



## **INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA**

### **Instrumentación sísmica en México**

México es un país que cuenta con un elevado potencial sísmico, por lo que el estudio del fenómeno telúrico así como sus efectos en seres humanos, suelos y estructuras es de vital importancia. La coordinación de Instrumentación sísmica ha puesto particular interés en el desarrollo de proyectos para el registro de temblores en zonas de alto riesgo sísmico o en núcleos de población que puedan ser severamente afectados.

La instrumentación sísmica para el registro de temblores fuertes se inició a principios de los años sesenta con la instalación de los primeros dos acelerógrafos, uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria.

Dos meