forma de una serie de cantidades discretas codificadas en un sistema de notación.

Sensibilidad: Relación de la variación entre la señal de salida del transductor y la variación en el valor de la variable medida. Se expresa en % del alcance de la medida, por ej. $\pm 0.05\%$ de $200^{\circ}\text{C} = \pm 0.1^{\circ}\text{C}$

Servo transductor: Igual a transductor de equilibrio de fuerzas.

Sobre-rango: Magnitud máxima de la medida con que se puede aplicar el transductor y ocasionarle un cambio de prestaciones dentro de unas tolerancias especificadas.

Transductor de equilibrio de fuerzas: También conocido como servo transductor. Transductor en el que la señal de salida del elemento sensible es amplificada y realimentada a un componente que origina el

retorno del elemento de suma de fuerzas a su posición de equilibrio. La magnitud de la señal realimentada determina la señal de salida del instrumento.

Transductor diferencial: Aquel cuya señal de salida es proporcional a la diferencia de dos magnitudes de entrada, como dos presiones, dos tensiones, dos desplazamientos, etc. Presenta la ventaja de que aunque el principio de

transducción no sea lineal en función de la variable de medida, la salida total del transductor sí lo será para la diferencia.

Umbral de sensibilidad: Cambio más pequeño en la variable que originará un cambio detectable en la señal de salida.

Wii-Fi: Mecanismo de conexión inalámbrica de dispositivos electrónicos.

REFERENCIAS

- 1) Norton, Harry N. “*Sensores y Analizadores*”. Colección electrónica informática. GC. Versión castellana de José A. Rubio Sola. Barcelona, España, 1984.
- 2) B. Glisic, D. Inaudi & S. Vurpillot. “*Piles monitoring using topologies of long-gage fiber optic sensors*” en Zhishen Wu & Masato Abe. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*: Proceedings of SHMII 2003, Nov. 13-15, 2003, Tokyo, Japan. Vol. 1, págs. 291-298.
- 3) M. Enckell-EI Jemli, R. Karoumi & J. Wiberg. “*SHM for an optimized prestressed concrete bridge*” en Zhishen Wu & Masato Abe. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*: Proceedings of SHMII 2003, Nov. 13-15, 2003, Tokyo, Japan. Vol. 2, págs. 993-996.
- 4) F. Casciati. “*An overview of structural health monitoring expertise within the European Union*” en Zhishen Wu & Masato Abe. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*: Proceedings of SHMII 2003, Nov. 13-15, 2003, Tokyo, Japan. Vol. 1, págs. 31-37.
- 5) Badillo Ceh Eduardo, Mendoza García Miguel Ángel. “*Instrumento Virtual para la Medición de Vibración Ambiental*”. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista, UNAM, México, 1997.
- 6) Real Academia Española. “*Diccionario de la Lengua Española*”. 22^a. Ed. Madrid, Espasa Calpe, 2001.
- 7) Mompin Poblet, José. “*Transductores y Medidores Electrónicos*”. Serie Mundo Electrónico. Barcelona: Marcombo: México: Boixareu, 1983.
- 8) Pallás Areny Ramón. “*Sensores y acondicionadores de señal*”. Alfaomega Grupo Editor, 2001. México, D. F.
- 9) Chavero Ramírez Víctor Hugo. “*Instrumentación en cimentaciones*”. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. Sta. Cruz Acatlán, Edo. De México. Junio, 2000.

- 10) Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T. S. Yu et. Al., *“Fiber Optic Sensors”*, 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, c2008.
- 11) Arenas, Gustavo F., Ing. *“Desarrollo de sensores de fibra óptica: aplicación de un interferómetro Fizeau al estudio de polímeros”*. Tesis para optar por el grado de Doctor Mención Electrónica. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina, 2009 (ver Ref.15 Internet).
- 12) Applied Geomechanics. *“Integrated Monitoring solutions. Product Catalog, 2010 (ver Ref.5 Internet).*
- 13) C. Fuggini *“Using Satellites Systems for Structural Health Monitoring: Accuracy and Reliability”*. Asian Pacific Summer School on Smart Structures Technology, July 3-25, 2009. University of Illinois.
- 14) Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). *“Accidente nuclear de Fukushima Daiichi”*. Descripción del evento” (ver Ref.4 Internet).
- 15) CENAPRED *“Manual del Participante: Introducción a la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde”*. México, 2009.
- 16) Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM. *“Comportamiento de presas construidas en México”*. Contribución al XII Congreso Internacional de Grandes Presas. México, 1976.
- 17) H. M. Koh & J. F. Choo. *“Recent application and development of structural health monitoring systems and intelligent structures in Korea”* en Zhishen Wu & Masato Abe. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*: Proceedings of SHMII 2003, Nov. 13-15, 2003, Tokyo, Japan. Vol. 1, págs. 99-111.
- 18) Bazán Perkins, Sergio, Dr. En Ing. *“Estudios Geológicos, Geofísicos y Sondeos Exploratorios”* en Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, AMITOS, *Curso de Túneles y Obras Subterráneas*, México, Octubre 27, 2011.

- 19) Schmitter M. del Campo, Juan J. *“Instrumentación y Mediciones de Comportamiento”* en Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, AMITOS, “Curso de Túneles y Obras Subterráneas”, México, Octubre 27, 2011.
- 20) Terrones Mares, Juan Carlos. “Algunos aspectos acerca de los hundimientos diferenciales en el Palacio Nacional”. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. San Juan de Aragón, México, 2001.
- 21) Sybil p., Parker. “Diccionario McGraw-Hill de Ingeniería Eléctrica y Electrónica”. Ed. In chief, 1990.
- 22) Hecht, Jeff. “Understanding fiber Optics”. Carmel, Indianapolis: H. w. sams, c 1987.
- 23) Choquet, Pierre, Simmonds, Tony. “Instrumentación geotécnica para obras civiles: Asentamientos”. RST Instruments Ltd. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Acapulco, 10 de noviembre de 2010.
- 24) “Tecnología y Ciencias del Agua”, Vol.II núm.3, julio-septiembre, 2011.

REFERENCIAS DE INTERNET

1. <http://destec-corp.com/download/12/>
 2. www.sensing.es
 3. <http://www.roctest-group.com/node/1606>
 4. <http://www.inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/60%20Accidente.pdf>
 5. <http://www.carboceramics.com/attachments/files/83/2010%20AGI%20catalog.pdf>
 6. http://fluidos.eia.edu.co/presas/tipos_presa/marcos/presa%20de%20arco/m_Malpasset%C2%AD_arco.htm
-

7. <http://laconoscenzarendeliberiblog.wordpress.com/category/politica/politica-estera/>
8. <http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/401496.html>
9. [BBCMUNDO.com, Agosto 04, 2007.](http://www.bbcmundo.com)
10. <http://www.blogodisea.com/2011/derrumbe-puente-tacoma-narrows-1940/ciencia/>
11. <http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo/doc/HK%20NotableTunnel%20Cat.pdf>
12. es.wikipedia.org
13. <http://www.jotdown.es/2012/06/vajont-el-titanic-de-las-presas/>
14. http://www.tml.jp/e/product/strain_gauge/bridge_list.html
15. <http://www3.fi.mdp.edu.ar>

T A B L A S

Tabla 3.1 Características de diversos acelerómetros.

PPIO. DE FUNC.	CARACTERÍSTICAS
Piezoeléctricos	Mayor rango (100 000g p/algunos acelerómetros de impacto) Mayor respuesta frecuencial, sensibilidad relativamente baja. No son utilizables para aceleraciones en régimen estacionario o de baja variabilidad
Galgas extensométricas semiconductoras (piezorresistivos)	Respuesta frecuencia menor (hasta algunos kHz). No responden a aceleraciones en régimen estacionario.
Potenciométricos	Son los de menor respuesta frecuencial (de 0 a 15 o 25 Hz), o hasta 60Hz para rangos altos
Servoacelerómetros	Pueden usarse en rangos bajos (del orden de 1g)
Por reluctancia	Son adecuados para aplicaciones en ambientes con alta radiación nuclear. Pueden operar a temperaturas de hasta 650°C.

Tabla 4.1 Simbología propuesta

SIMBOLO	SENSOR
	RTD
	ACELERÓMETRO 1-D
	ACELERÓMETRO 2-D
	ACELERÓMETRO 3-D
	TERMÓMETRO
	TERMÓMETRO ELÉCTRICO EN EL CONCRETO
	TERMÓMETRO ELÉCTRICO EN EL AIRE
	TERMÓMETRO ELÉCTRICO EN EL AGUA
	ANEMÓMETRO
	INCLINÓMETRO
	ACELERÓGRAFO
	LVDT
	DEFORMÍMETRO ESTÁTICO
	DEFORMÍMETRO DINÁMICO
	DEFORMÍMETRO DE CUERDA VIBRANTE
	EXTENSÓMETRO
	RADIÓMETRO
	ESTACIÓN DE MONITOREO
	S.A.D. ESTÁTICO
	S.A.D. DINÁMICO
	PIEZÓMETRO
	MEDIDOR DE JUNTAS
	MEDIDOR DE GIRETAS
	MEDIDOR DE ASENTAMIENTOS
	MEDIDOR DE CONVERGENCIAS
	GPS
	SISMÓMETRO
	CELDA DE CARGA
	NIVELÓMETRO
	DILATÓMETRO
	PÉNDULO DIRECTO CON TELECOORDENÓMETRO
	PÉNDULO INVERTIDO CON TELECOORDENÓMETRO
	SENSOR DE DESPLAZAMIENTO LÁSER
	POTENCIÓMETRO
	BANCO DE NIVEL
	ESTACIÓN DE COORDENOMETRO
	ESTACIÓN DE CLINÓMETRO
	MIRA MÓVIL DE COLIMACIÓN
	CALIBRADOR EXTENSOMÉTRICO

Tabla 5.1 Nivelación topográfica realizada por la empresa TGC Ingeniería en el perímetro de las arcadas del Patio Central.

Arcada	Puntos de nivelación topográfica	Distancia a eje de ref. (m)	1a lectura 30-dic-07 (msnm)	5a lectura 09-abr-11 (msnm)
PONIENTE	54	0.00	2229.6825	2229.524
	3	5.00	2229.6757	2229.519
	4	13.60	2229.6723	2229.52
	7	24.00	2229.6313	2229.481
	9	32.00	2229.6086	2229.46
	11	40.50	2229.6351	2229.488
	12	46.00	2229.6208	2229.476
NORTE	12	0.00	2229.6208	2229.476
	30	0.80	2229.6783	2229.528
	31	14.30	2229.818	2229.67
	32	19.30	2230.0998	2229.952
	33	28.30	2230.2649	2230.12
	34	37.30	2230.2642	2230.117
	35	46.80	2229.9517	2229.8
ORIENTE	45	0.00	2229.9058	2229.747
	43	9.00	2229.8425	2229.684
	41	18.00	2229.9111	2229.755
	38	27.50	2229.9882	2229.836
	36	36.00	2230.0532	2229.904
	35	45.40	2229.9517	2229.8
SUR	54	0.80	2229.6825	2229.524
	52	14.40	2229.8356	2229.678
	49	23.80	2229.887	2229.729
	47	36.80	2229.9618	2229.804
	45	46.30	2229.9058	2229.747

FIGURAS

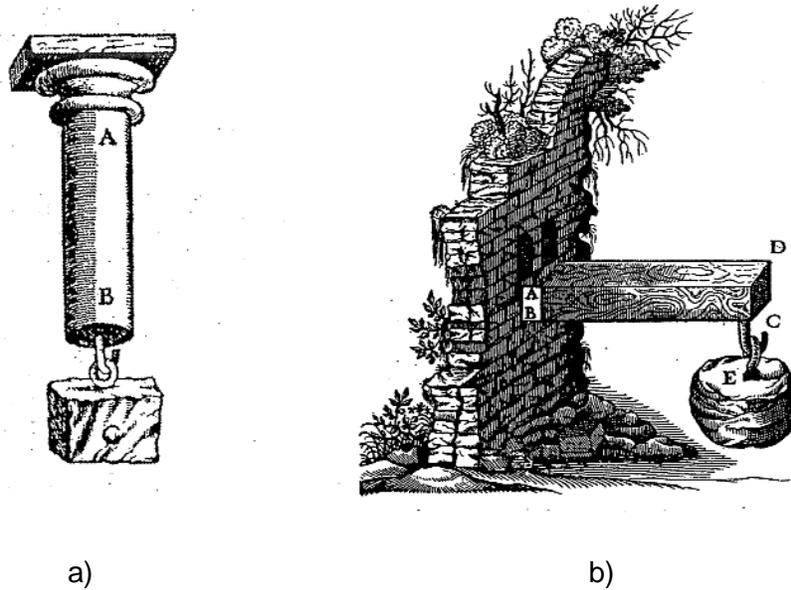


Fig. 2.1 Galileo Galilei: a) dibujo de la prueba a tensión; b) viga en voladizo (imagen tomada del libro *History of strength of materials*. Timoshenko, Stephen P., McGraw Hill Book Company Inc., 1953).

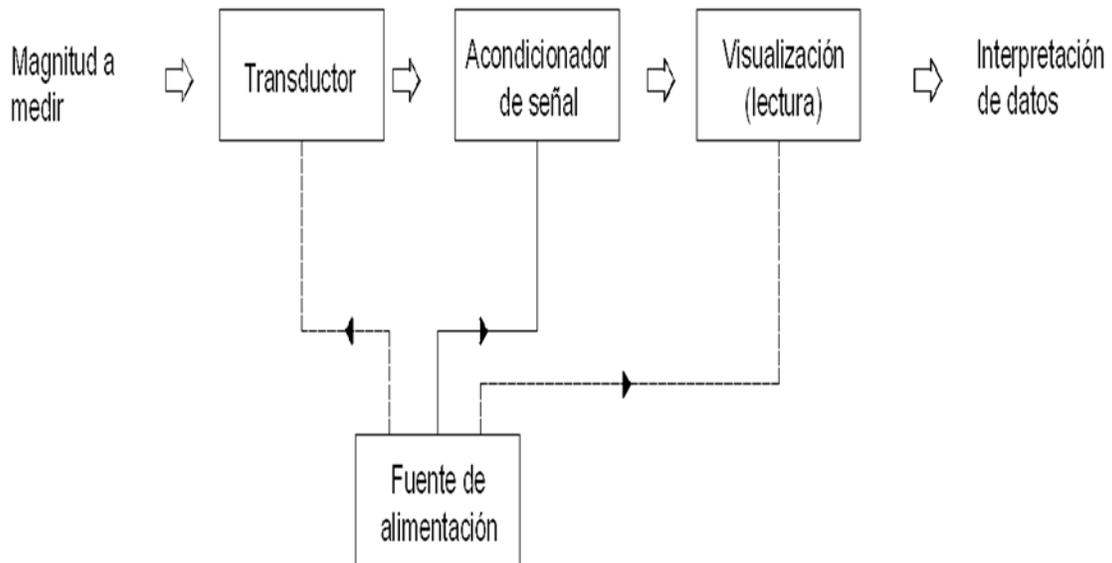


Fig. 3.1 Esquema de funcionamiento de un sistema electrónico básico de medida (imagen tomada de la Ref.1).

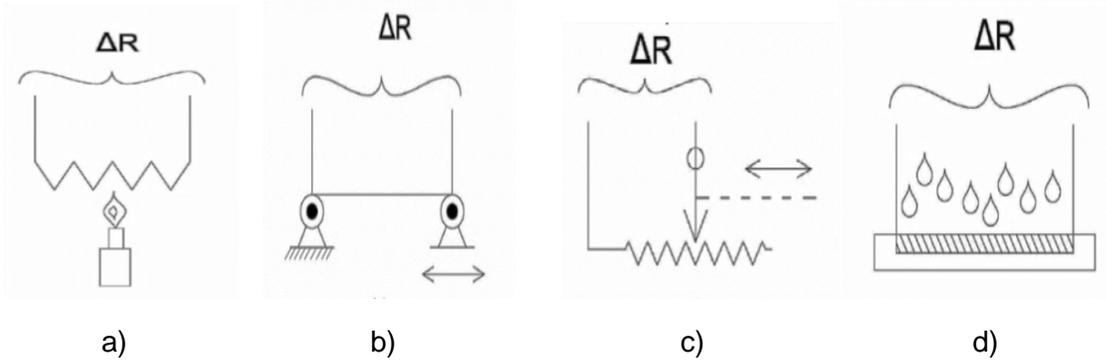


Fig. 3.2 Transducción resistiva. ΔR indica un cambio en la resistencia debida a: a) variación de temperatura; b) aplicación de esfuerzos mecánicos; c) movimientos en el brazo de la escobilla de un reóstato (potenciométrico), d) humidificación o des-humidificación de ciertas sales electrolíticas (imagen tomada de la Ref. 1).

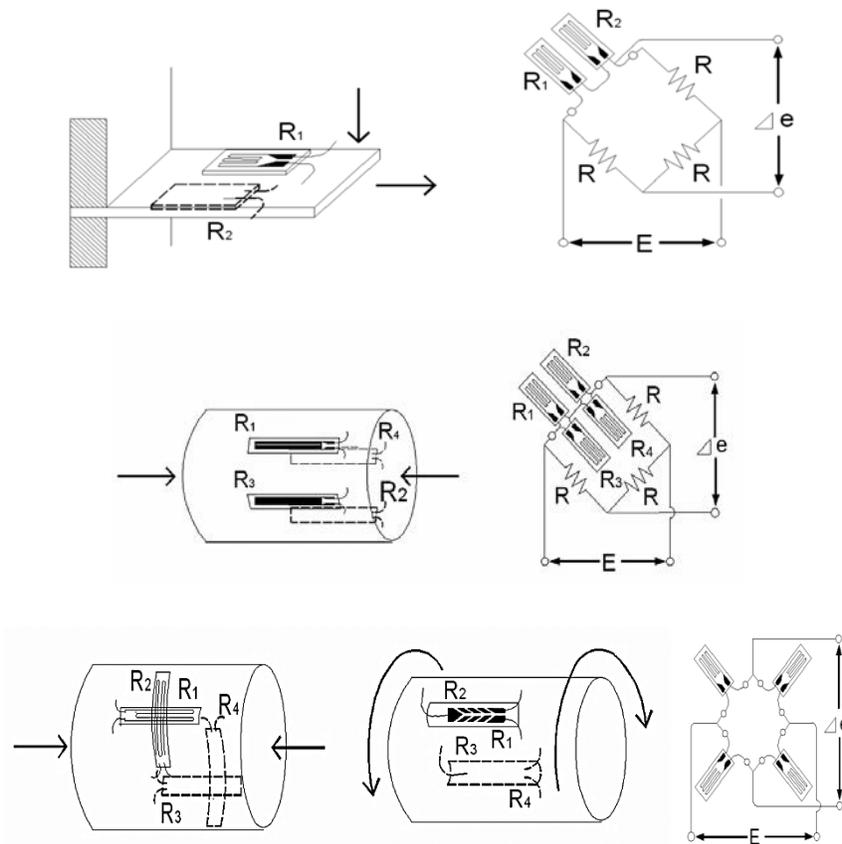


Fig.3.3 Algunas aplicaciones de galgas extensométricas para la medida de magnitudes mecánicas: flexión, compresión y torsión (imágenes tomadas de la Ref.14 Internet).

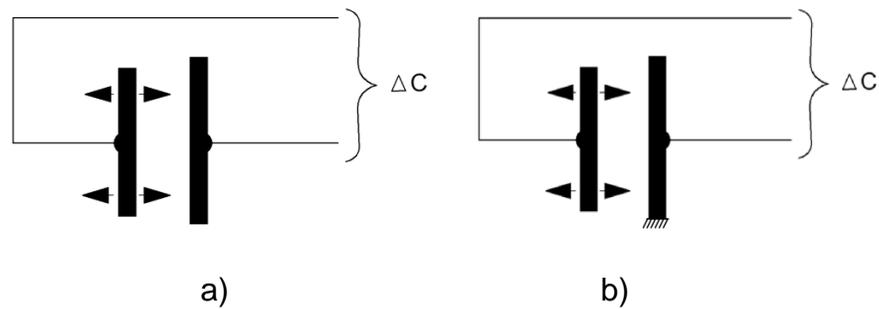


Fig. 3.4 Transducción capacitiva: ΔC indica la variación de la capacidad (o capacitancia): a) en armaduras móviles con dieléctrico constante; b) en armaduras fijas con dieléctrico variable (imagen tomada de la Ref. 1).

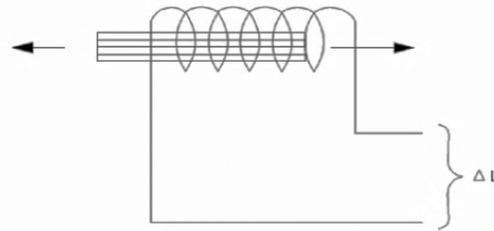


Fig. 3.5 Transducción inductiva. ΔL indica un cambio en la auto inductancia(imagen tomada de la Ref. 1).

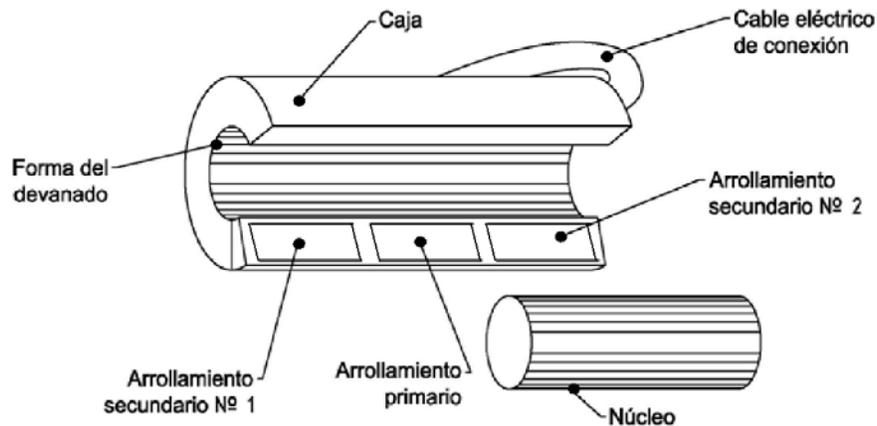


Fig. 3.6 Componentes de un transformador lineal variable diferencial o LVDT (imagen tomada de la Ref. 1).

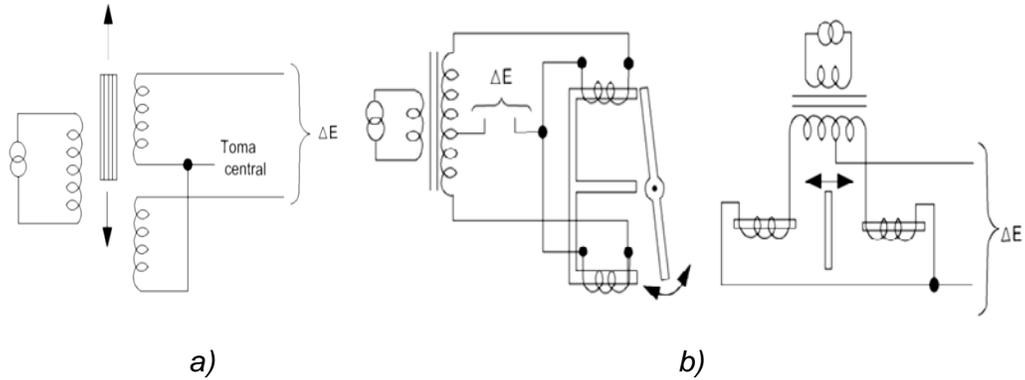


Fig. 3.7 Transducción reactiva. ΔE indica un cambio en la tensión c. a.: a) transformador diferencial; b) puentes de inductancias (imágenes tomadas de la Ref. 1).

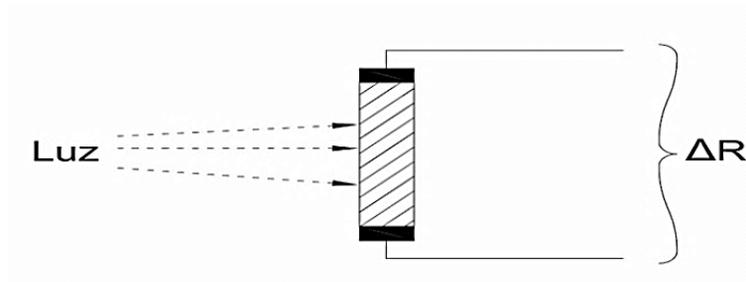


Fig. 3.8 Elementos de transducción fotoconductor. ΔR indica la variación de la resistencia de un material semiconductor (imagen tomada de la Ref. 1).

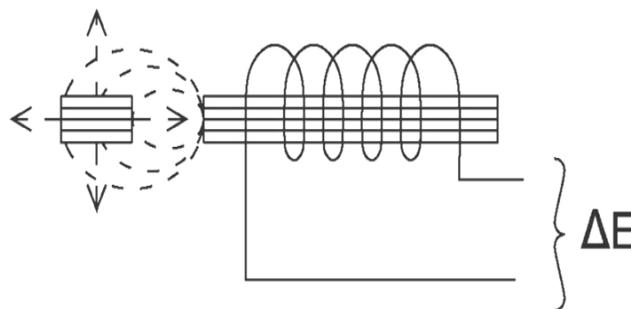


Fig. 3.9 Principio de transducción electromagnética. ΔE indica una fuerza electromotriz inducida en un conductor (imagen tomada de la Ref. 1).

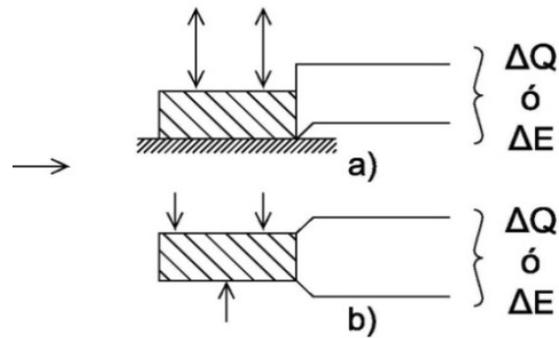


Fig. 3.10 Principio de transducción piezoeléctrica: a) compresión-tensión, b) flexión. ΔQ o ΔE indican un cambio en la carga electrostática y/o tensión, respectivamente (imagen tomada de la Ref.1).



Fig. 3.11 Principio de transducción termoeléctrica. (Efecto Seebeck). ΔE indica un cambio en la fuerza electromotriz debido a un cambio de temperatura, $T1 \neq T2$ (imagen tomada de la Ref.1).

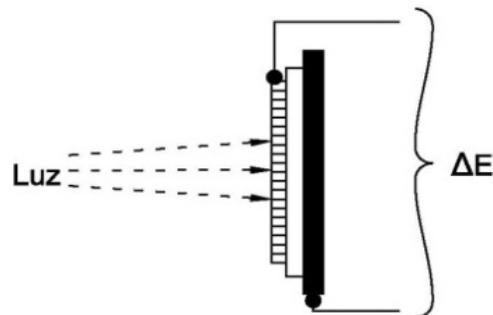


Fig. 3.12 Principio de transducción Fotovoltaica. ΔE indica un cambio en la tensión (imagen tomada de la Ref.1).

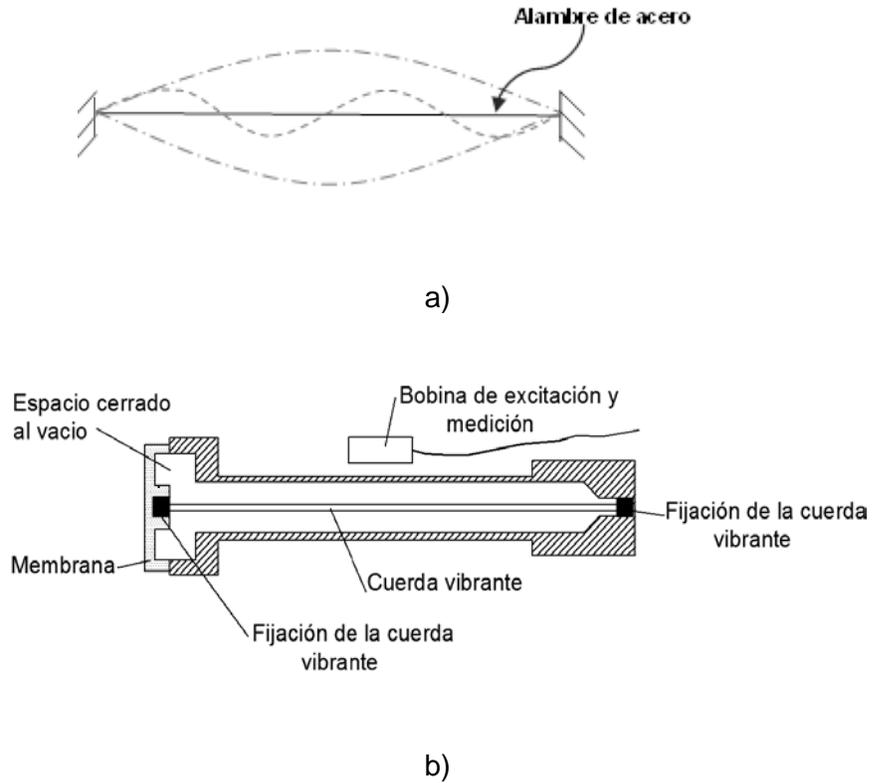


Fig. 3.13 a) Configuración deformada de un alambre vibrando; b) Componentes de un sensor de cuerda vibrante.

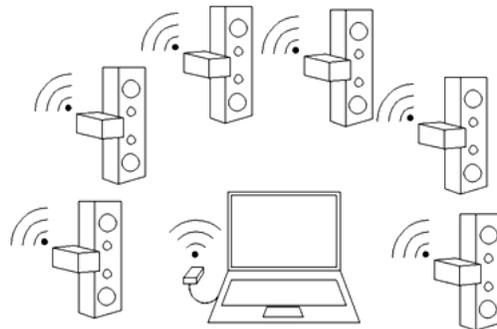


Fig. 3.14 Esquema de funcionamiento de un sistema compuesto por celdas de carga con tecnología inalámbrica (imagen adaptada de internet).



Fig. 3.15 Arriba de izquierda a derecha: acelerómetro triaxial, inclinómetro NEMS, comparativo del tamaño de sensores MEMS y NEMS contra un cerillo y un azúcar, respectivamente; Abajo aplicaciones en electrónica e industria automotriz (imágenes tomadas de internet).

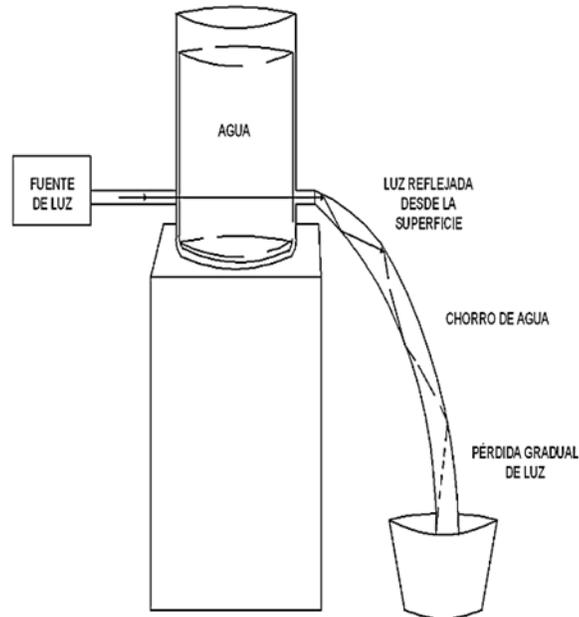


Fig. 3.16 Principio de reflexión interna total (imagen adaptada de la Ref.22).

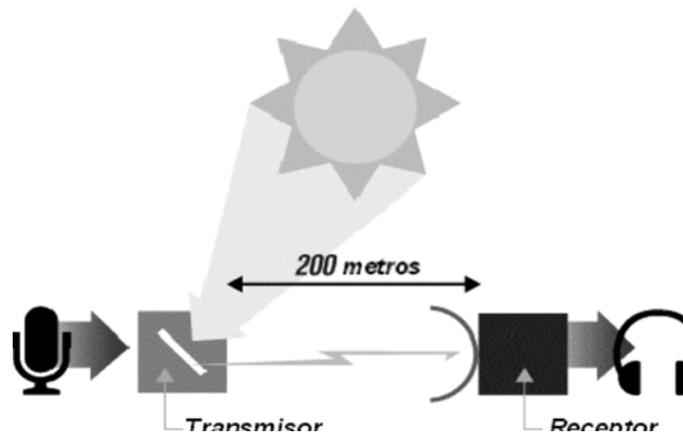


Fig. 3.17 Fotófono de Graham Bell (imagen tomada de internet).

Aparato para iluminación de residencias u otras estructuras

Patentado en Septiembre 20, 1881
Inventor William Wheeler

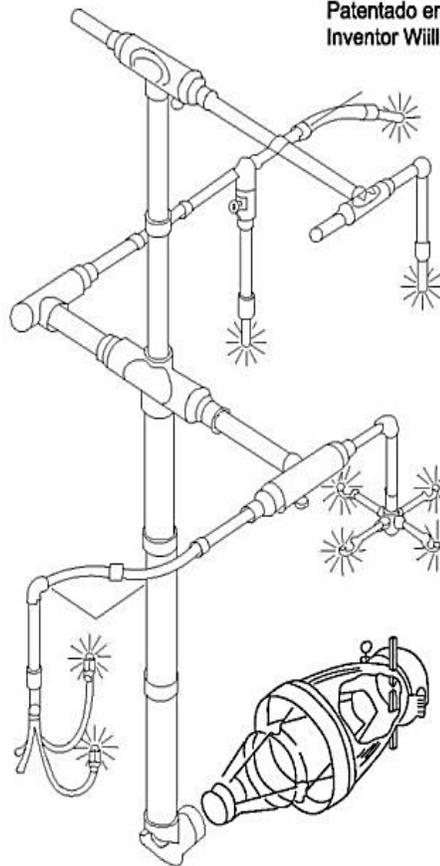


Fig. 3.18 Tuberías de luz, William Wheeler (imagen adaptada de la Ref.22).

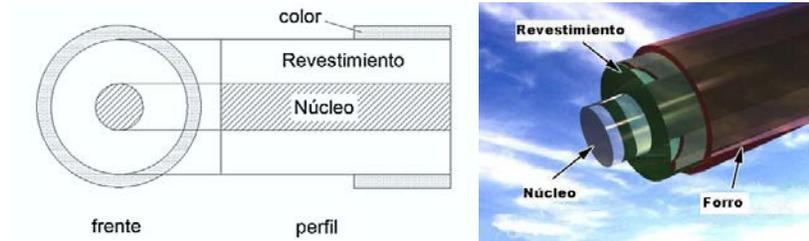


Fig. 3.19 Corte transversal, perfil y vista general de una fibra óptica (imágenes tomadas de internet).

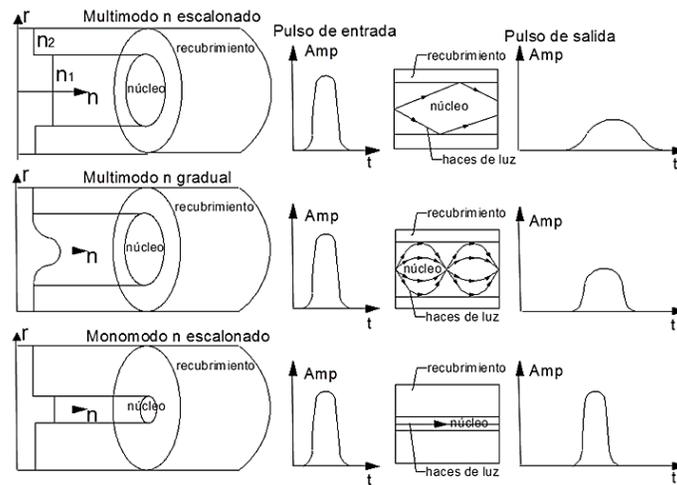


Fig. 3.20 Clasificación de la fibra óptica de acuerdo a la variación del índice de refracción en el núcleo y la cantidad de haces de luz (imagen tomada de internet).



Fig. 3.21 Transmisión de datos a través de una fibra óptica (imagen tomada de la Ref.22).

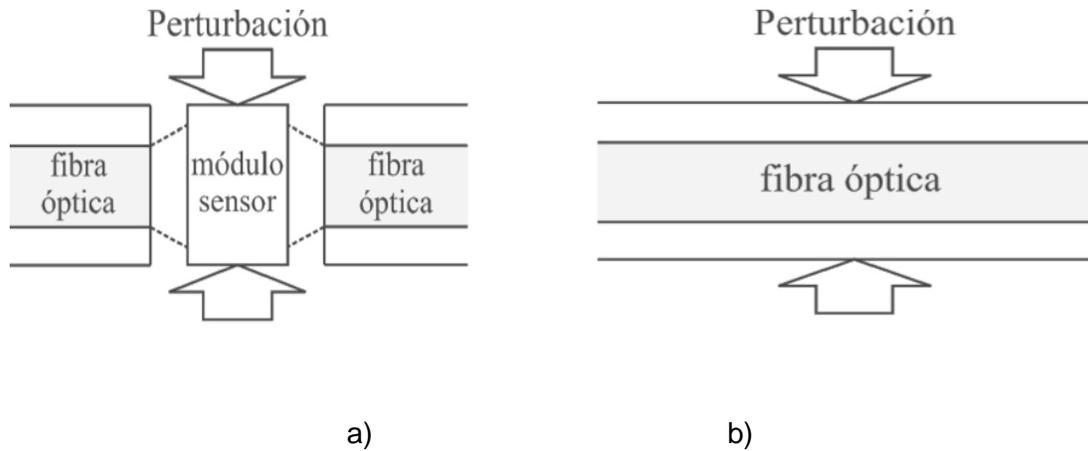


Fig. 3.22 Sensores de fibra óptica: a) Extrínsecos; b) Intrínsecos (Imagen adaptada de la Ref.11).

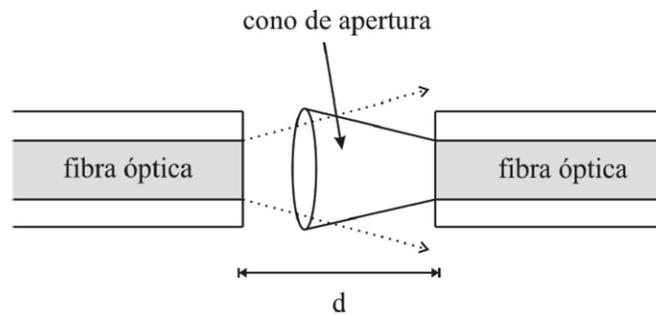


Fig. 3.23 Sensor de fibra óptica basado en la modulación de intensidad (imagen adaptada de la Ref.11).

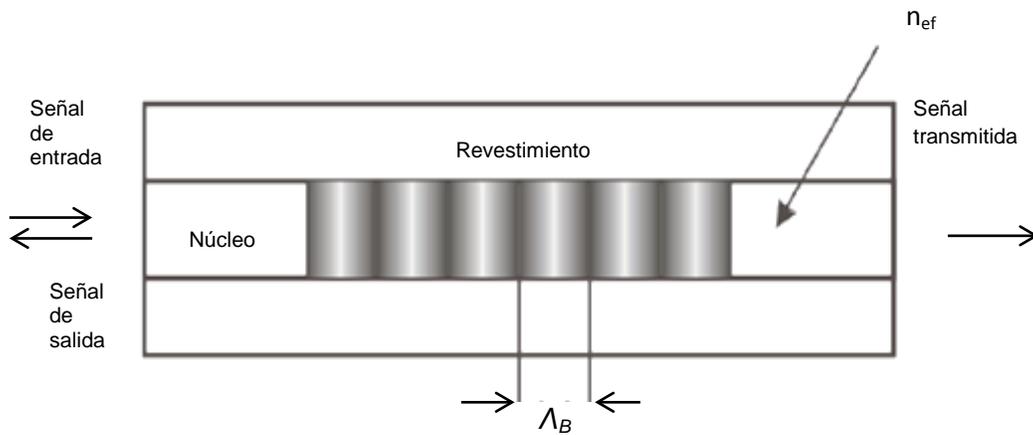


Fig.3.24 Vista longitudinal de una red de Bragg (imagen adaptada de la Ref.11).

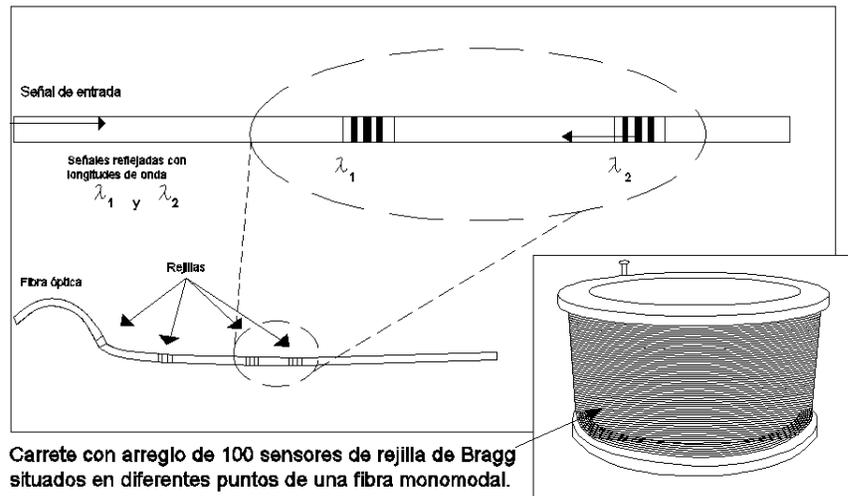


Fig. 3.25 La capacidad de Multiplexado de la fibra óptica nos permite tener una gran cantidad de sensores para medir diferentes parámetros, a lo largo de una misma línea (imagen adaptada de un manual de Micron Optics).



Fig. 3.26 Algunos tipos de acelerómetros: a) Capacitivos; b) Servoacelerómetro; c) MEMS piezoresistivos; d) Piezoeléctricos, e) Triaxial; f) Para baja frecuencia (imágenes tomadas de la Ref.2 Internet).



Fig. 3.27 Inclinómetro electrolítico biaxial típico (imagen tomada de la Ref.12).



Fig.3.28 Inclinómetro de aplicación geotécnica, para medición de desplazamientos horizontales (imágenes tomadas de la Ref.22).

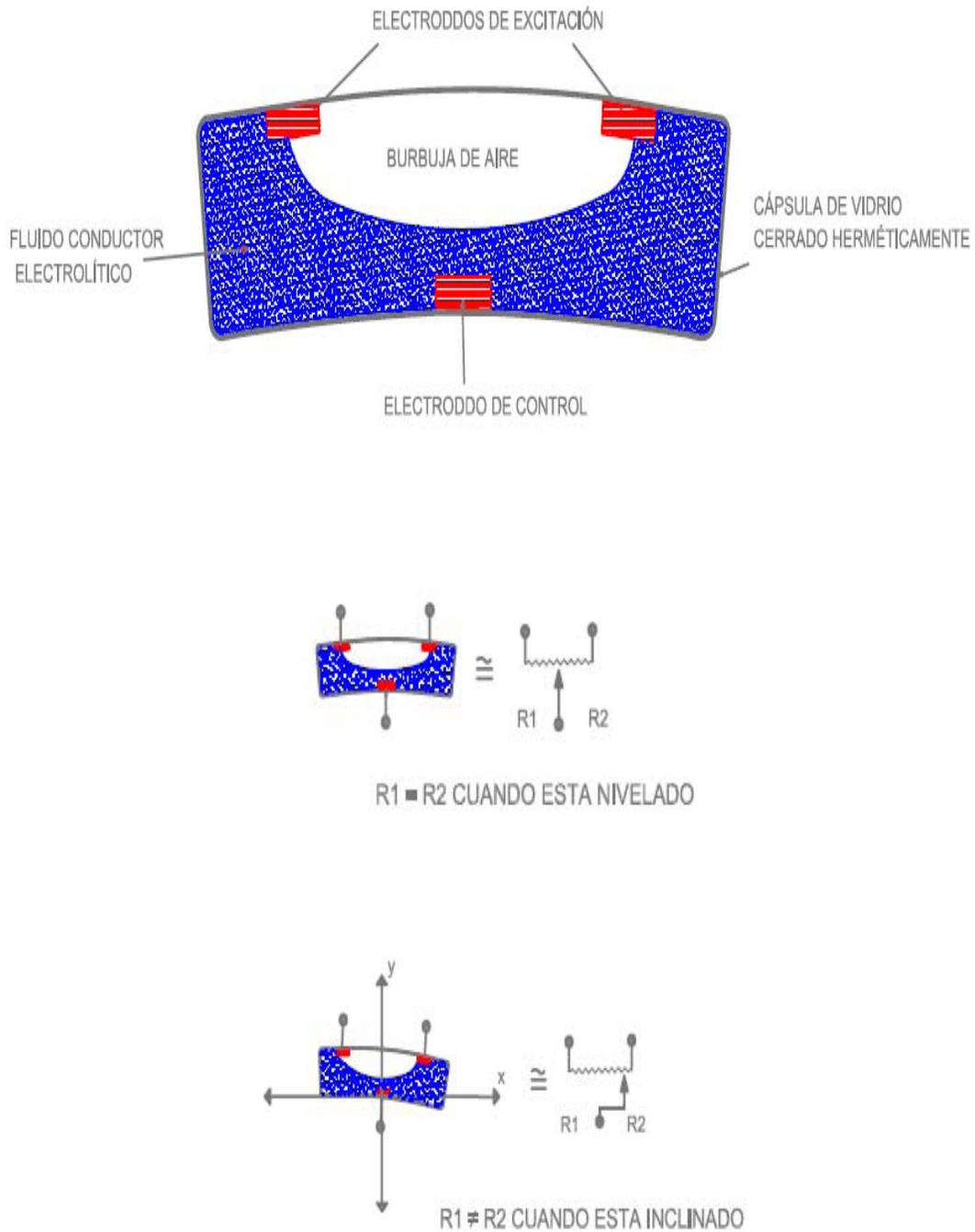
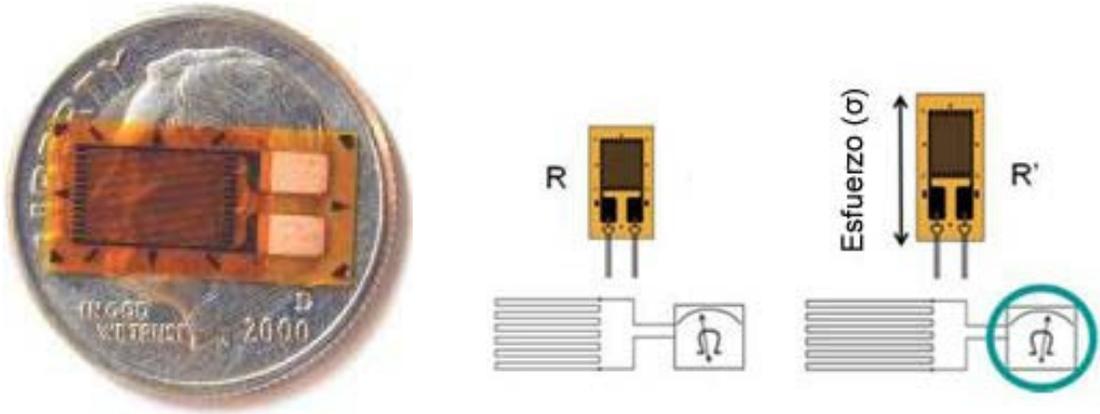


Fig. 3.29 Inclinómetro potenciómetro-electrolítico (adaptación realizada de un esquema de la Ref. 12).



a)



b)

Fig. 3.30 Medición de deformaciones por galgas Extensométricas



Fig. 3.31 Celdas de carga tipo viga, anillo y columna, respectivamente (imágenes tomadas de internet).



Fig. 3.32 Sensores de desplazamiento lineal.



Fig. 3.33 Extensómetro típico. En la imagen se aprecia la terminal del sensor de desplazamiento lineal que reacciona con el movimiento horizontal de la placa circular de acero.



Fig. 3.34 Instrumentación en columna con sensores de desplazamiento lineal potenciométricos y de fibra óptica.

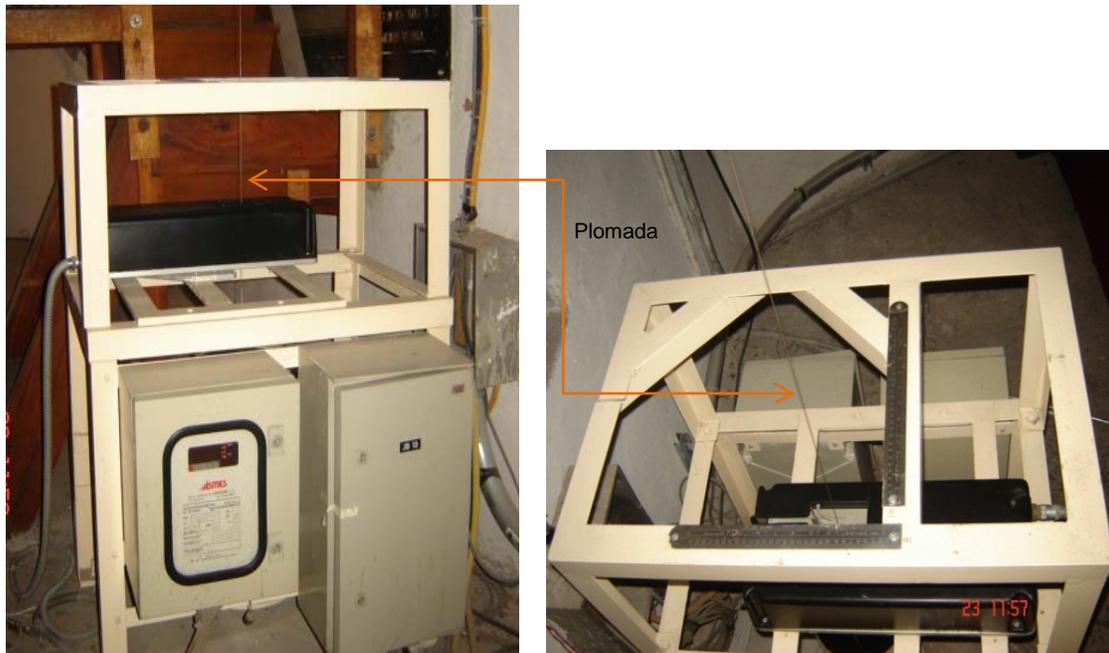


Fig. 3.35 Telecoordenómetro típico.

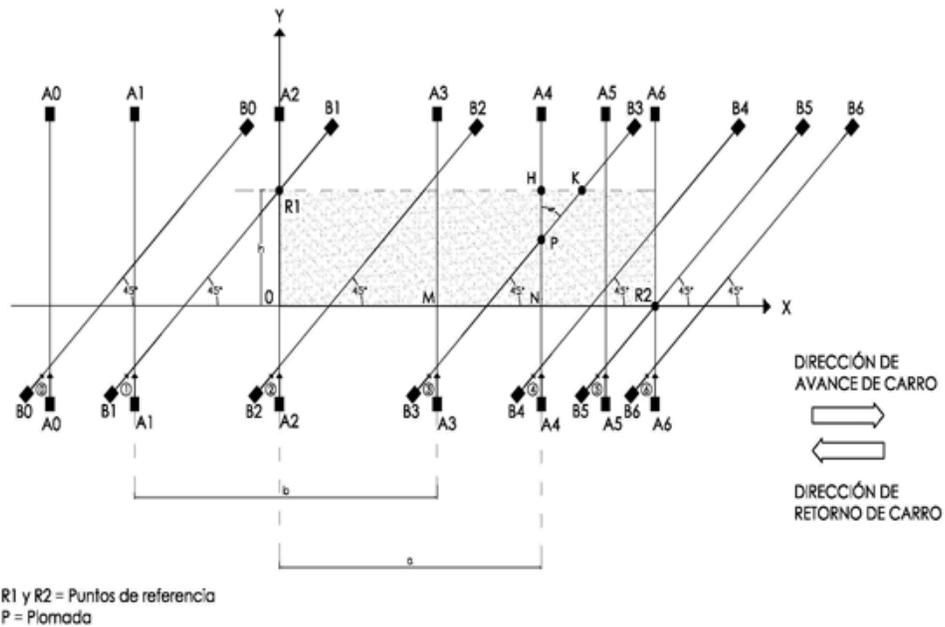


Fig. 3.36 Principio de funcionamiento de los telecoordenómetros (imagen adaptada de un manual del sistema de monitoreo para la Catedral Metropolitana, del ISMES, Italia).

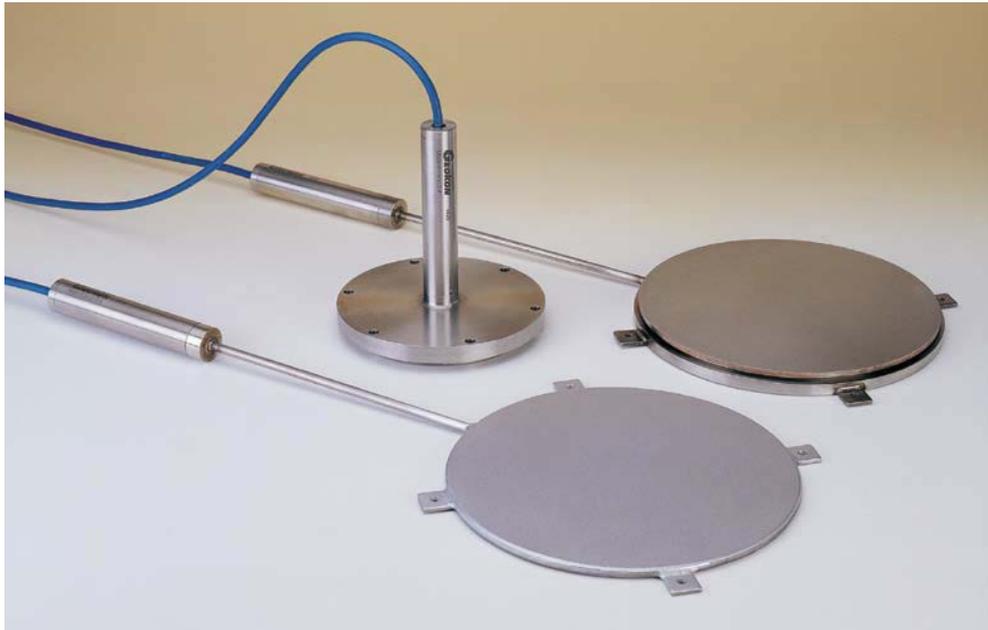


Fig. 3.37 Celdas de presión (Imagen tomada de la empresa ENSESA, S. A. DE C. V.).



a)



b)

Fig. 3.38 a) Araña magnética; b) Montaje de sensor sobre placa (imagen tomada de la Ref.23).

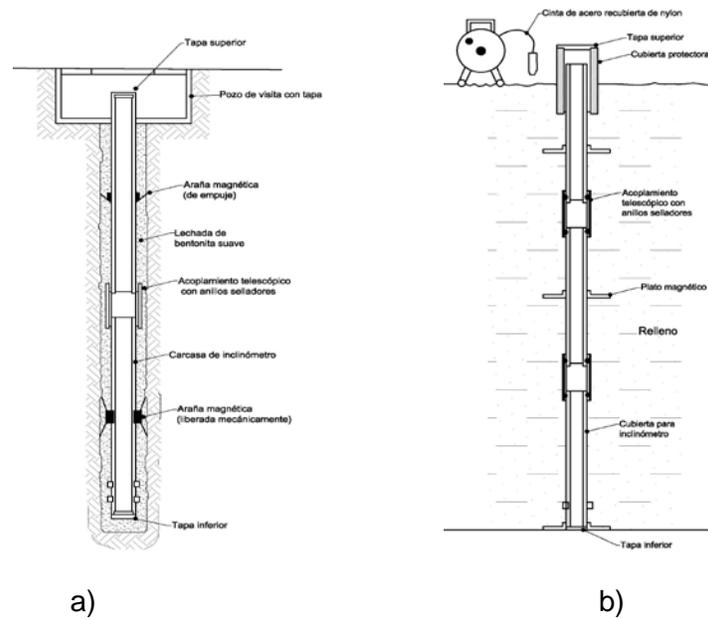


Fig. 3.39 Aplicación de extensómetros magnéticos: a) En pozo de sondeo; b) En relleno (imágenes tomadas de la Ref.23).



a)



b)

Fig.3.40 Sistemas de medición de asentamientos diferenciales: a) Sistema de vasos comunicantes; b) Sensor de presión de cuerda vibrante (imagen tomada de la Ref.23).



Fig. 3.41 Termómetro (Ref.20)



Fig. 3.42 Radiómetro



Fig. 3.43 Anemómetro ultrasónico



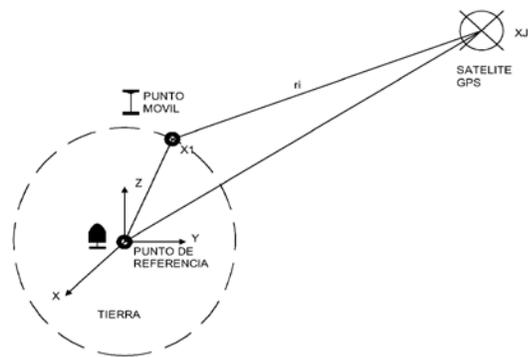
a)



b)

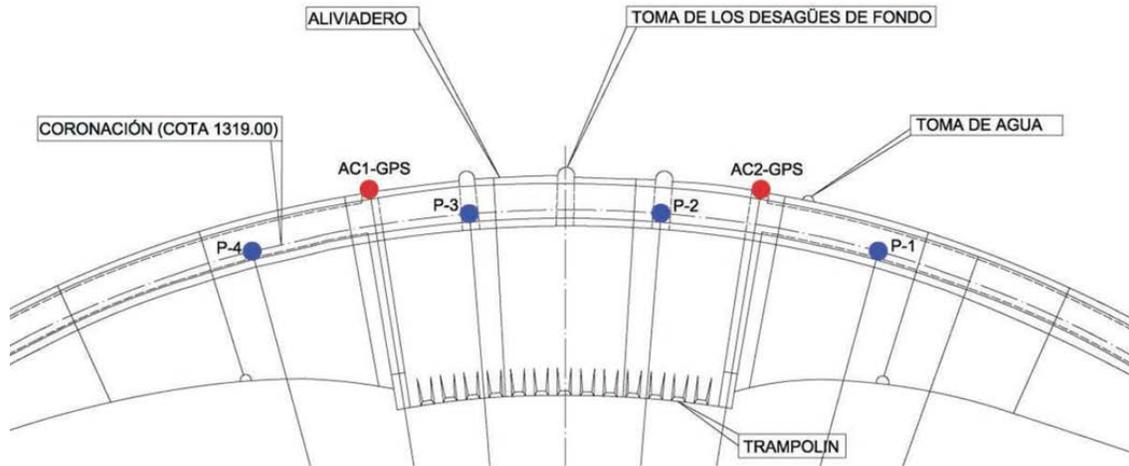


c)



d)

Fig. 3.44 Sistema de posicionamiento global GPS: a) Antena utilizada como punto móvil; b) Antena utilizada como punto de referencia; c) Registrador; d) funcionamiento del sistema.



a)

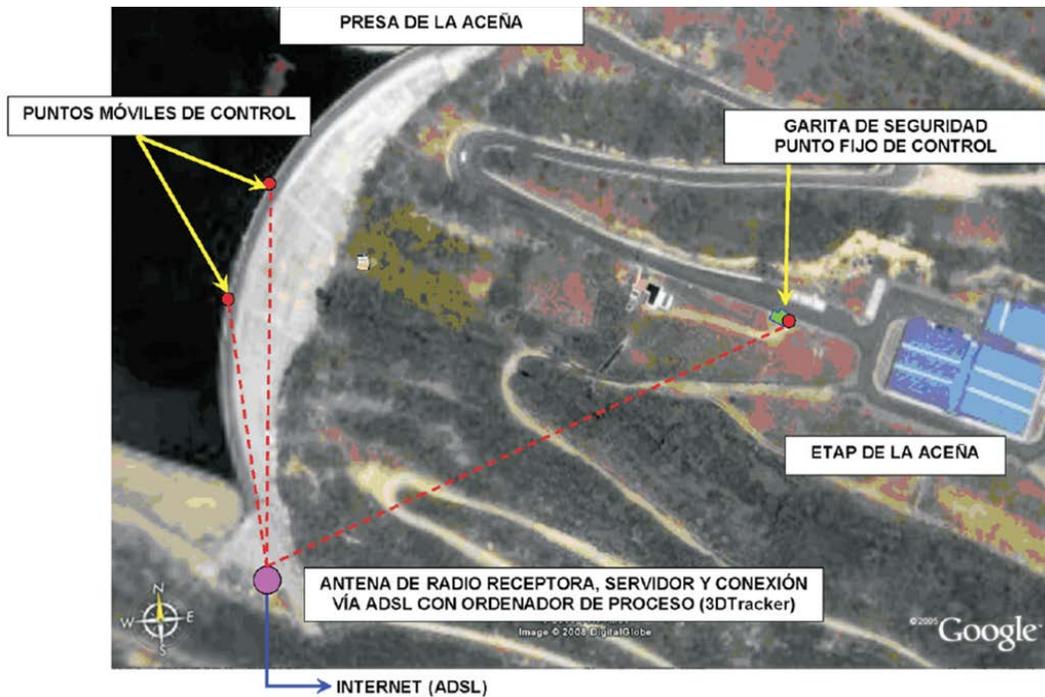


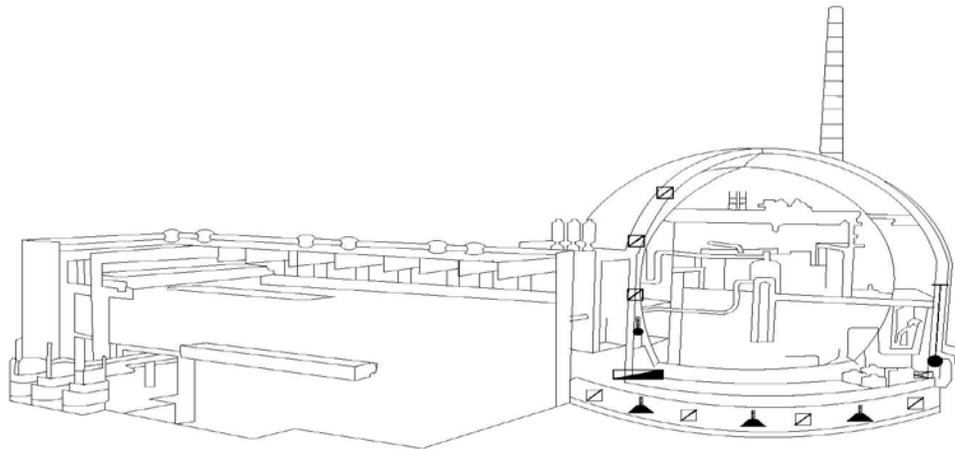
Fig. 3.45 Presa Arco-Gravedad La Aceña, España: a) Esquema de localización de péndulos y dispositivos GPS en cortina; b) Vista satelital de la instrumentación con DGPS (imágenes tomadas de la Ref.24).



Fig.4.1 Central Nucleoeléctrica de Three Mile Island (imágenes tomadas de Internet).



Fig.4.2 Central Nuclear de Chernóbil (imágenes tomadas de Internet).

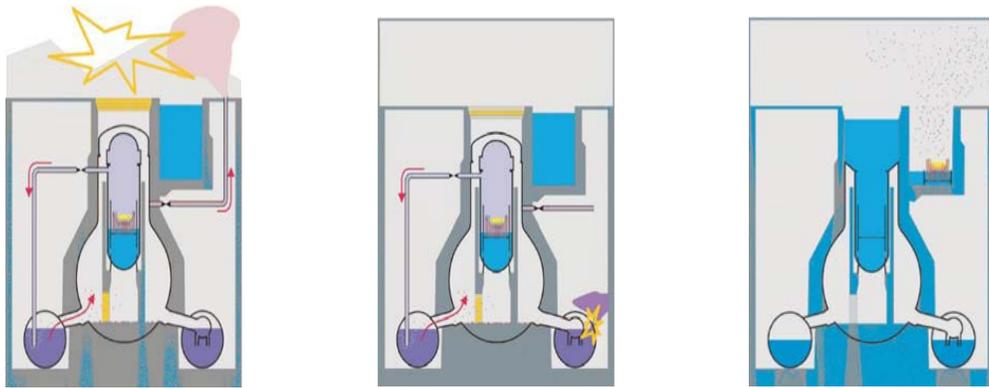


SIMBOLO	SENSOR
	DEFORMIMETRO DE CUERDA VIBRANTE
	MEDIDOR DE ASENTAMIENTOS
	TERMÓMETRO
	PÉNDULO DIRECTO
	MEDIDOR DE CONVERGENCIAS
	CELDA DE CARGA

Fig.4.3 Localización de un sistema de monitoreo continuo en una central nucleoelectrica (imagen adaptada de la Ref.3 Internet).



Fig. 4.4 Algunos daños generados por el terremoto y el tsunami en la central nuclear de Fukushima (imágenes tomadas de la Ref.14).



a)

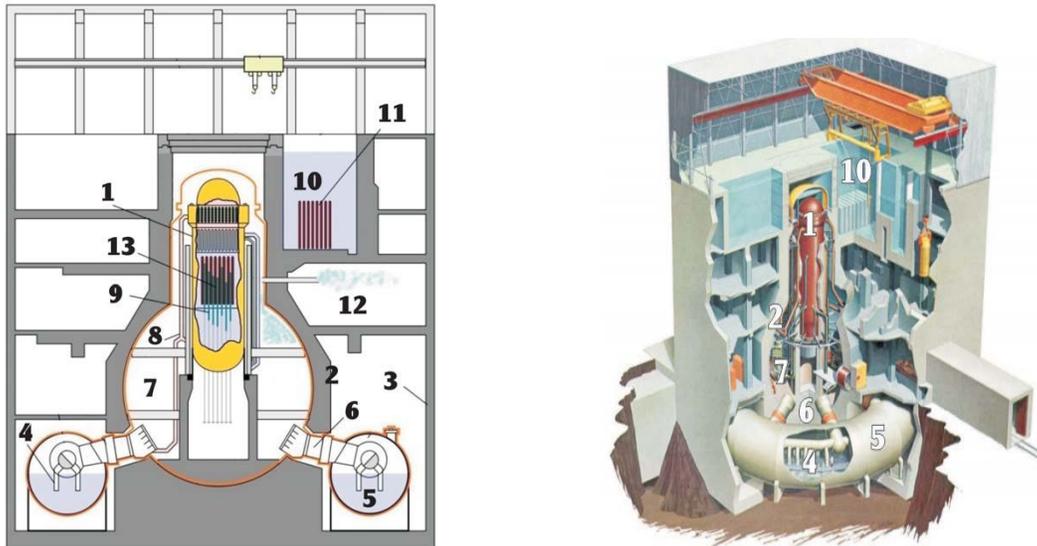


b)



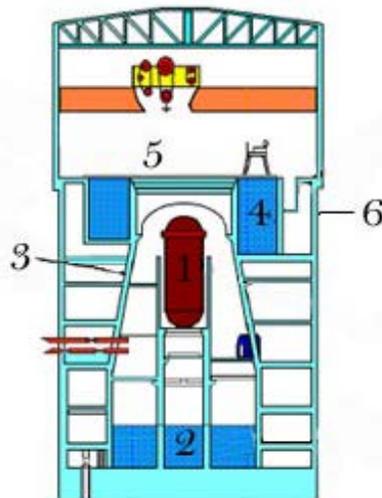
c)

Fig.4.5 a) C. N. Fukushima: acumulación y explosión de hidrógeno del contenedor hacia el edificio del reactor (unidades 1, 2 y 3), dentro del contenedor primario (unidad 2), e incendio y explosión destrozando el techo del edificio (unidad 4); b) explosión en tres reactores de la c. n. Fukushima; c) Vista aérea del daño en el reactor 3 de la central nuclear (imágenes tomadas de la Ref. 14).



1 Vasija del reactor; 2 Contención primaria; 3 Contención secundaria; 4 Línea de descarga de vapor; 5 Alberca de supresión de presión; 6 Desfogue de pozo seco a la alberca de supresión; 7 Pozo seco; 8 Tubería de alivio de la vasija del reactor; 9 Barra de control; 10 Alberca de combustible gastado; 11 Combustible gastado; 12 Tubería de venteo de la contención primaria; 13 Combustible en el núcleo del reactor.

Fig.4.6 Diseño de la contención tipo MARK I, C. N. de Fukushima (imagen tomada de la Ref. 14).



1 Vasija del reactor; 2 alberca de supresión de presión, 3 contención primaria, 4 alberca de combustible gastado, 5 piso de recarga, 6 contención secundaria.

Fig. 4.7 Diseño de la contención tipo MARK II, C. N. Laguna Verde (imagen adaptada de la Ref. 15).



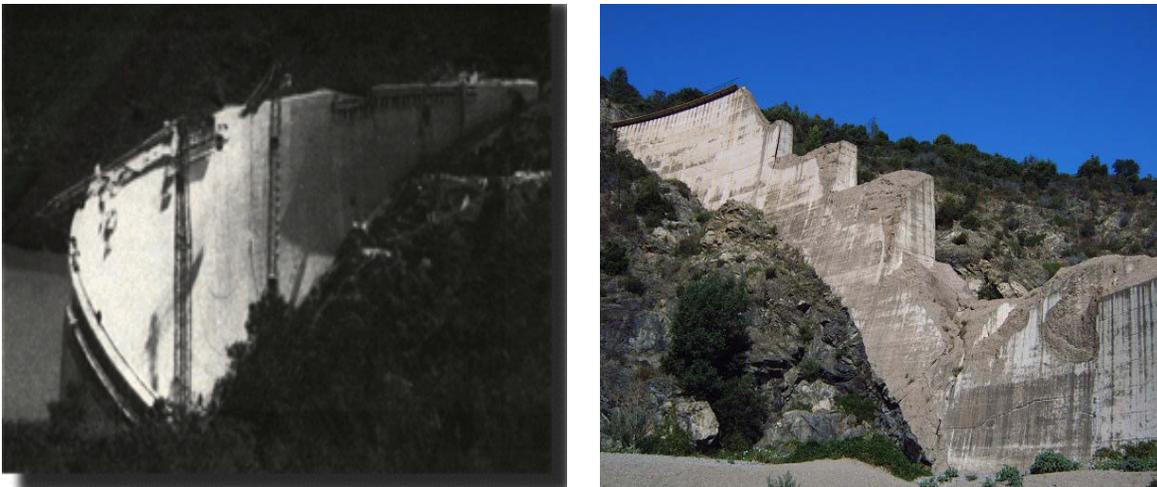
Fig. 4.8 Vista general de la C. N. de Olkiluoto 3 y corte del edificio de contención (imágenes tomadas de la Ref.3 Internet).



Fig. 4.9 Vista general de la C. N. Laguna Verde y maqueta que muestra detalles de la vasija del reactor (imágenes tomadas de la Ref. 14).



a)



b)

Fig. 4.10 a) Deslizamiento de laderas en la Presa Vajont, Italia (imágenes tomadas de la Ref.12 Internet); b) Presa Malpasset de arco-bóveda de doble curvatura antes y después del colapso debido al debilitamiento de la cimentación (imágenes tomadas de la Ref.6 Internet).



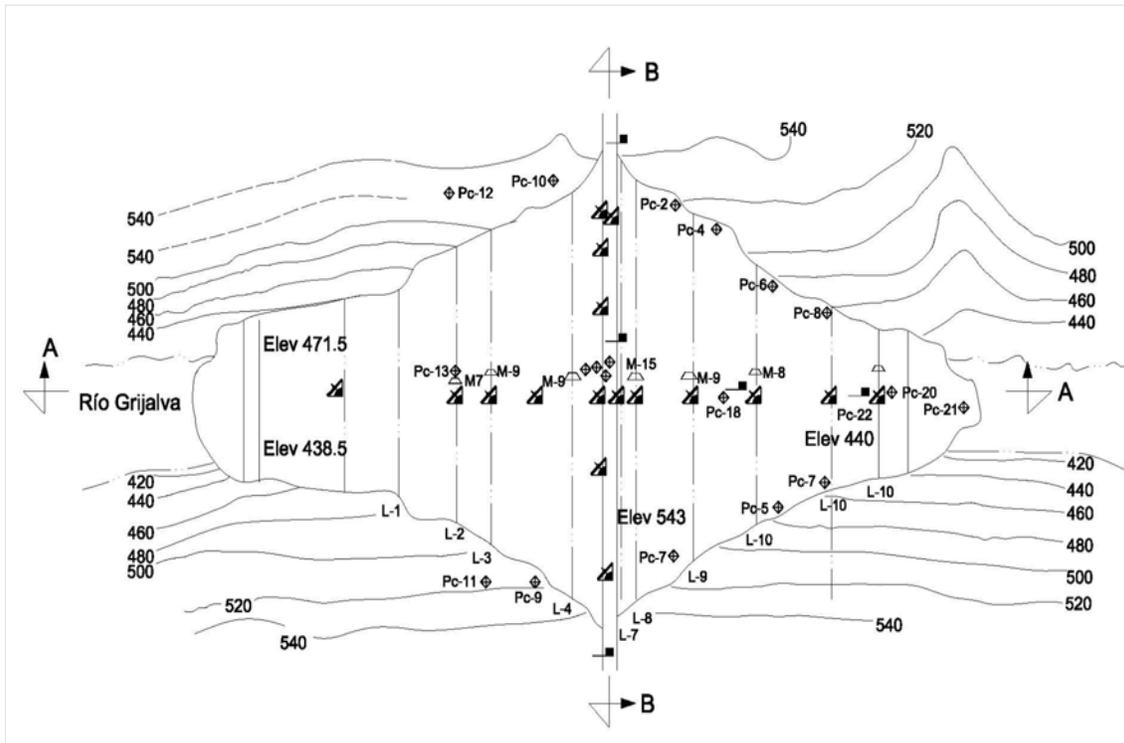
Fig. 4.11 Secuencia de falla por erosión interna en la Presa Teton, Estados Unidos (imagen tomada de internet).



Fig. 4.12 Colapso parcial de la presa Pian del Gleno, Valle de Scalva, Italia (imagen tomada de la Ref.28).

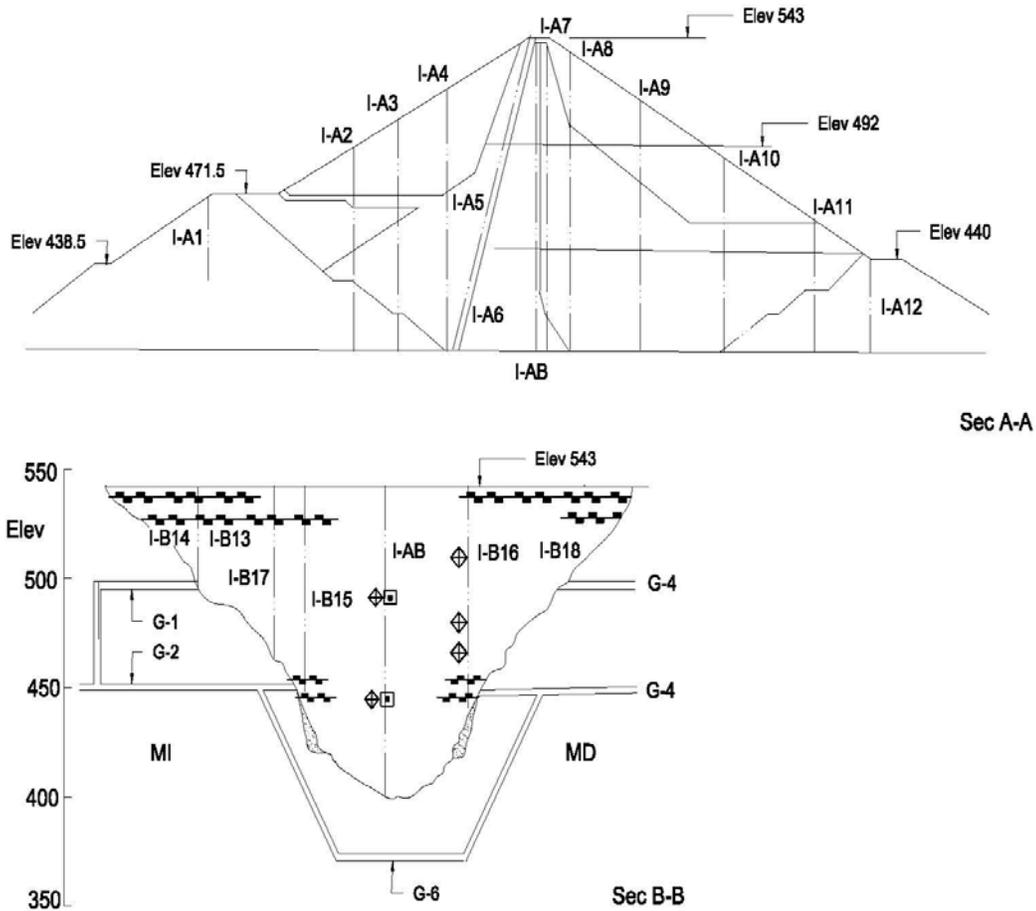


Fig.4.13 Pérdida del bordo libre de la presa Vajont, Italia, debido al deslizamiento de laderas (imagen tomada de internet).



SIMBOLO	SENSOR
	Inclinómetro
	Piezómetro
	Acelerógrafo
	Banco superficial
Elev	Elevación en m.
L1, 2...,12	Líneas de bancos superficiales

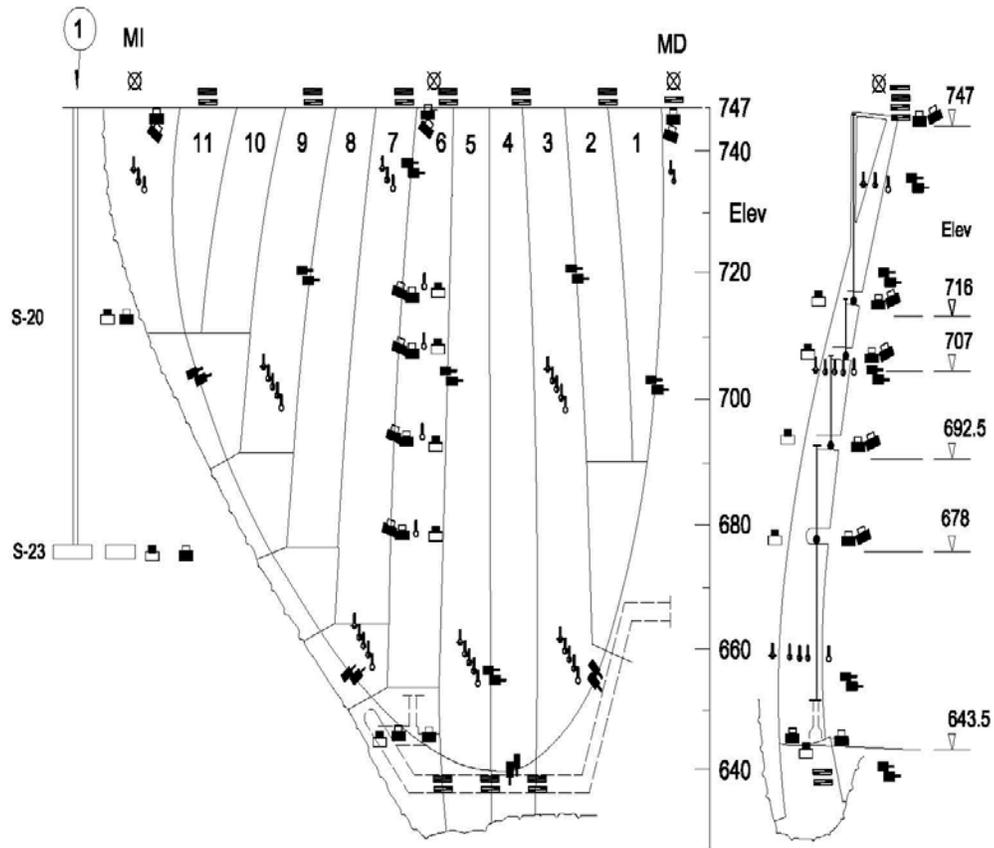
Fig. 4.14 Localización en planta de la instrumentación implementada en la Presa La Angostura, Chis., México (imagen adaptada de la Ref. 16).



SIMBOLO	SENSOR
I-i	Inclinómetros
V	Nivel hidráulico
—■—	Serie de extensómetros lineales
□	Grupo de celdas de presión y extensómetros
◇	Piezómetros

SIMBOLO	SENSOR
G-i	Galerías
Elev	Elevación en m.
MI	Margen izquierda
MD	Margen derecha
⊕	Estación de monitoreo

Fig. 4.15 Localización de la instrumentación en corte transversal de la presa La Angostura, Chis., México (imagen adaptada de la Ref. 16).



SIMBOLO	SENSOR
Elev	Elevación en m.
MI	Margen izquierda
MD	Margen derecha
S-i	Galerías
	Estación de coordenómetro
	Estación de clinómetro

SIMBOLO	SENSOR
	Mira móvil de colimación
	Termómetro eléctrico en el agua
	Termómetro eléctrico en el concreto
	Termómetro eléctrico en el aire
	Calibrador extensométrico
	Dilatómetro

Fig. 4.16 Localización de la instrumentación de la presa Manuel M. Diéguez (imagen adaptada de la Ref. 16).

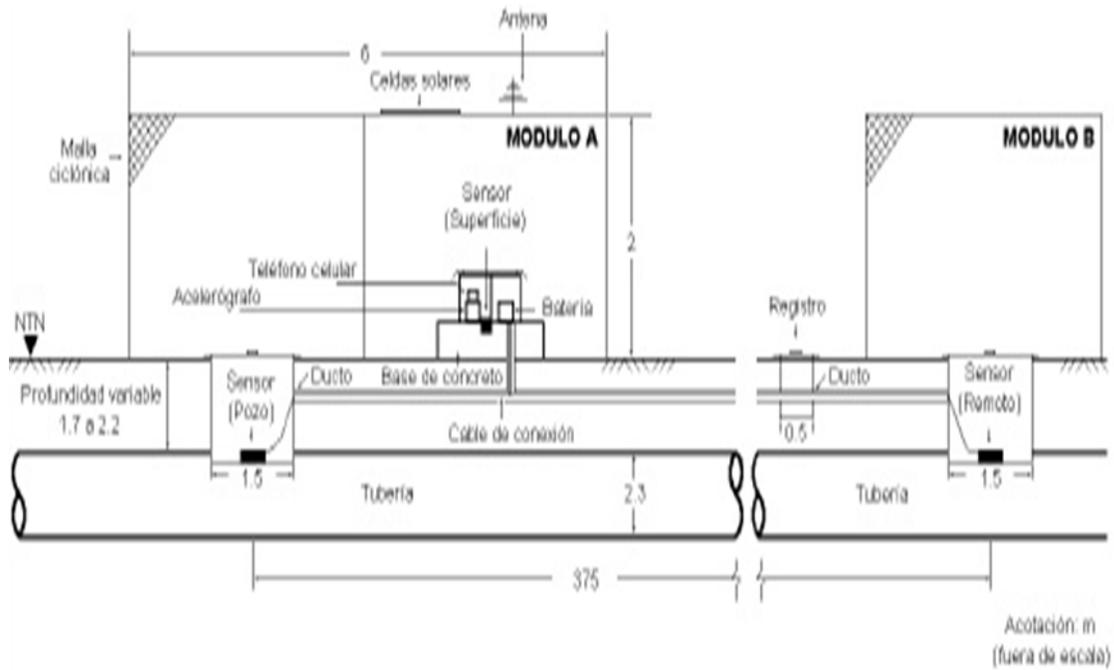


Fig. 4.17 Instrumentación sísmica de un tramo de la tubería del Sistema Cutzamala (imagen tomada de internet).



Fig. 4.18 Resonancia y colapso del Puente Tacoma Narrows, Estados Unidos (imágenes tomadas de la Ref.10 Internet).



a)



b)

Fig. 4.19 a) Colapso Puente Chiapas, México (imagen tomada de la Ref.8 Internet); b) Colapso Puente Seungsu, Corea (imagen tomada de Internet).



Fig. 4.20 Colapso del Puente Minneapolis, Estados Unidos (imagen tomada de la Ref.9 Internet).

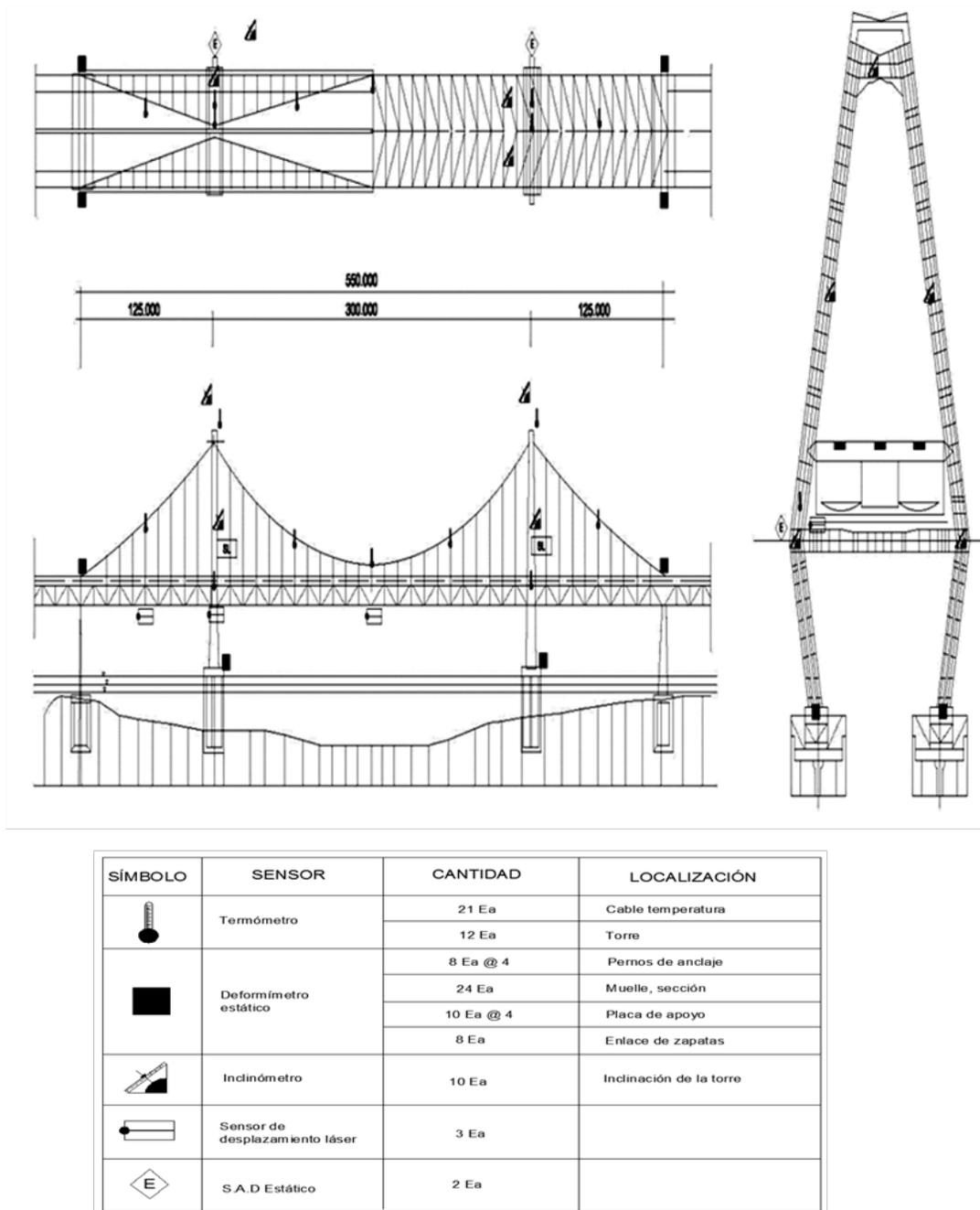
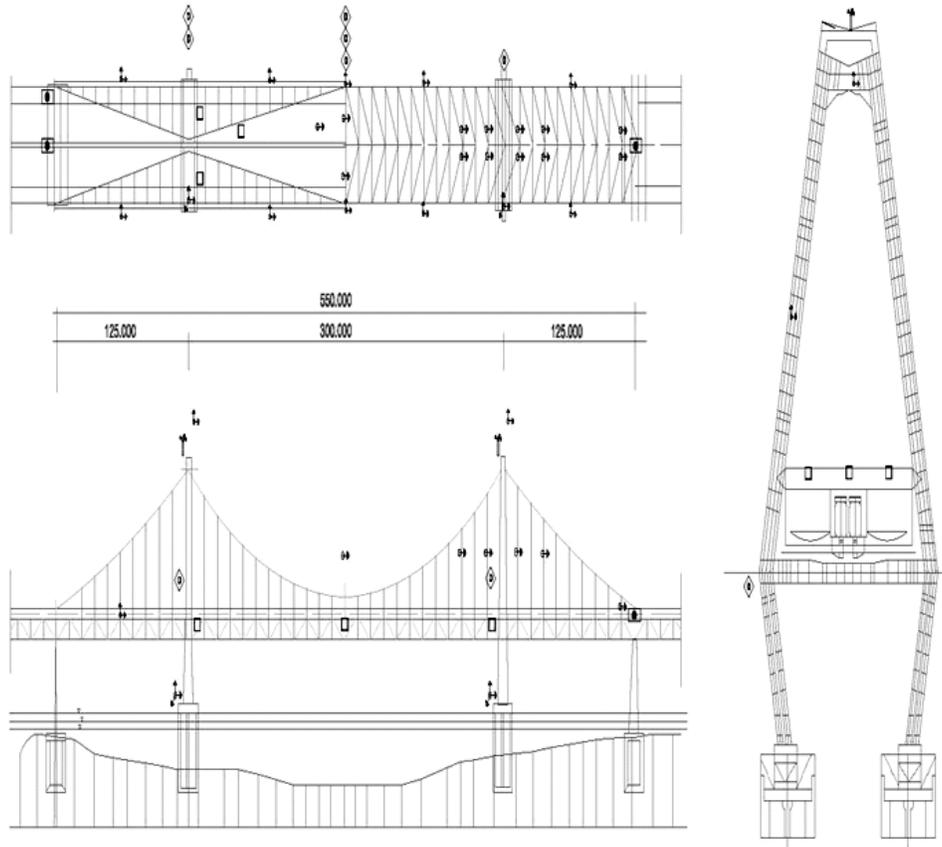


Fig. 4.21 Instrumentación estática del puente Yeoungjong, China (imagen adaptada de la Ref. 17).



SÍMBOLO	SENSOR	CANTIDAD	LOCALIZACIÓN
□	Deformímetro dinámico	76 Ea	Cubierta de la sección transversal
		99 Ea	
⊙→	Acelerómetro 1-D	12 Ea	Cable
⊙↕	Acelerómetro 2-D	4 Ea	Parte superior de la torre y nivel de cubierta
		10 Ea	Cubierta
⊙↕↔	Acelerómetro 3-D	3 Ea	Cimiento de la torre
⊙↕↔	Anemómetro	4 Ea	Torre
●	Potenciómetro	4 Ea	Junta de dilatación
◇	S.A.D Dinámico	7 Ea	

Fig. 4.22 Instrumentación dinámica del puente Yeungjongg, China (imagen adaptada de la Ref.17).

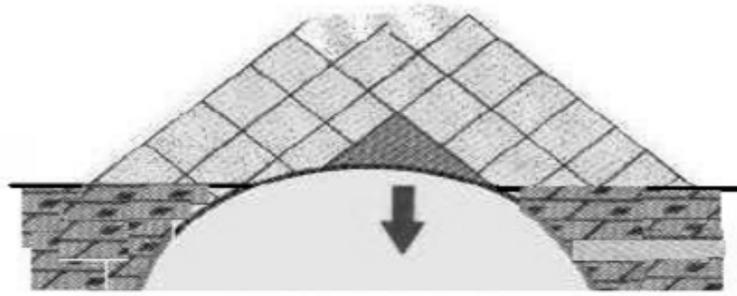


Fig. 4.23 Inestabilidad en excavaciones de túneles en roca generada por la orientación desfavorable de discontinuidades (imagen adaptada de la Ref. 18).

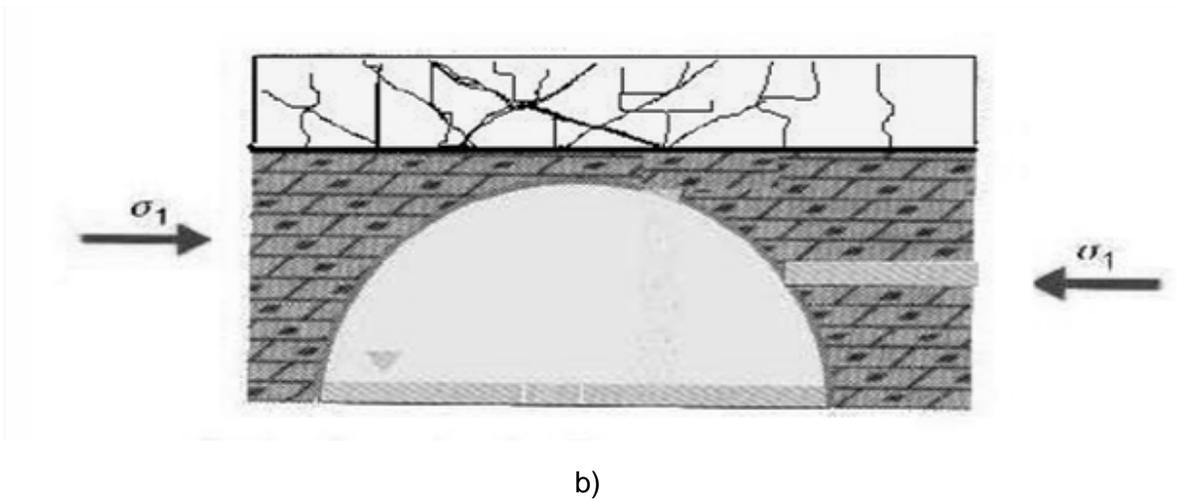
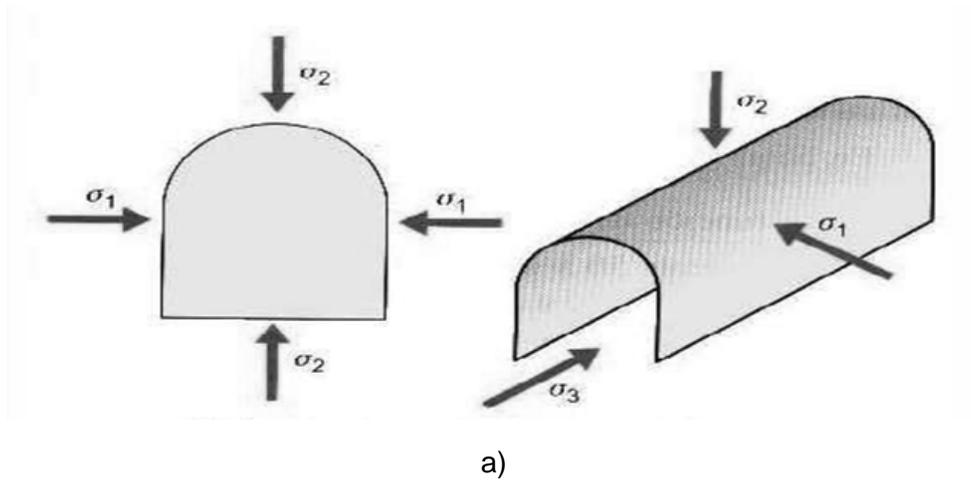


Fig. 4.24 Inestabilidad en excavaciones de túneles en roca generada por: a) orientación desfavorable de los esfuerzos en el túnel; b) flujo de agua hacia el interior de la excavación (imagen adaptada de la Ref. 18).

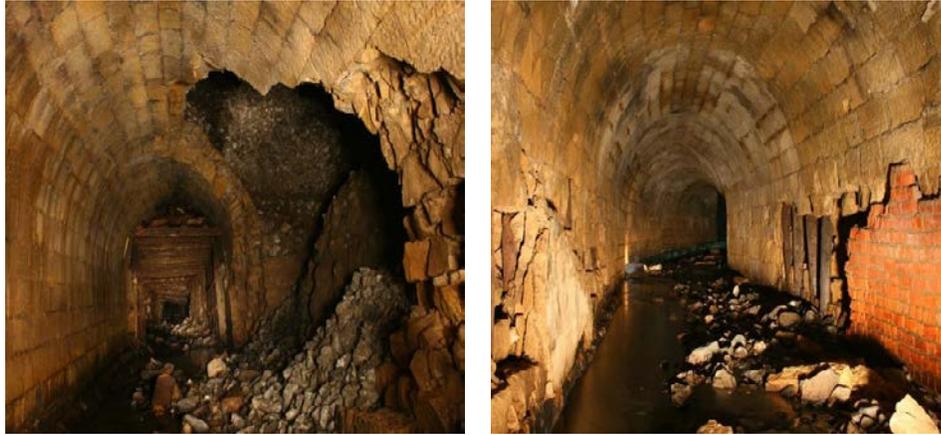


Fig. 4.25 Colapso de algunas secciones en el interior de un túnel (imagen tomada de internet).



Fig. 4.26 Hundimiento de edificios debido a falla en muro diafragma del túnel de la línea 3 del metro, en Guangzhou, China. Imagen tomada de la Ref.11 Internet, pág.94).

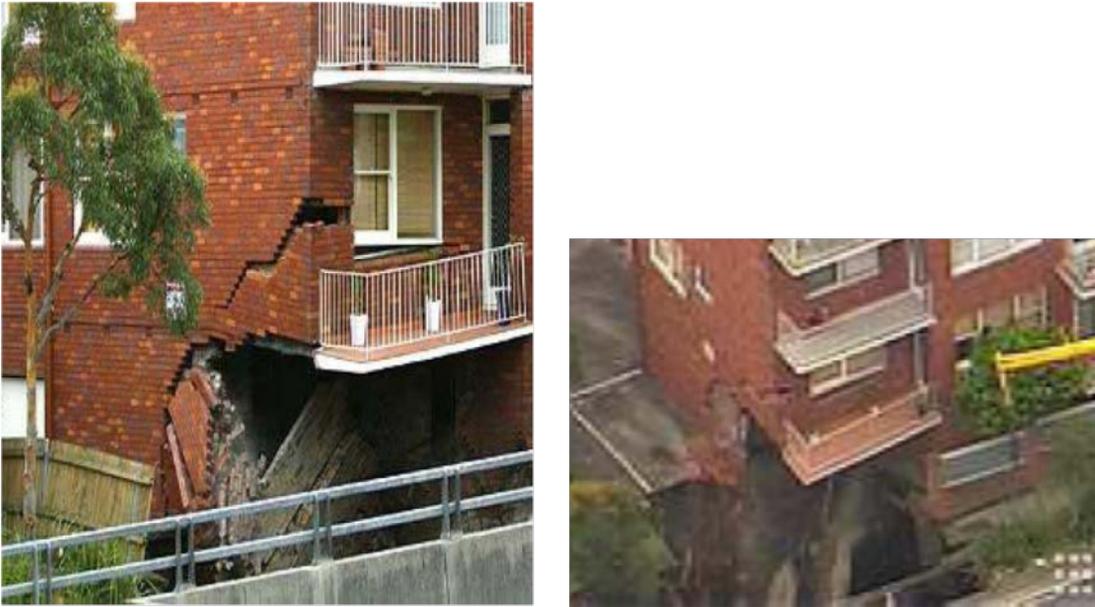


Fig. 4.27 Cráter de 10m x 10m debido al colapso de un túnel de ventilación, Australia, 2005. Imagen tomada de la Ref.11 Internet, pp 112-115).



Fig. 4.28 Efecto en superficie del colapso de un túnel (imagen tomada de internet).



Fig. 4.29 Plomada electrónica (imagen tomada de la Ref.19).

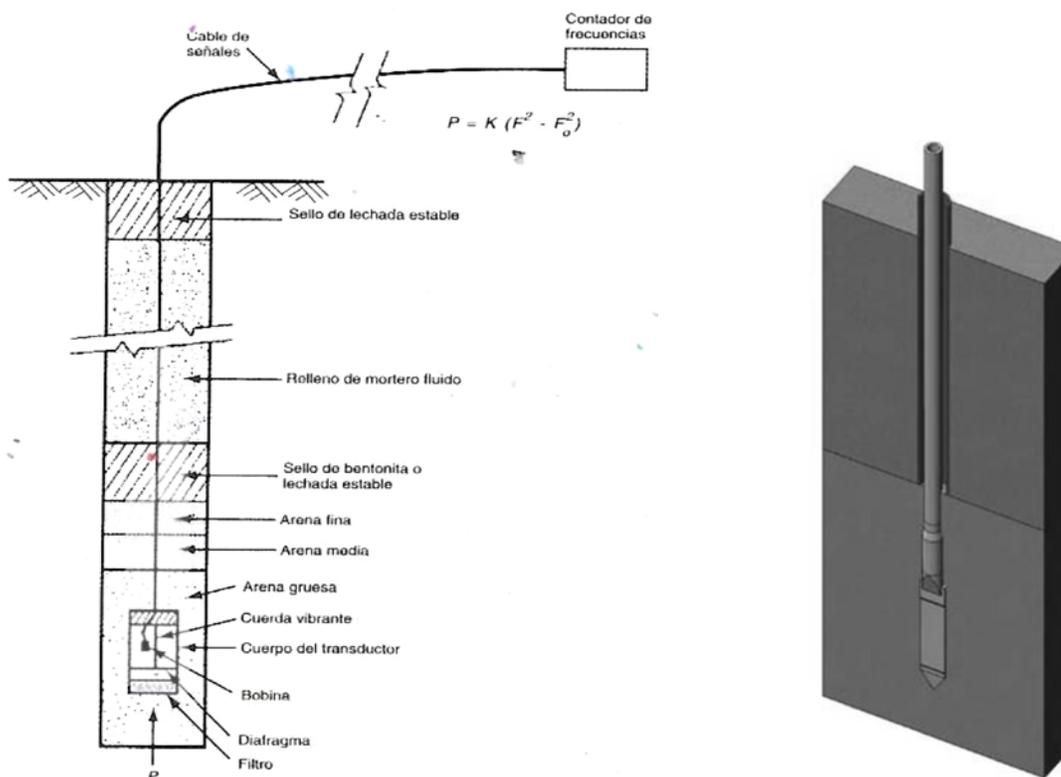


Fig. 4.30 Piezómetro y piezocelda (imágenes adaptadas de la Ref.19).



Fig. 4.31 Celdas de presión instaladas dentro de las dovelas que conformarán el soporte del túnel (imágenes tomadas de la Ref. 19).

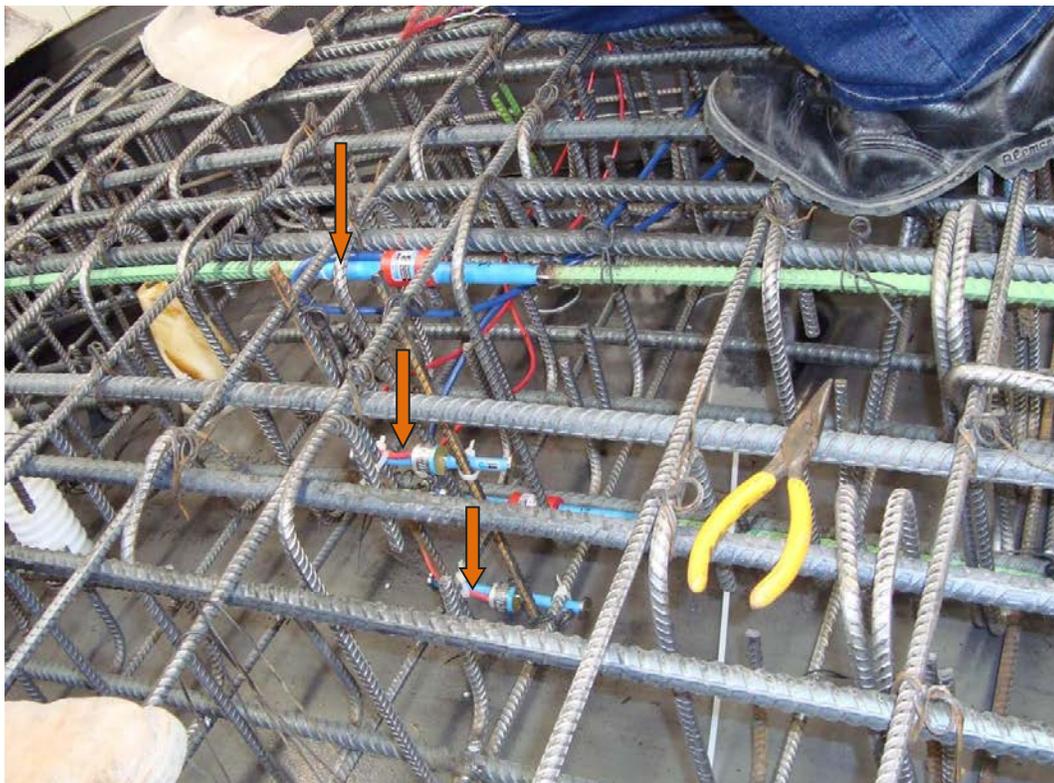


Fig. 4.32 Deformímetros de cuerda vibrante que serán embebidos en el concreto. (imagen adaptada de la Ref. 19).



Fig. 4.33 Extensómetro de barra (imagen tomada de la Ref. 19).

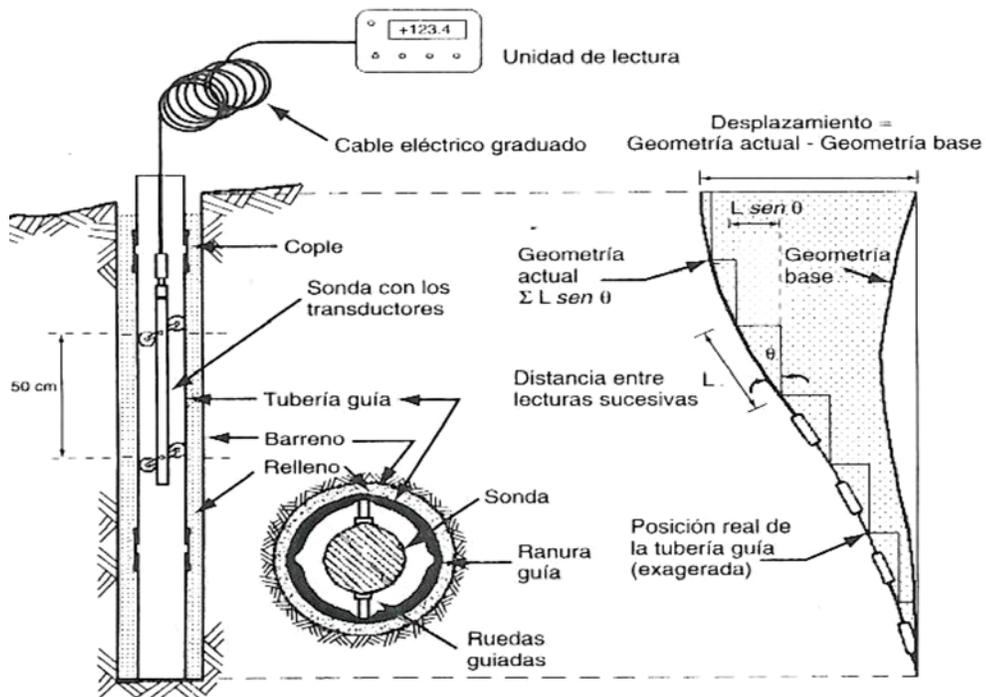


Fig. 4.34 Medición de desplazamientos verticales por medio de inclinómetros (imagen tomada de la Ref. 19).

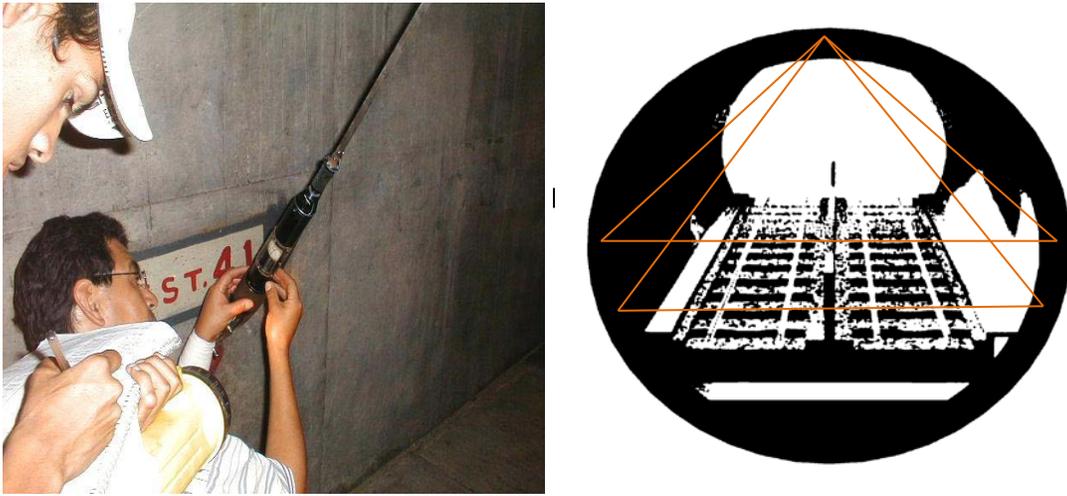


Fig. 4.35 Medición de convergencias (imágenes adaptadas de la Ref. 19).

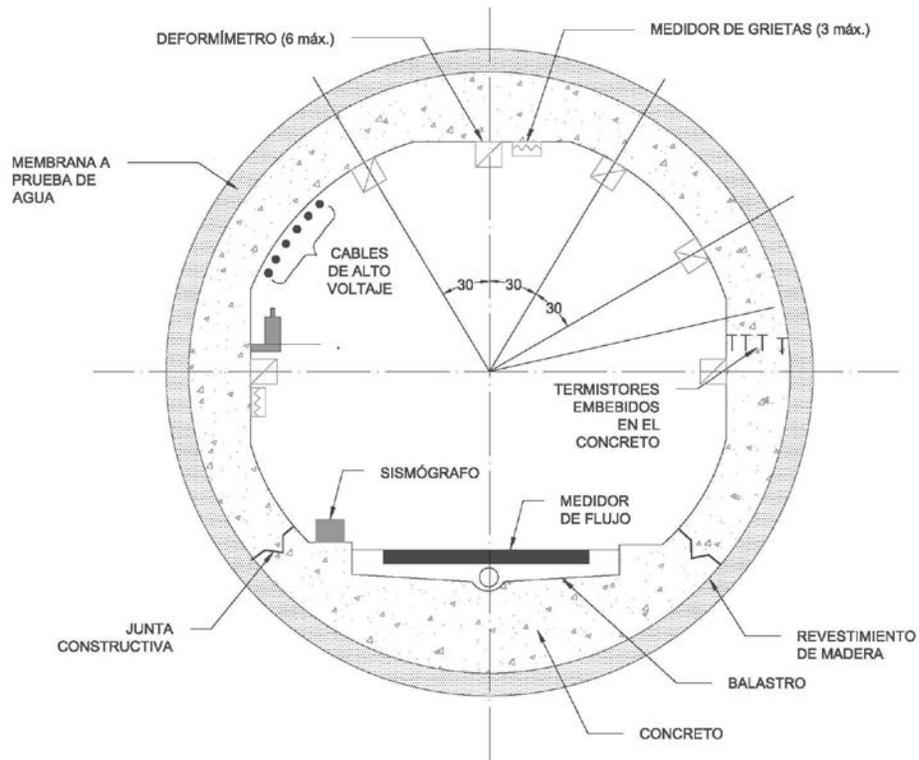


Fig. 4.36 Instrumentación en una sección transversal de un túnel, a base de sensores convencionales (imagen adaptada de la Ref. 19).

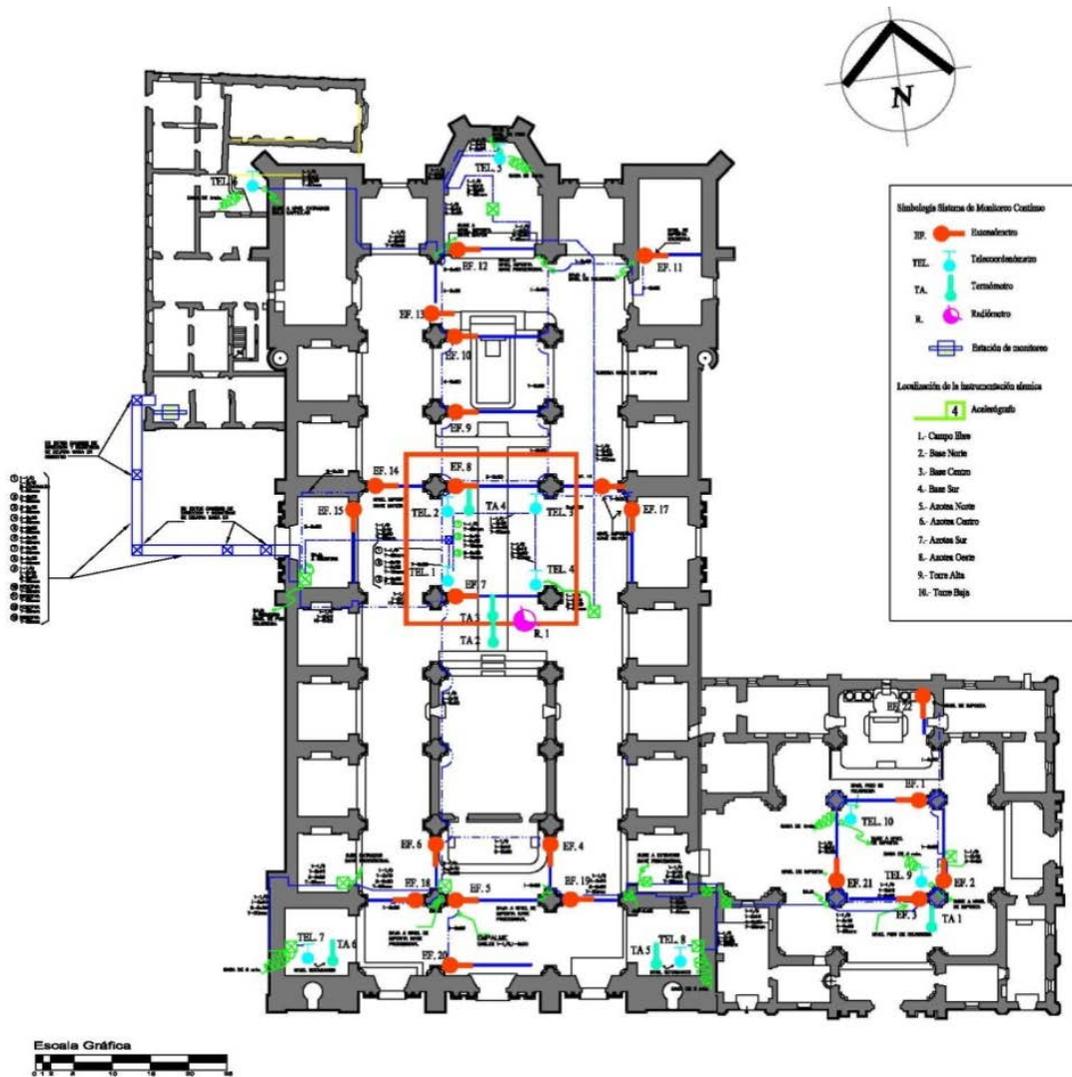


Fig. 4.37 Sistema de monitoreo automático en la Catedral y el Sagrario Metropolitano de la Cd. De México.



Fig. 4.38 Catedral de la Anunciación, en Kremlin, Rusia (imagen tomada de la Ref.3 Internet).

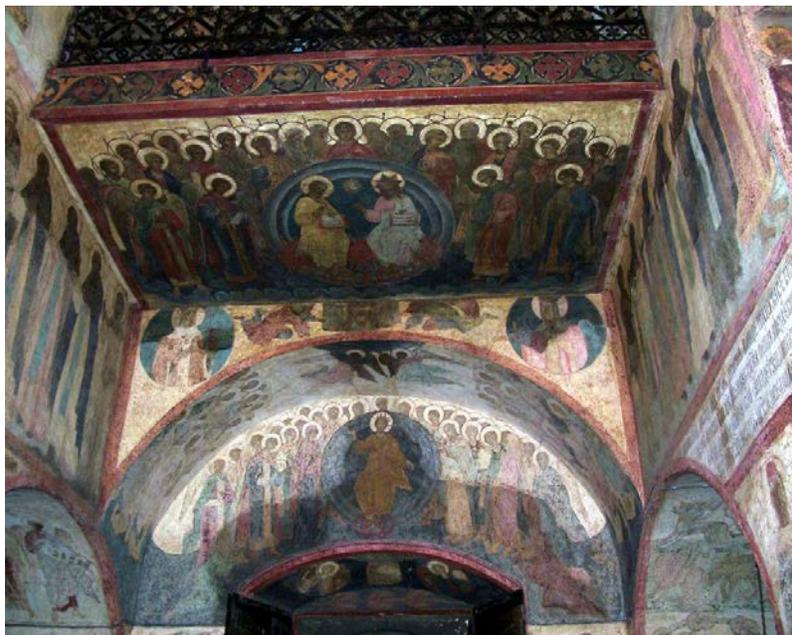


Fig. 4.39 Frescos en los techos, Catedral de la Anunciación, Kremlin, Rusia (imagen tomada de la Ref.3 Internet).



Fig. 4.40 Instalación de sensores, Catedral de la Anunciación, Kremlin, Rusia (imagen tomada de la Ref.3 de Internet).

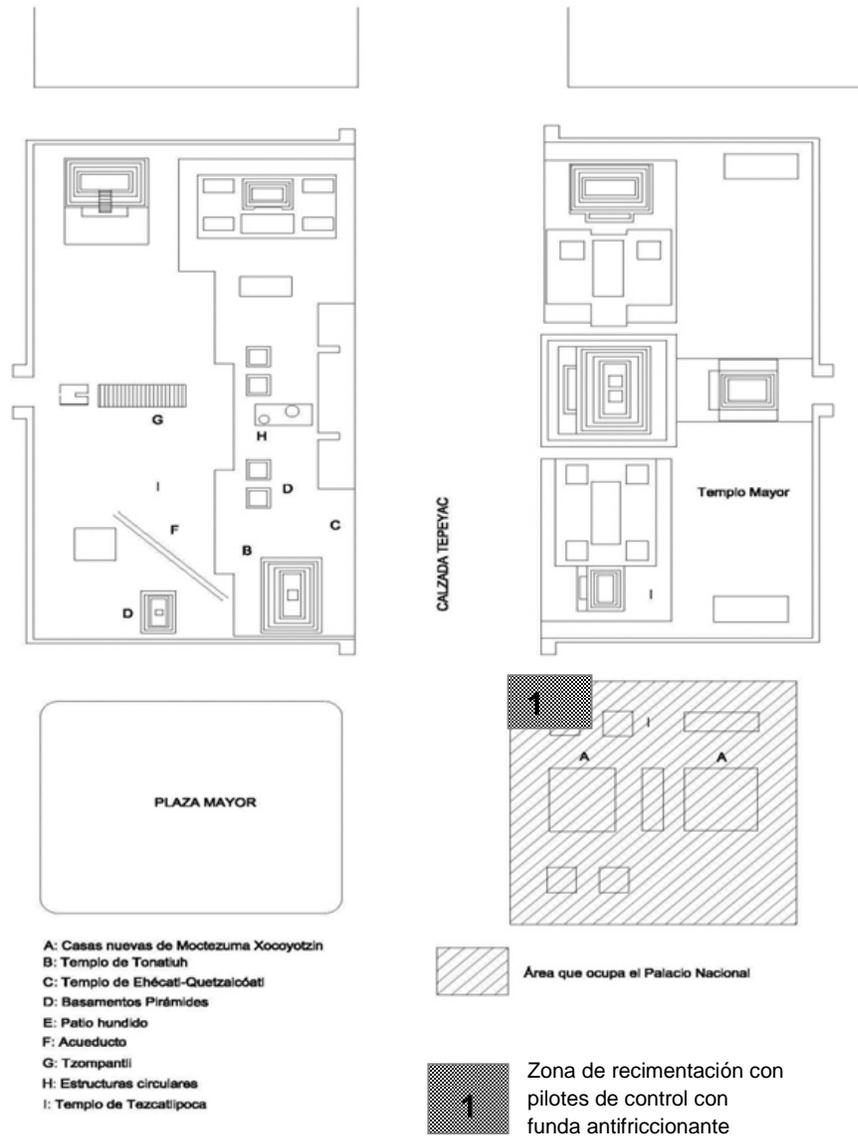


Fig.5.1 Localización del Palacio Nacional, de las construcciones prehispánicas y de la zona de recimentación mediante pilotes de control con funda antifriccionante (imagen adaptada de la Ref.20).

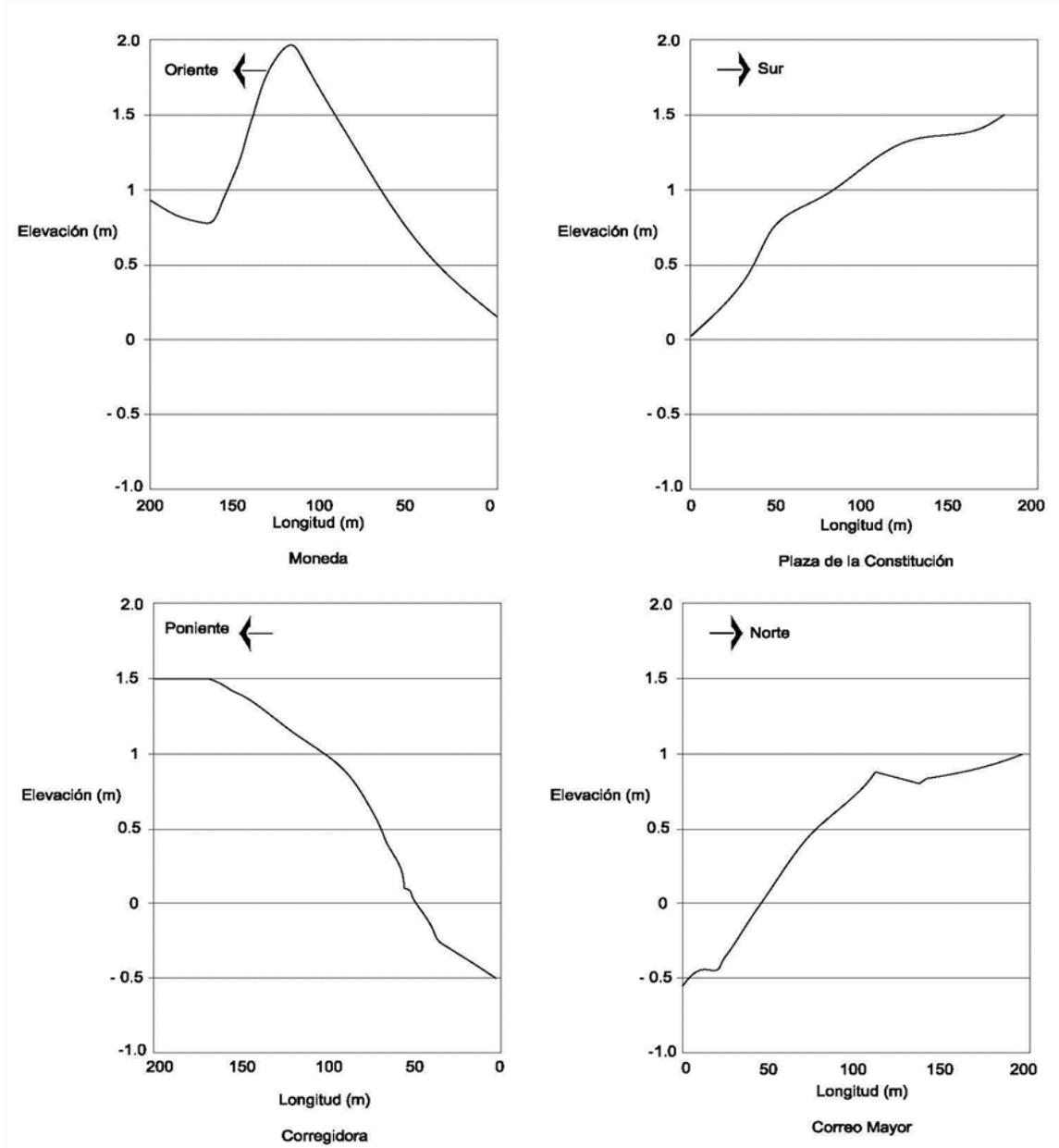
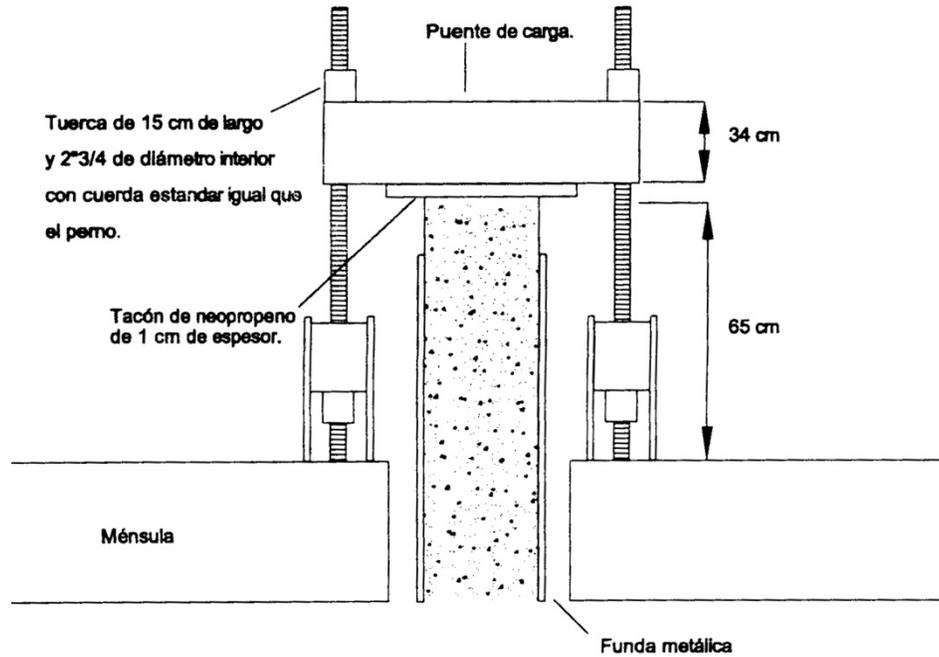
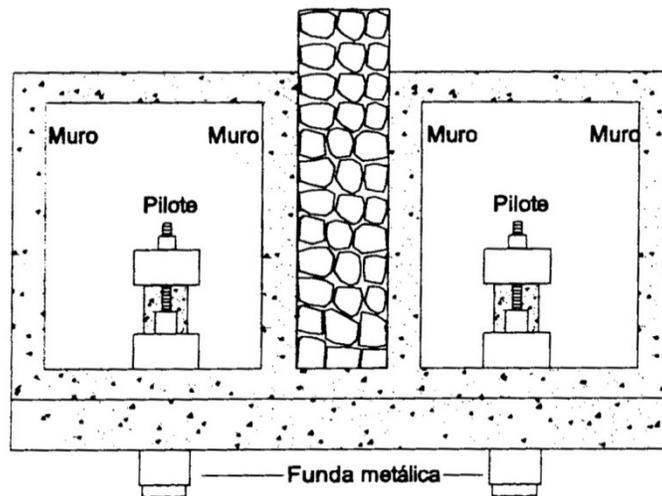


Fig. 5.2 Deformación acumulada en las cuatro fachadas del Palacio Nacional (imagen adaptada de la Ref.20).



a)



b)

Fig. 5.3 Pilotes de control: a) Esquema de un pilote de punta con funda antifriccionante; b) Disposición de los pilotes de control instalados en la esquina nor-poniente del Palacio Nacional (imágenes tomadas de la Ref.20).

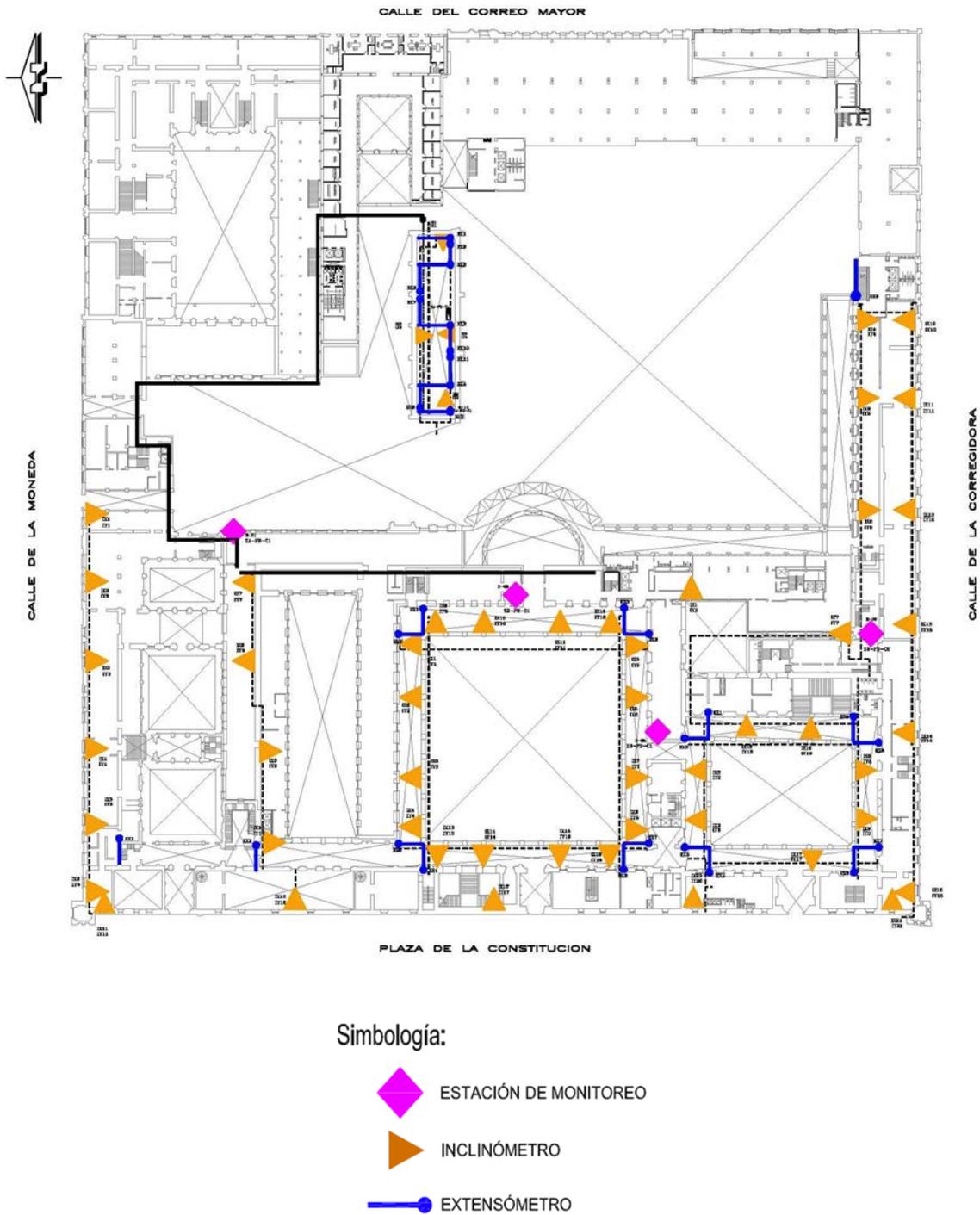


Fig. 5.4 Plano de localización del sistema de monitoreo automático



Fig.5.5 Inclinómetros instalados en diversas secciones del Palacio Nacional.



Fig. 5.6 Detalle de un extensómetro típico. Obsérvese que el cilindro de acero experimenta un movimiento vertical cuando la longitud del claro que mide se modifica. Esto se logra gracias a la presencia de una polea que cambia de dirección la trayectoria del tensor que se encuentra unido a ambos extremos del claro al que se da seguimiento. También se aprecia el sensor de desplazamiento lineal cuyo vástago móvil reacciona contra el cilindro.

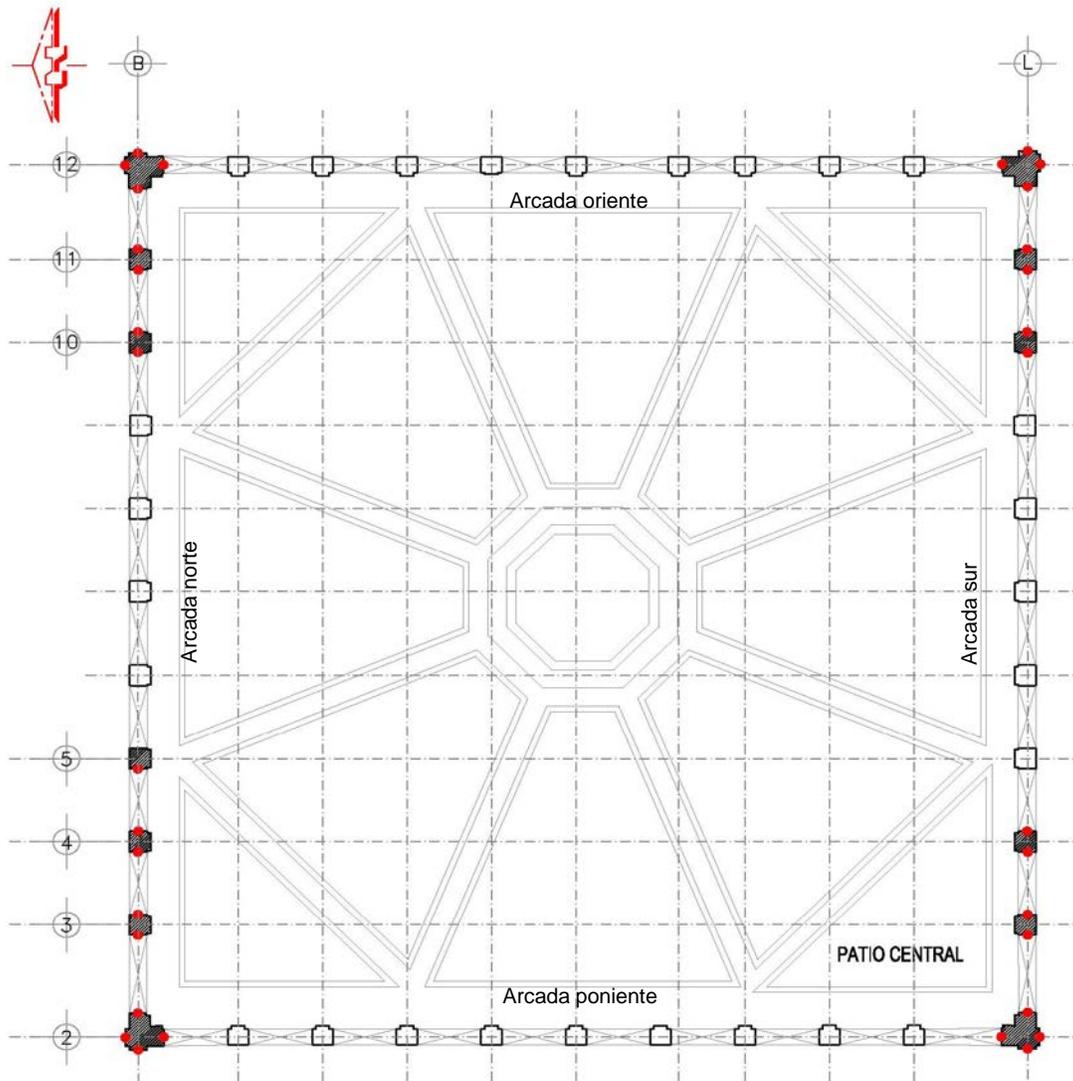


Fig. 5.7 Localización en planta de los índices colocados en columnas del Patio Central.

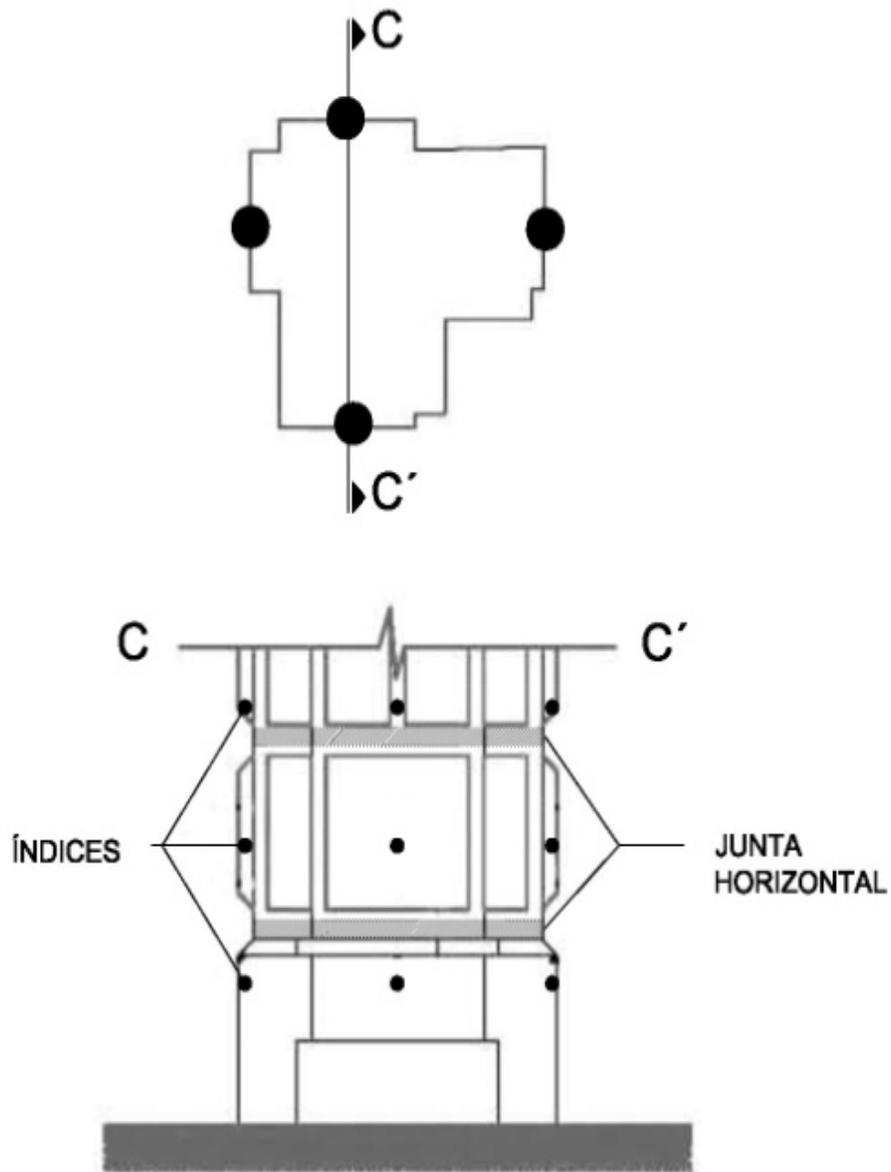
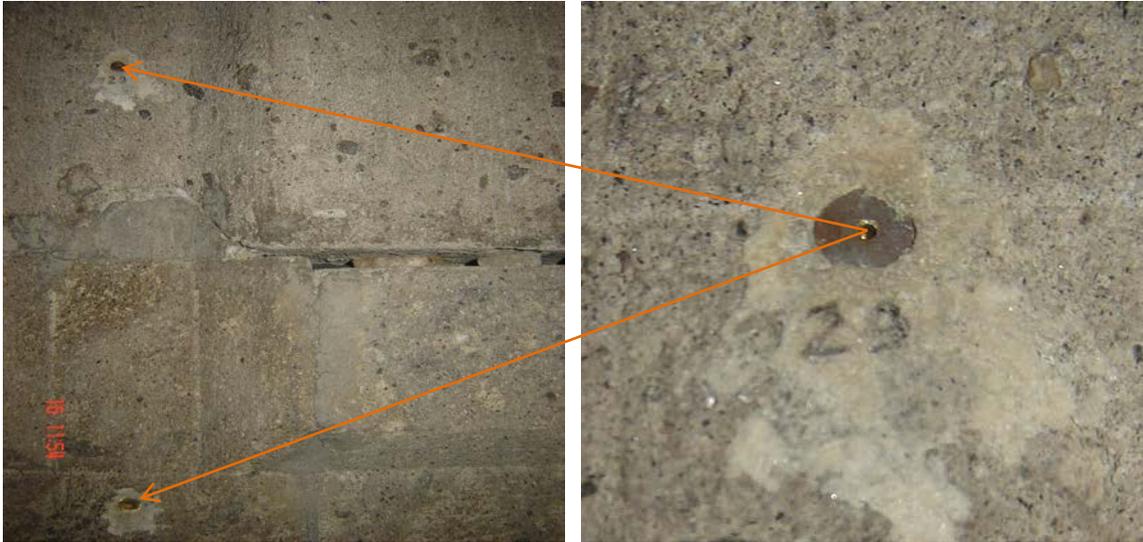


Fig.5.8 Localización general de índices en columnas. Se tienen diferentes arreglos de índices, de acuerdo a las condiciones de las juntas en cada columna instrumentada.



a)



b)

Fig. 5.9 a) Índices (puntos de referencia fijos), para la medición de la abertura de una junta horizontal entre dos hiladas consecutivas de sillares en una columna típica; b) lectura con extensómetro digital apoyado sobre dos índices.

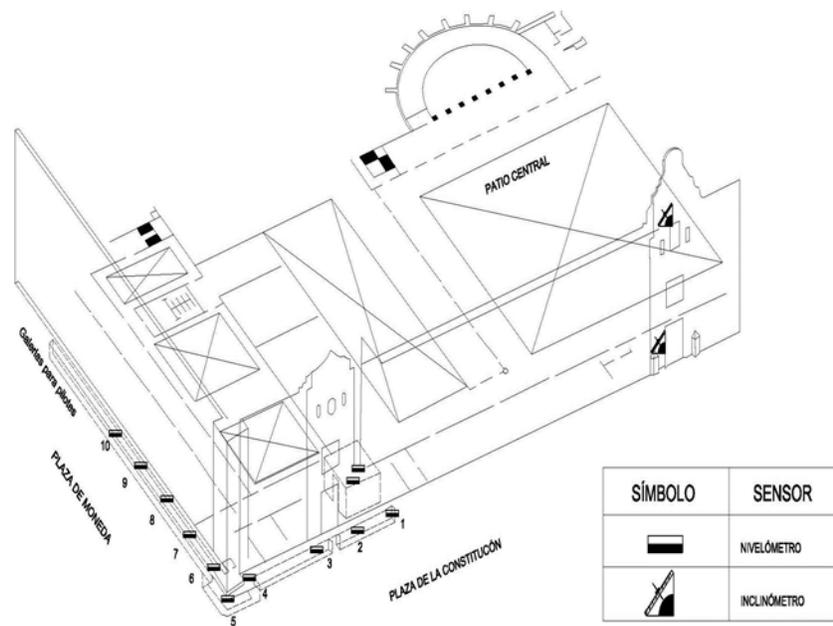


Fig. 5.10 Localización del sistema de nivelómetros (Imagen adaptada de la Ref.20).

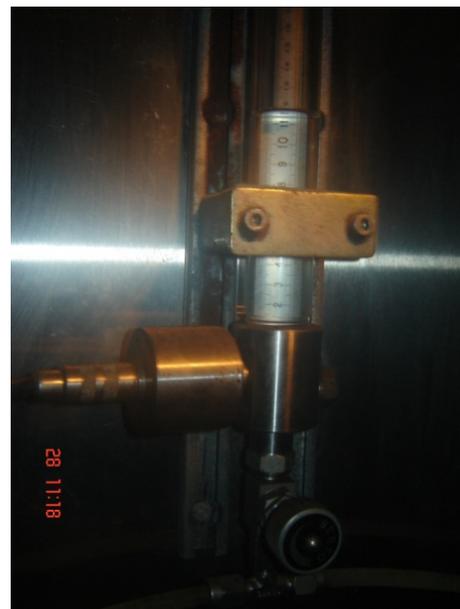


Fig. 5.11 En la imagen se puede apreciar la elevación del tirante del aceite de silicón, que permite dar seguimiento a los movimientos verticales en esta zona de la estructura.



a)



b)

Fig.5.12 a) Nivelómetro típico; b) Lectura de nivelómetro.

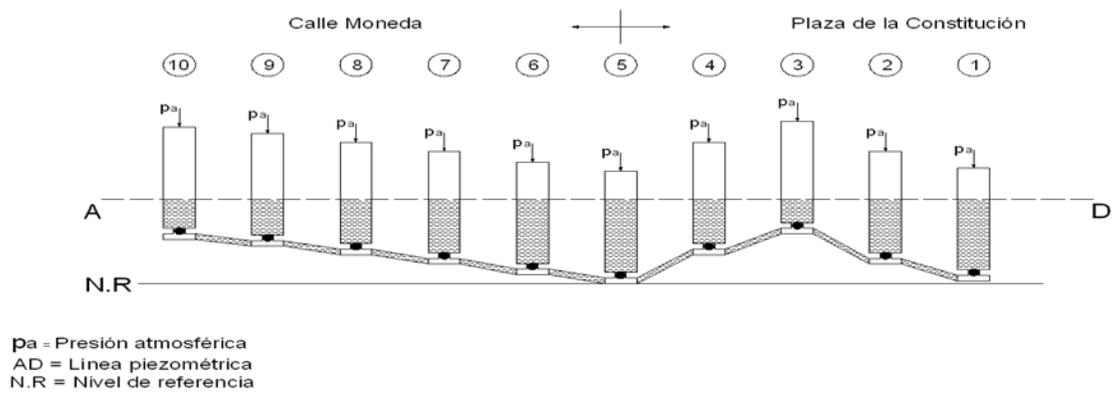
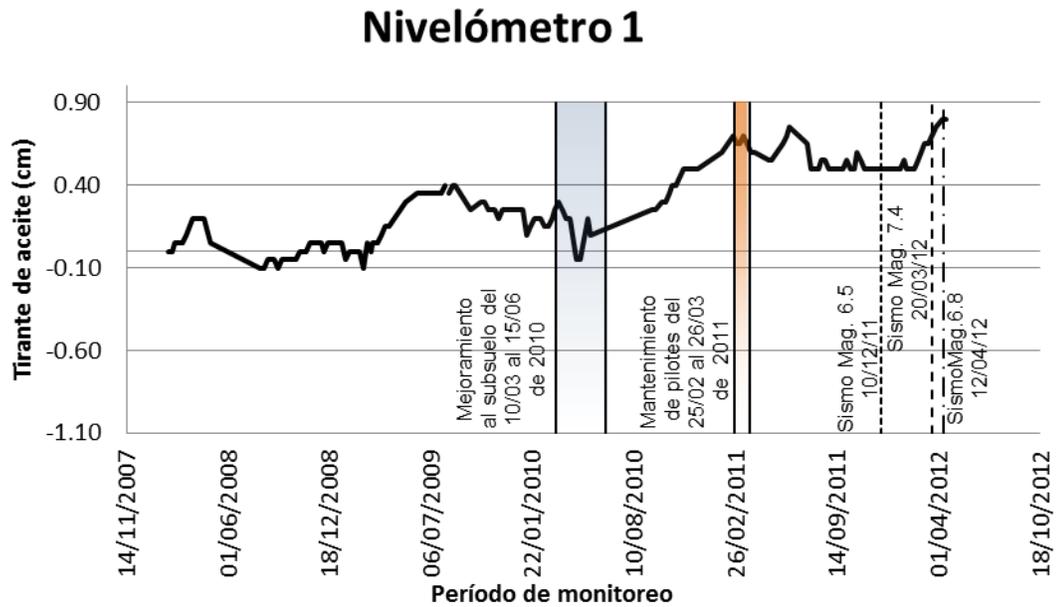
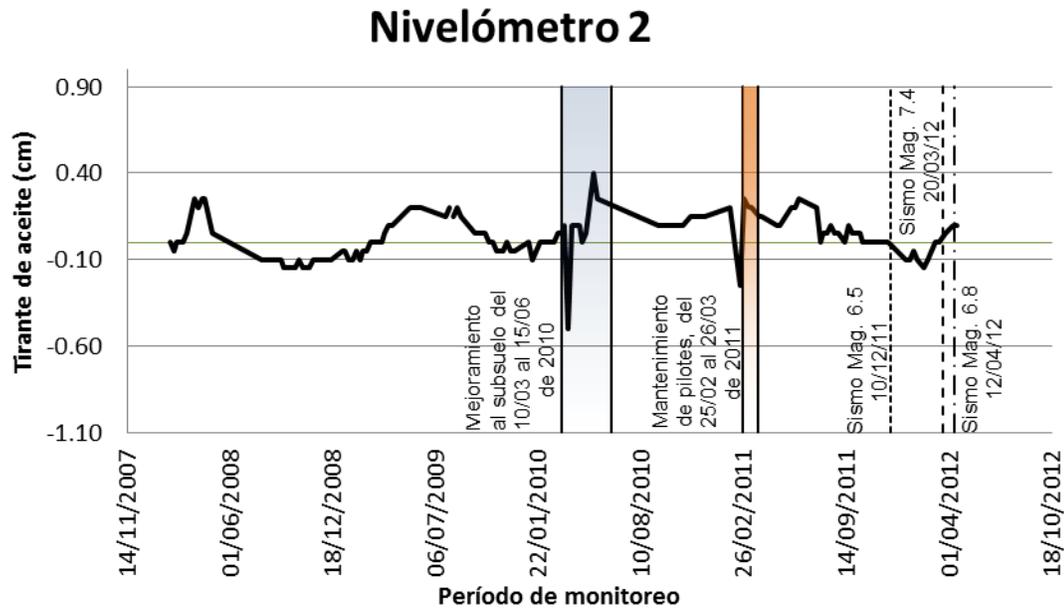


Fig.5.13 Esquema del sistema de nivelómetros (imagen tomada de la Ref.20).

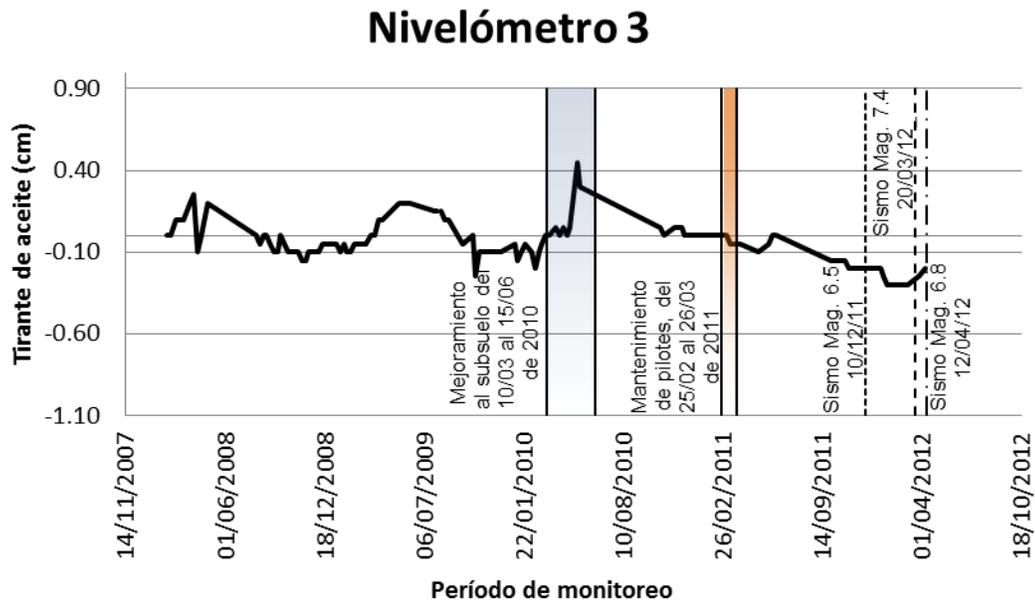


a)

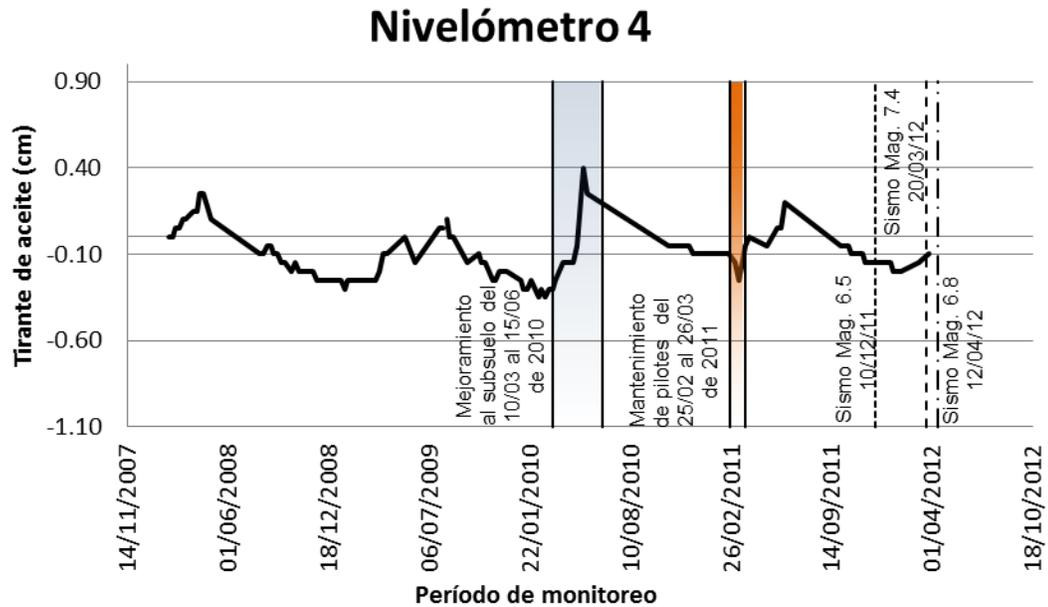


b)

Fig.5.14 Variación del tirante de aceite a lo largo del tiempo: a) Nivelómetro 1; b) Nivelómetro 2.

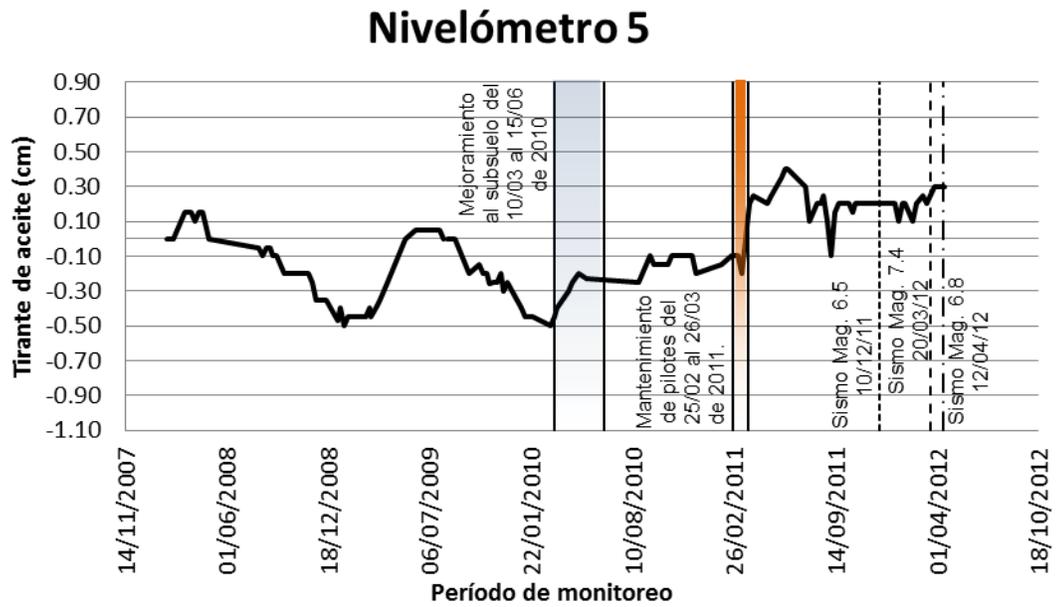


a)

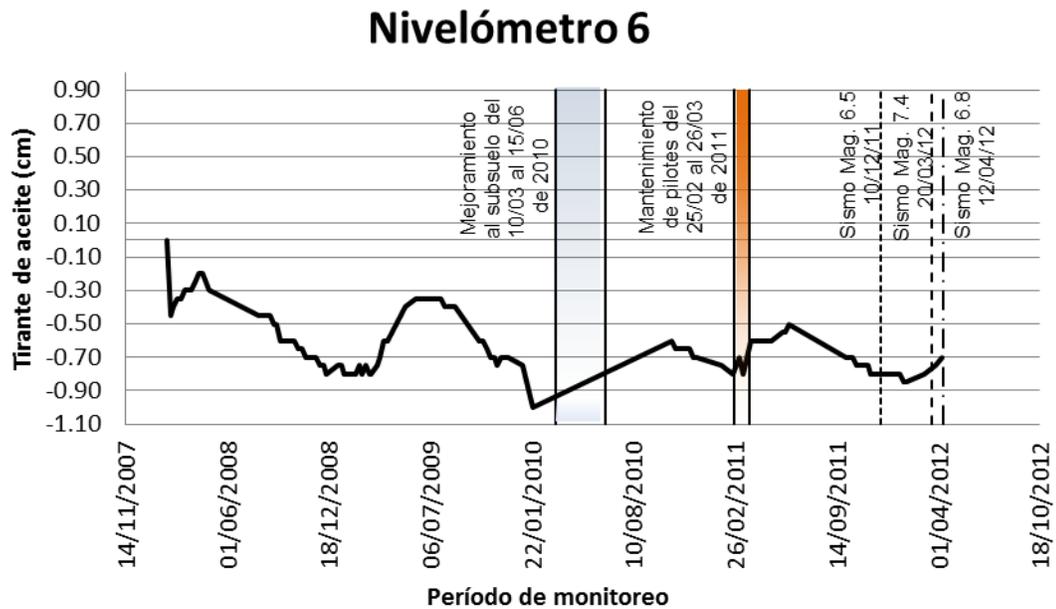


b)

Fig. 5.15 Variación del tirante de aceite a lo largo del tiempo: a) Nivelómetro 3; b) Nivelómetro 4.



a)



b)

Fig.5.16 Variación del tirante de aceite a lo largo del tiempo:a) Nivelómetro 5; b) Nivelómetro 6.

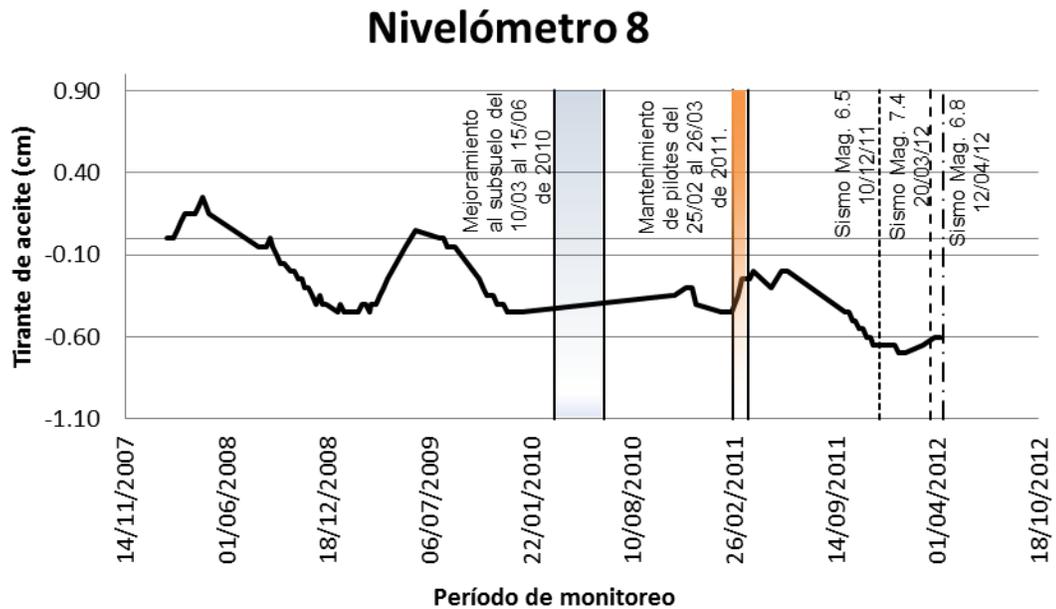
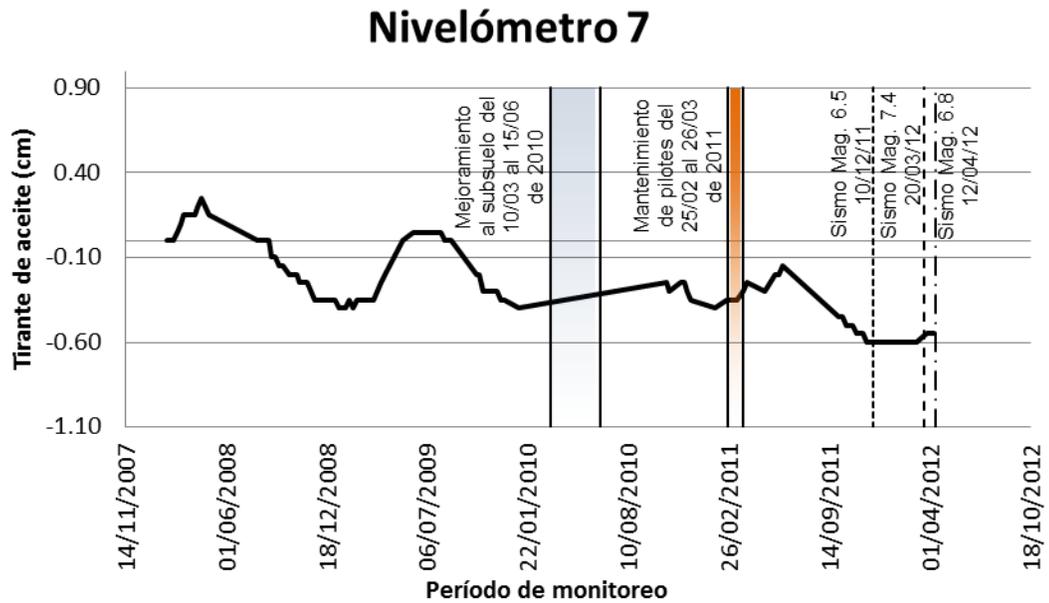
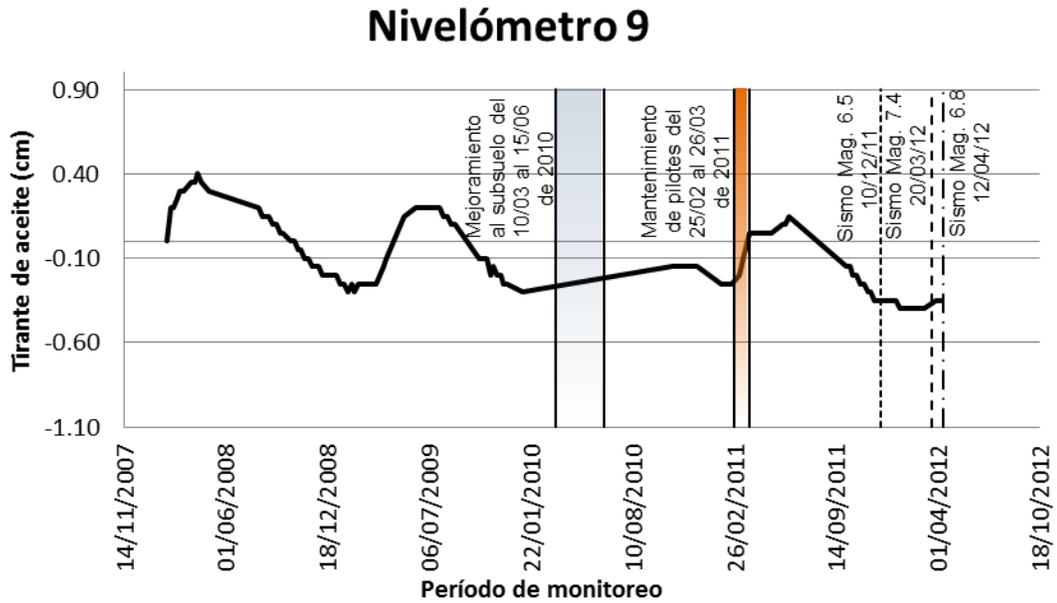
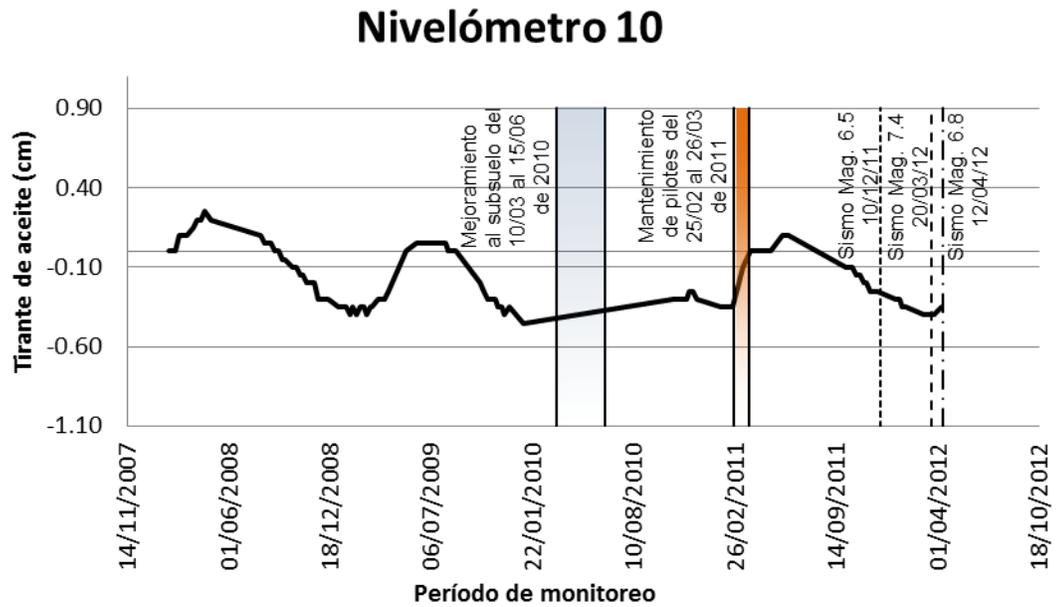


Fig. 5.17 Variación del tirante de aceite a lo largo del tiempo: a) Nivelómetro 7; b) Nivelómetro 8.



a)



b)

Fig. 5.18 Variación del tirante de aceite a lo largo del tiempo: a) Nivelómetro 9; b) Nivelómetro 10.

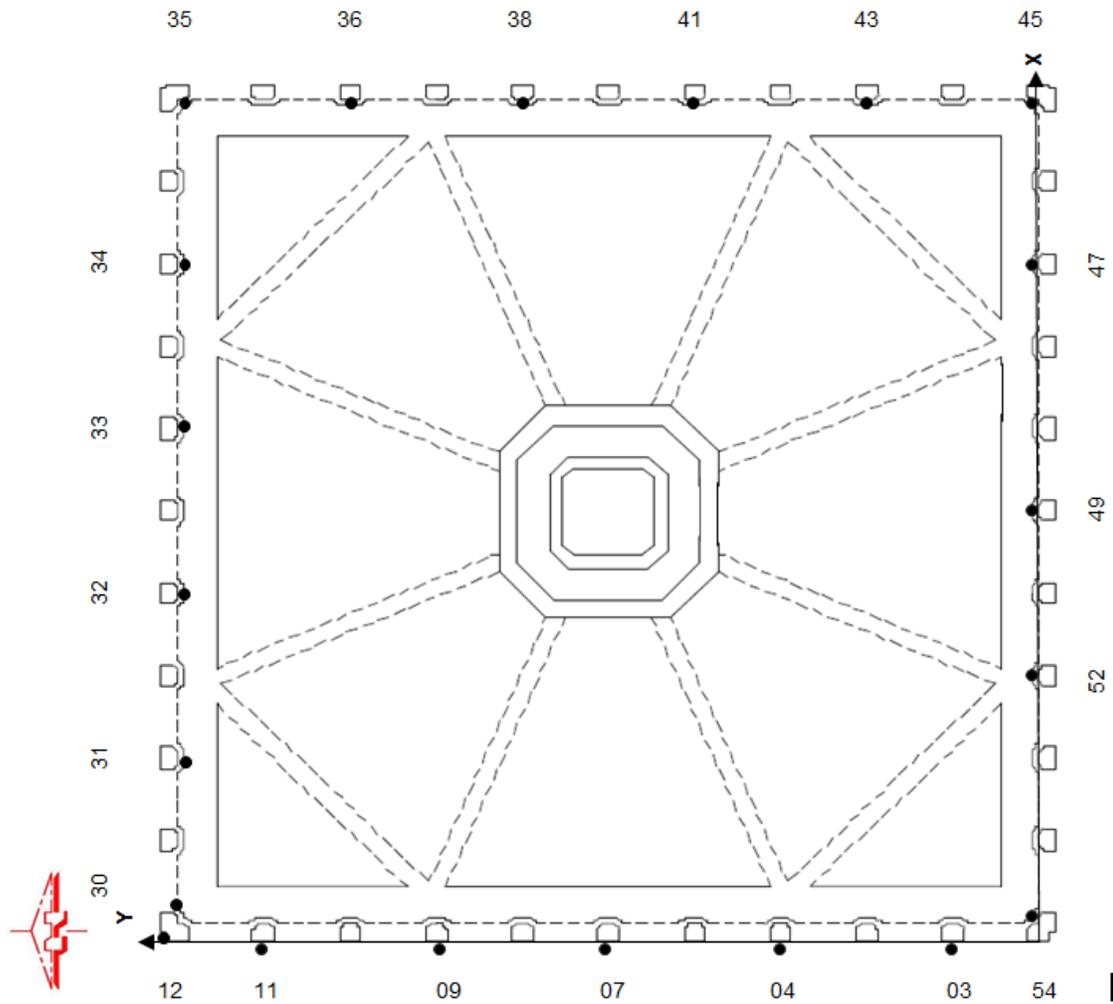
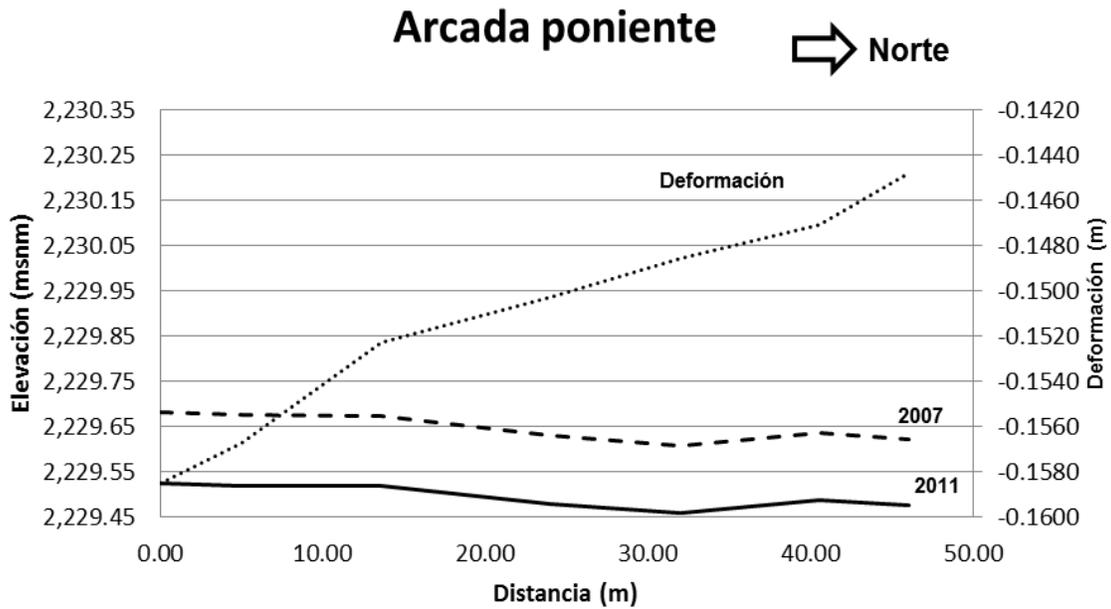
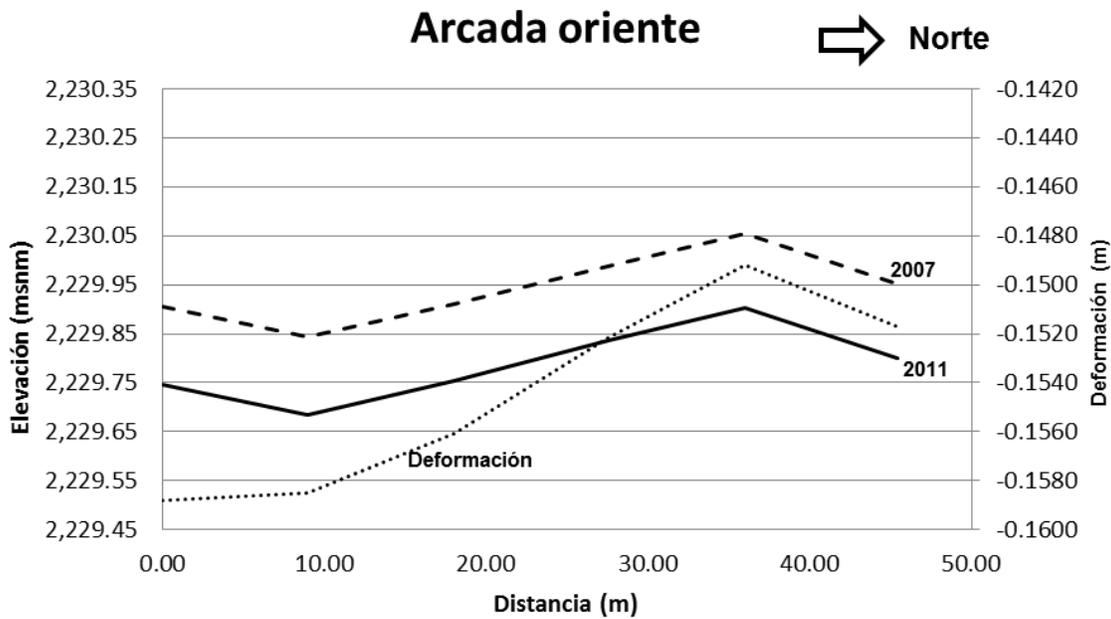


Fig. 5.19 Localización en planta de los puntos de nivelación topográfica. El sentido de las gráficas va de sur a norte para las arcadas poniente y oriente, y de poniente a oriente para las arcadas norte y sur.

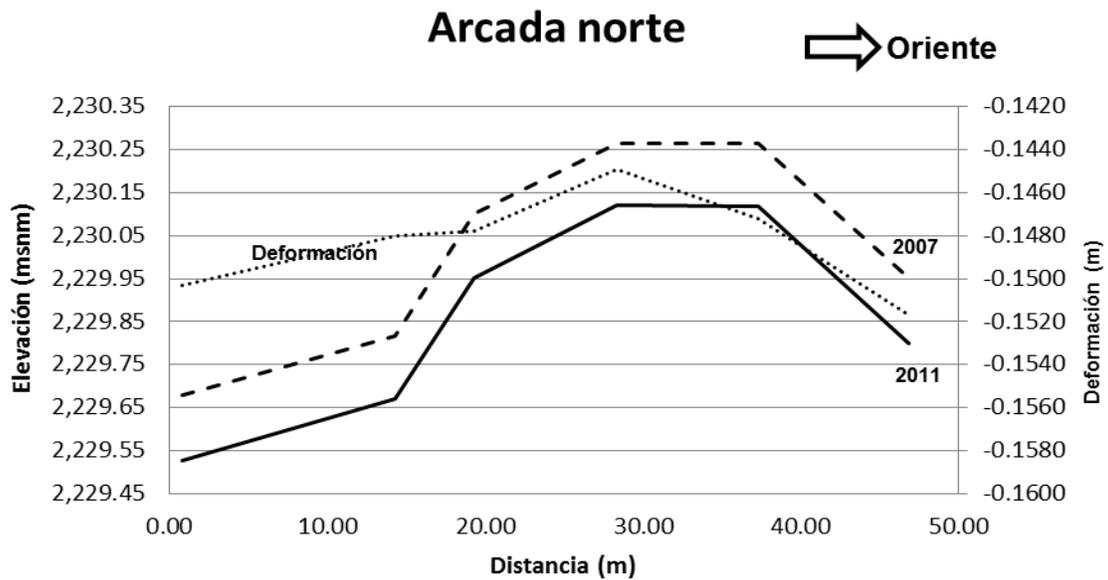


a)

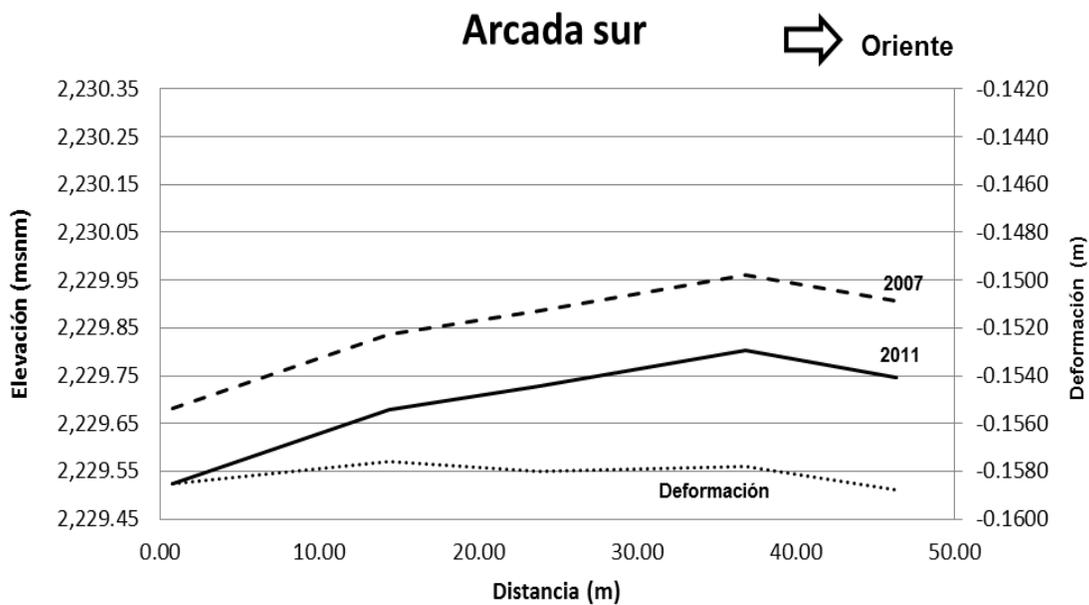


b)

Fig. 5.20 Nivelaciones topográficas y deformación de la base de las arcadas del patio central entre diciembre de 2007 y abril de 2011; a) Arcada poniente; b) Arcada oriente.



a)



b)

Fig. 5.21 Nivelaciones topográficas y deformación de la base de las arcadas del patio central entre diciembre de 2007 y abril de 2011; a) Arcada norte; b) Arcada sur.

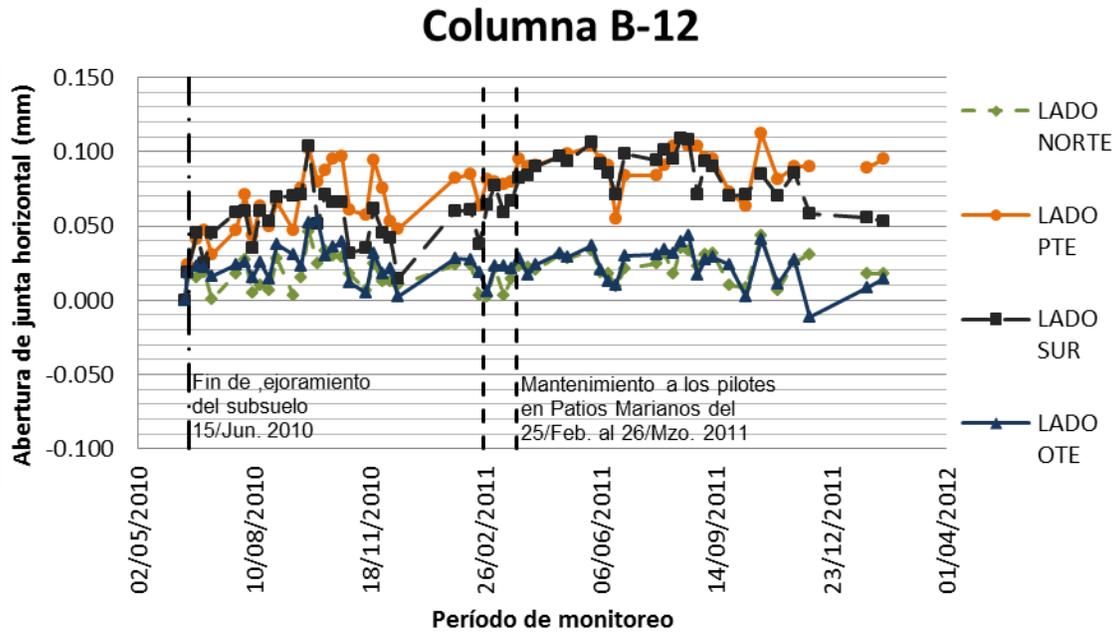


Fig. 5.22 Variación del espesor de las juntas en columna B12 a lo largo del tiempo.

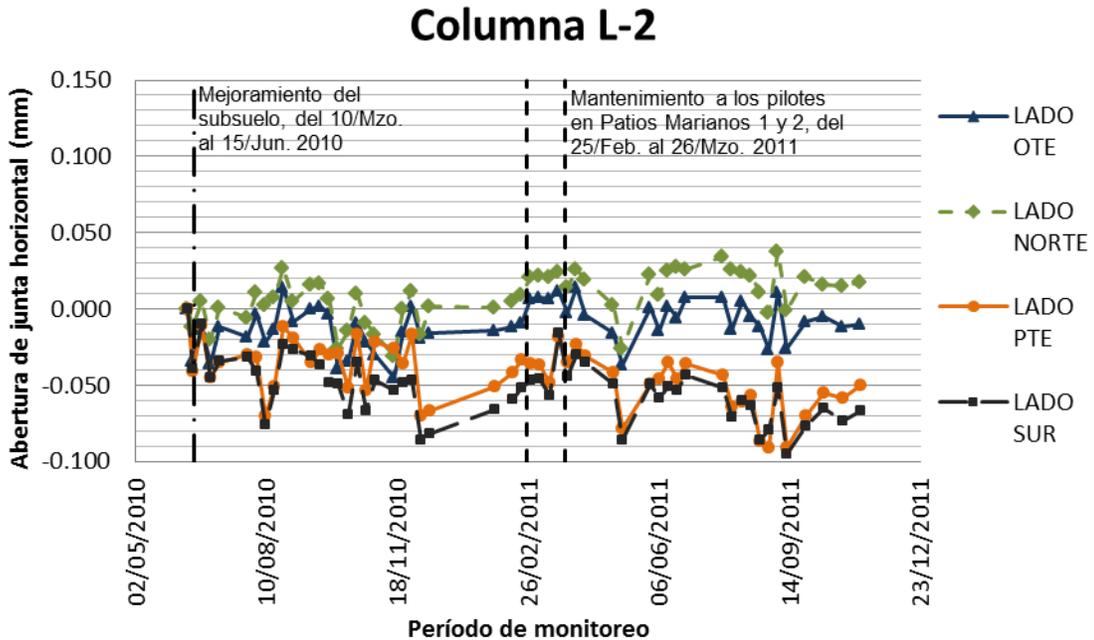


Fig. 5.23 Variación del espesor de las juntas en columna L2 a lo largo del tiempo.

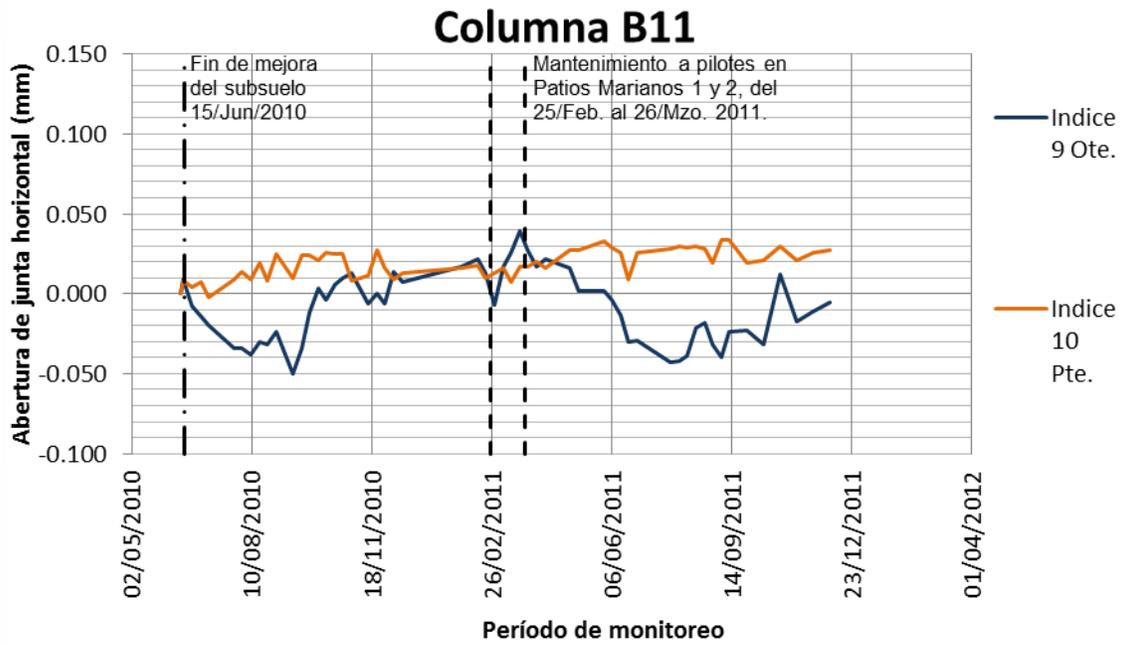


Fig. 5.24 Variación del espesor de la junta en la columna B11.

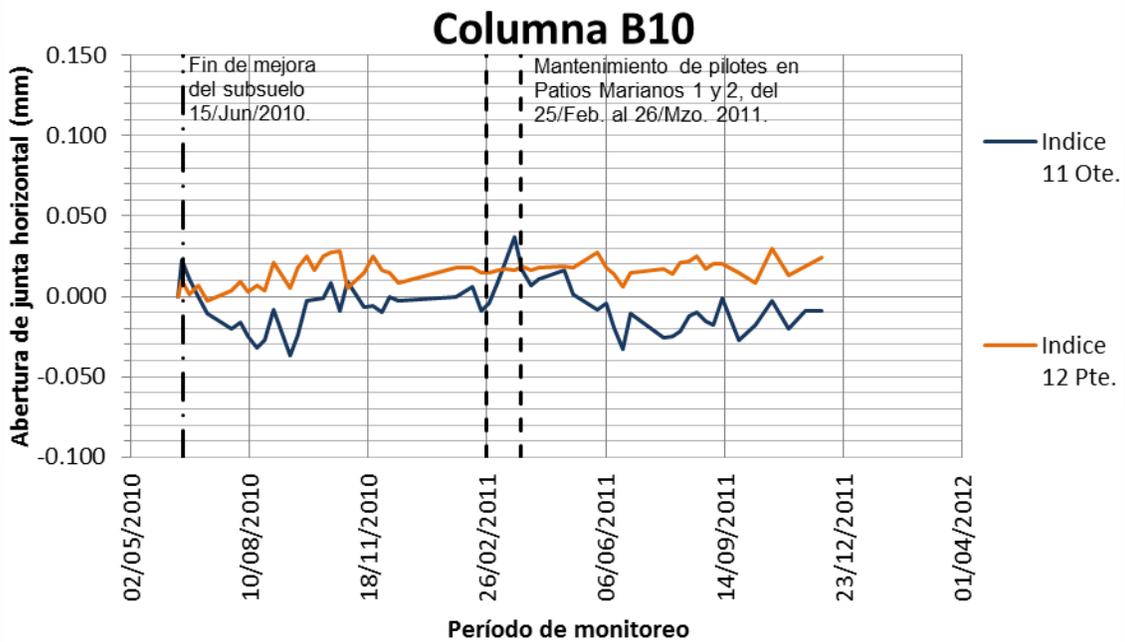


Fig. 5.25 Variación del espesor de la junta en la columna B10.

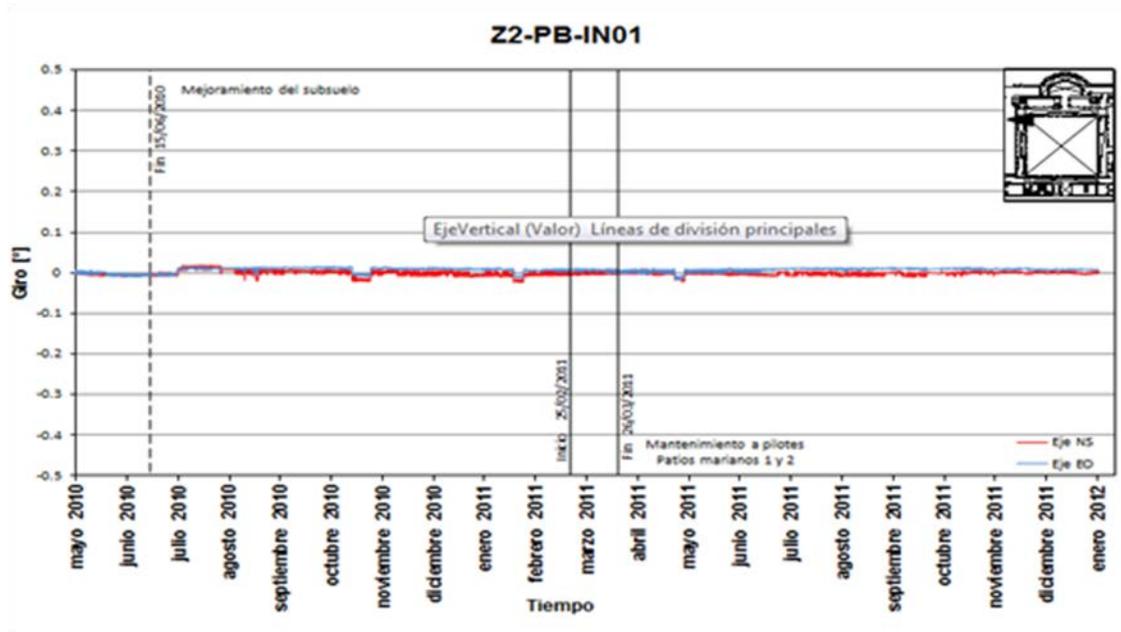


Fig. 5.26 El inclinómetro 01 muestra que la inclinación en el eje oriente-poniente es apenas un poco mayor que en el eje norte-sur, en el cual, ésta es casi nula.

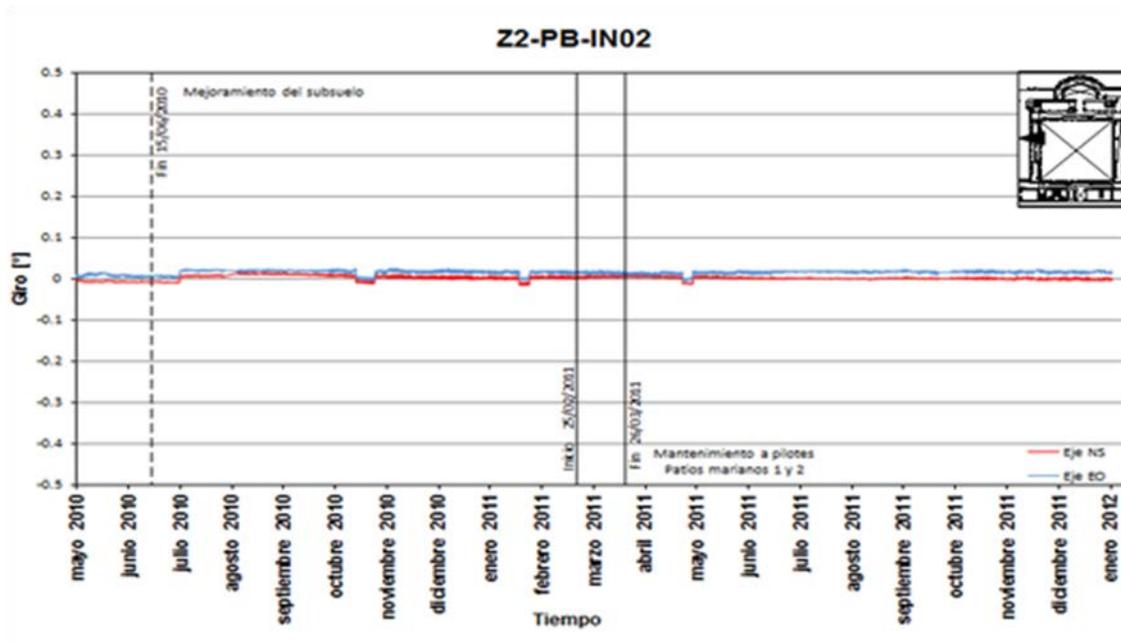


Fig. 5.27 El inclinómetro 02 también presenta inclinación casi nula en el eje norte-sur; en el eje perpendicular a éste se observa que la inclinación es en dirección oriente.

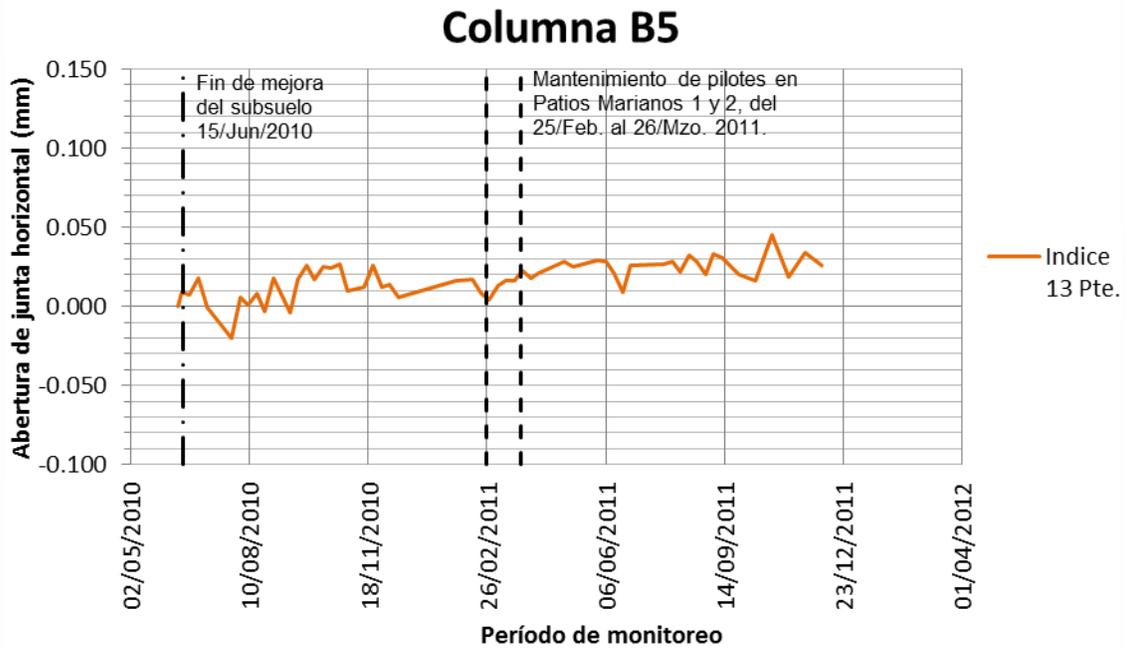


Fig. 5.28 Variación del espesor de la junta horizontal en la cara poniente de la columna B5.

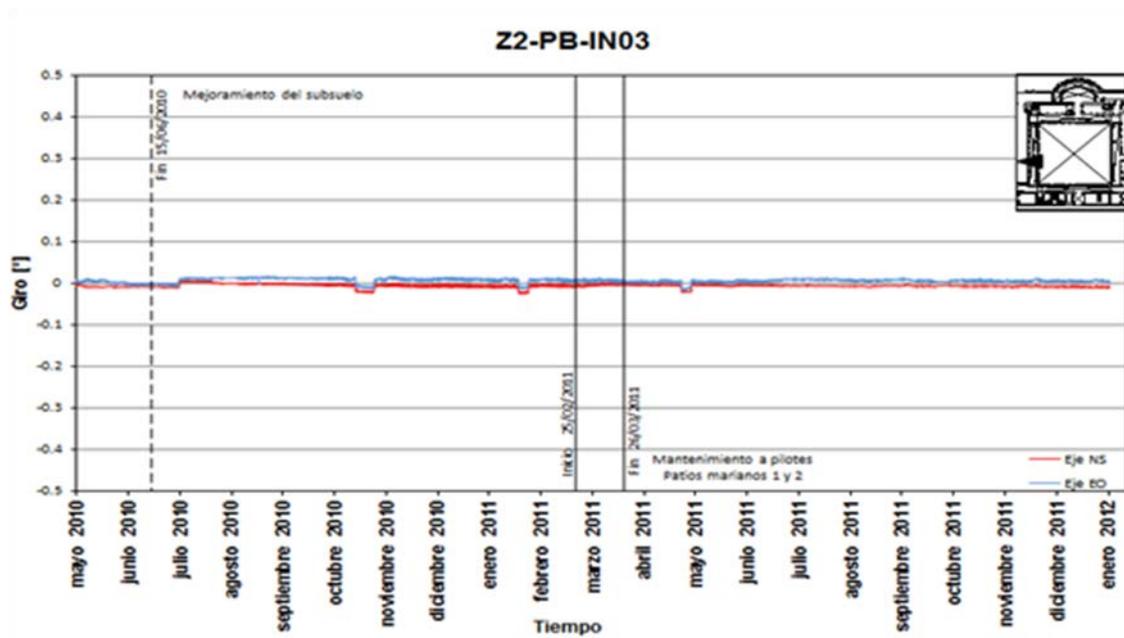


Fig. 5.29 Aunque la inclinación medida en este inclinómetro también es marginal, se puede observar que ésta es en dirección sur, principalmente.

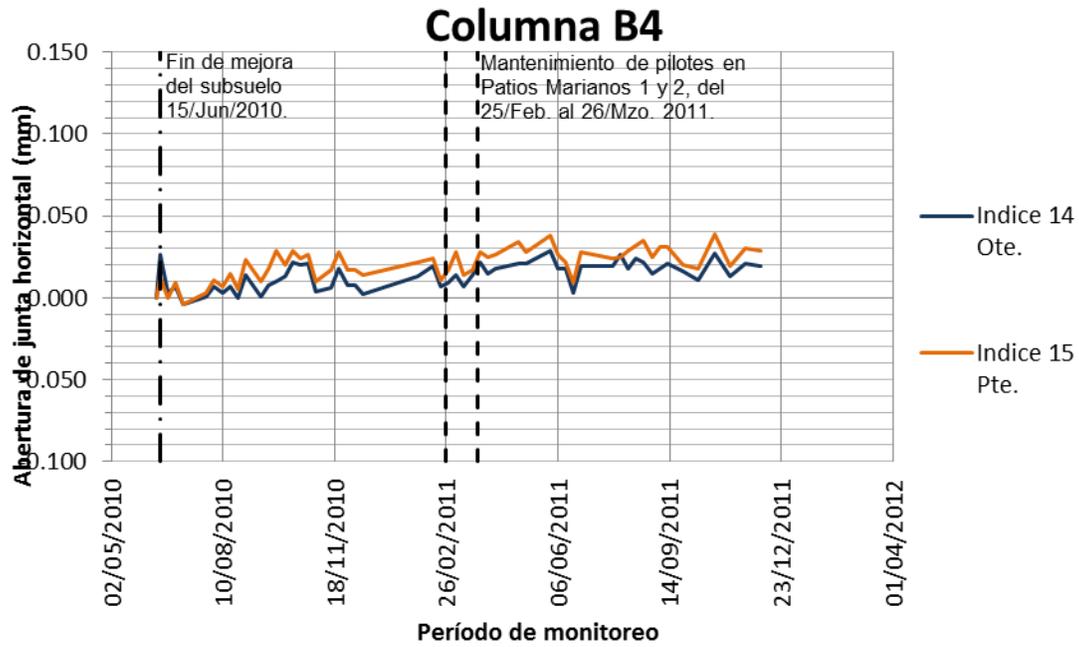


Fig. 5.30 Variación del espesor de la junta en la columna B4.

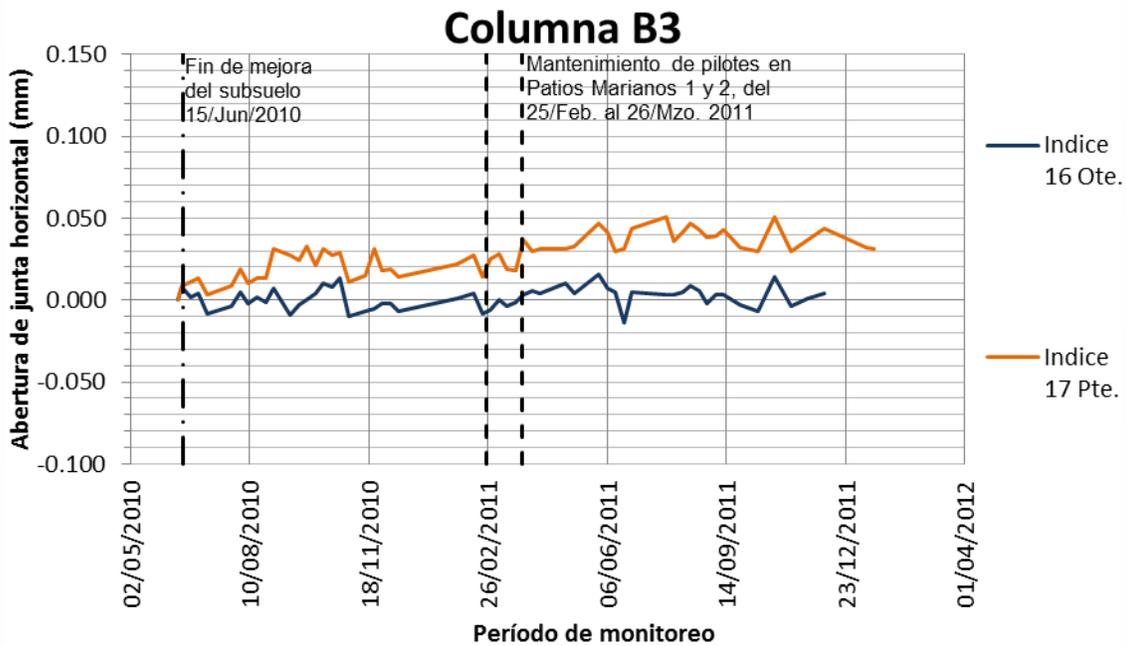


Fig. 5.31 Variación del espesor de la junta en columna B3.

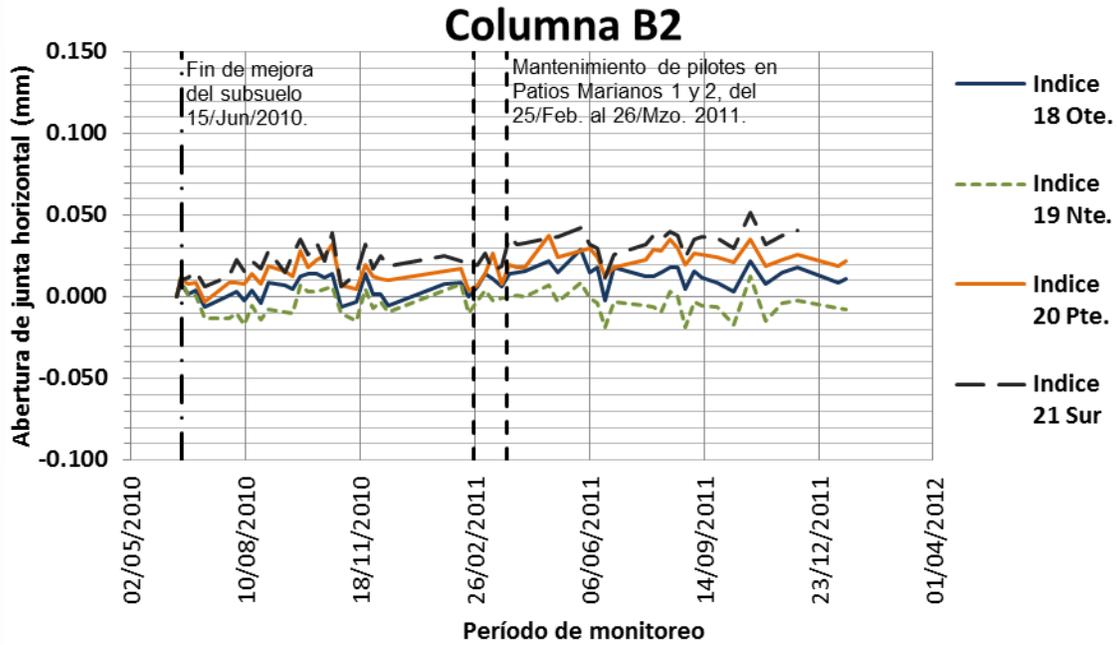


Fig. 5.32 Variación del espesor de la junta en columna B2.

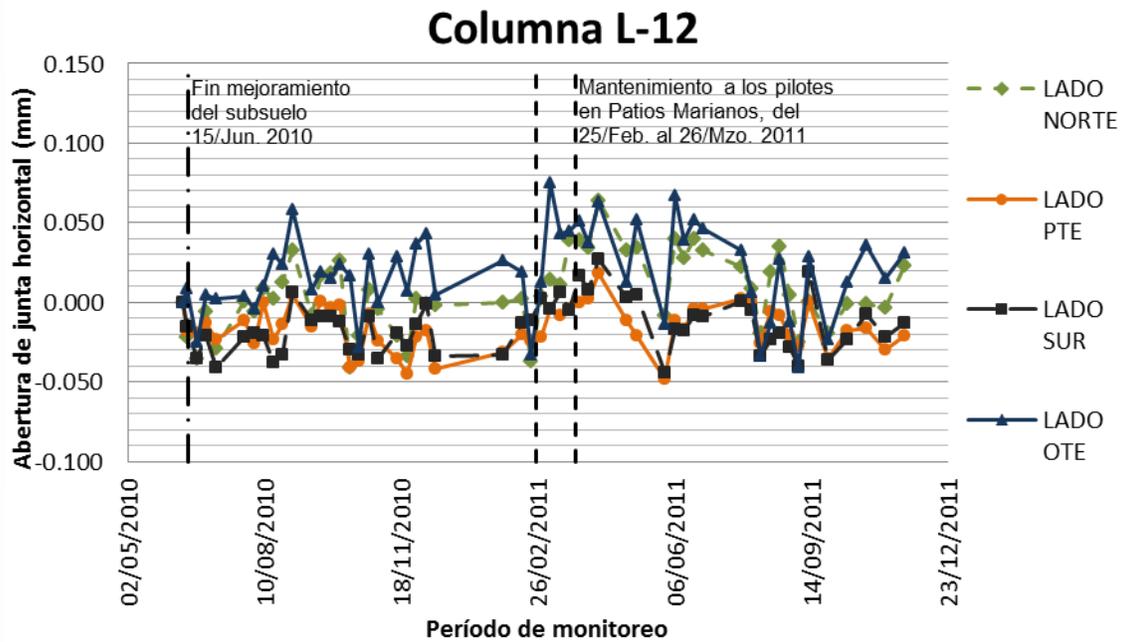


Fig. 5.33 Variación del espesor de las juntas en columna L12.

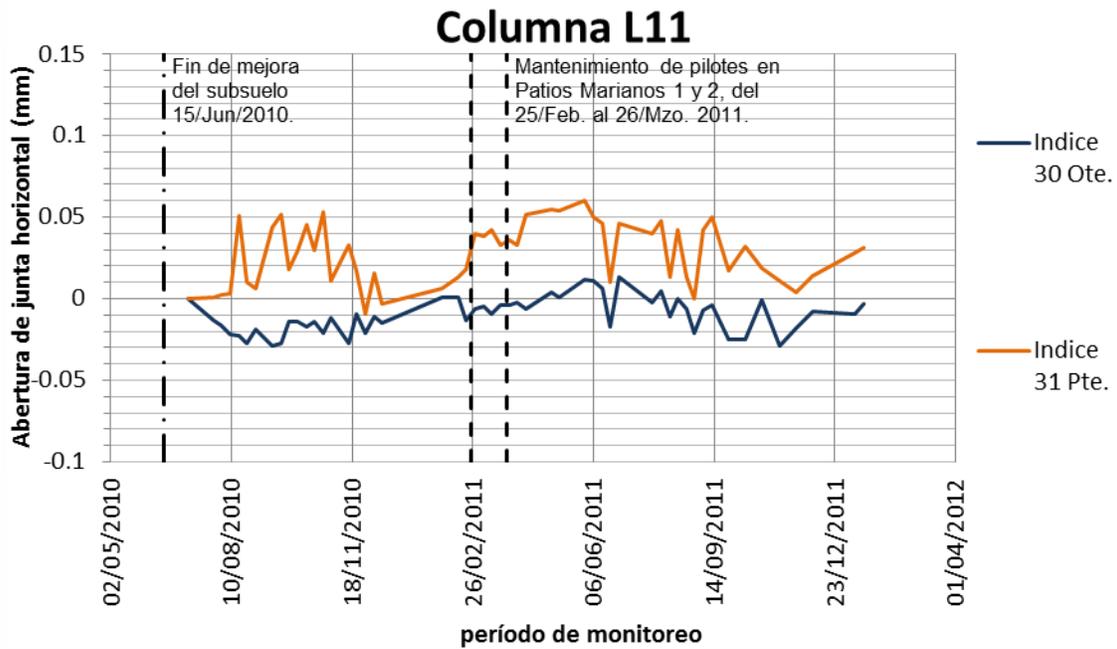


Fig. 5.34 Variación del espesor de las juntas en columna L11.

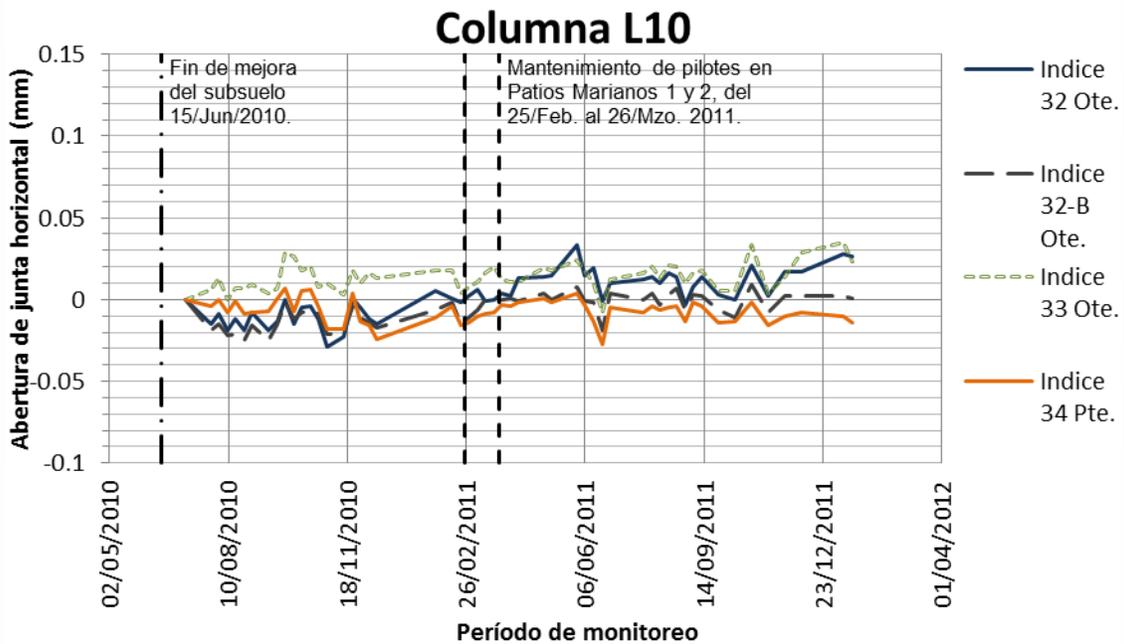


Fig. 5.35 Variación del espesor de la junta en columna L10.

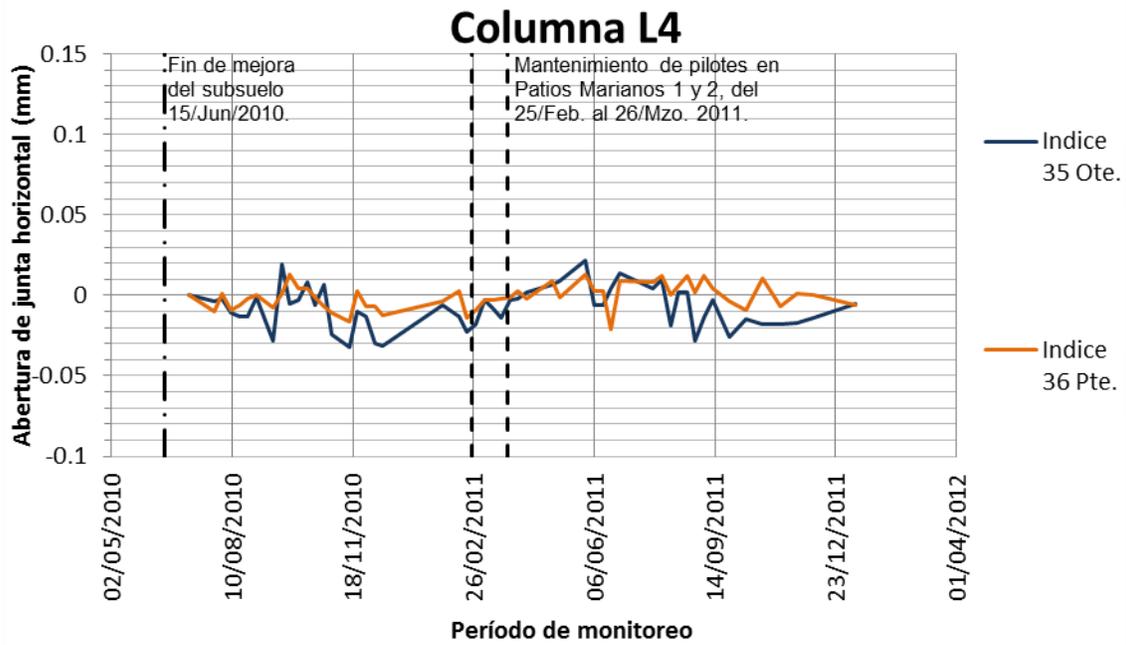


Fig. 5.36 Variación del espesor de la junta en columna L4.

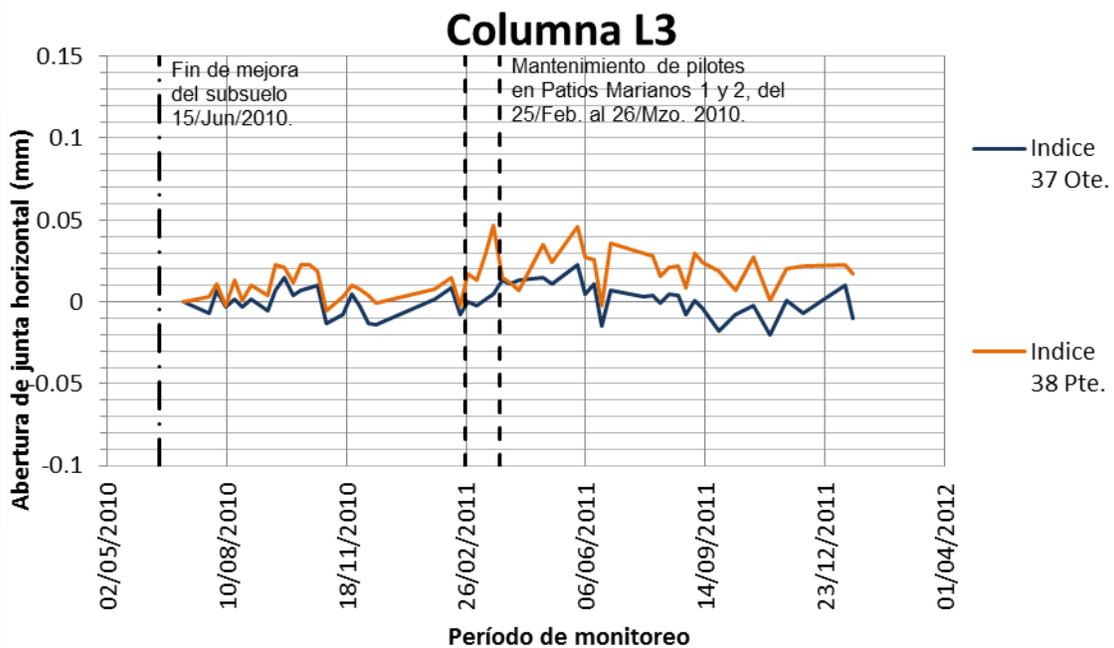


Fig. 5.37 Variación del espesor de la junta en columna L3.

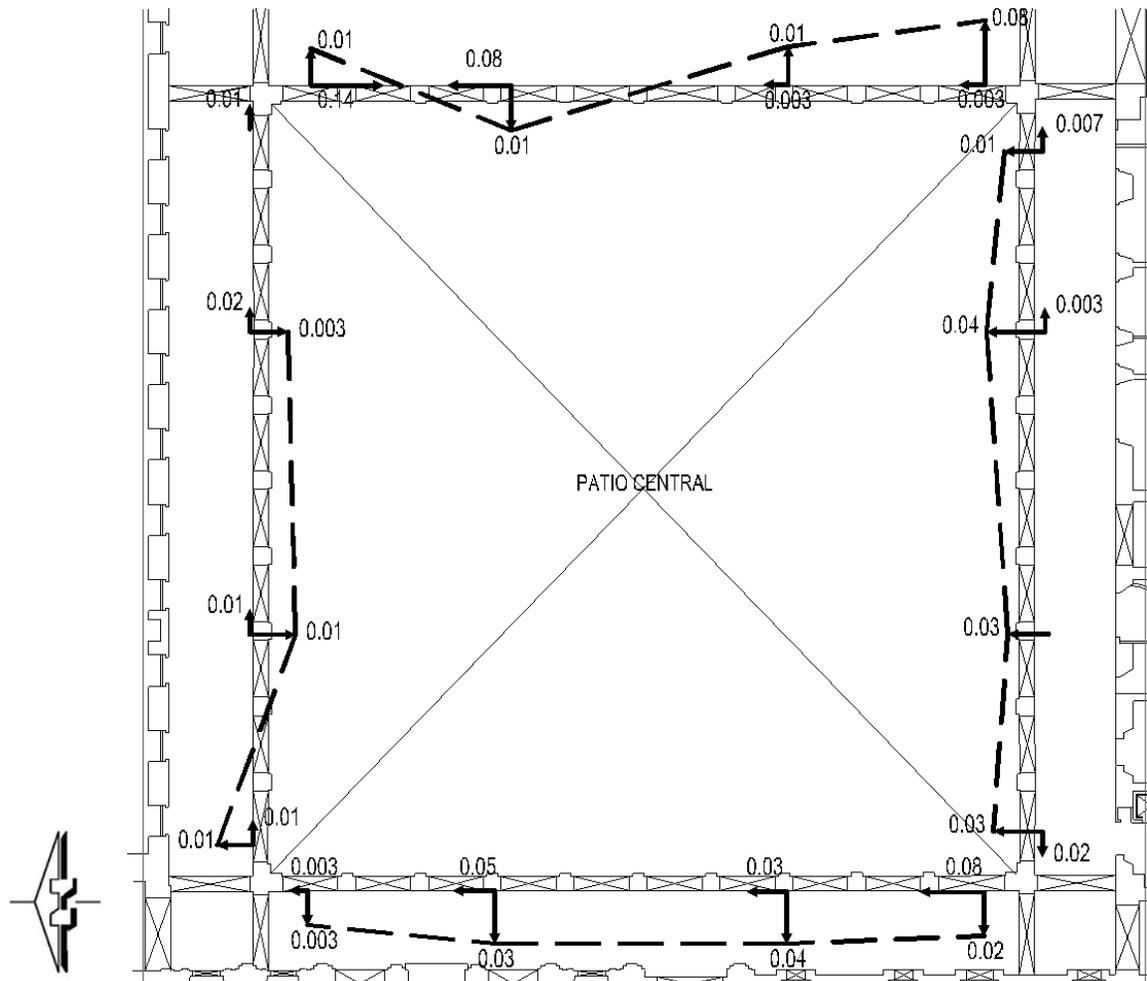


Fig.5.38 Resultados preliminares del monitoreo automático en la zona 2, durante el período del 01 de septiembre de 2010 al 30 de abril de 2012. La inclinación está expresada en porcentaje.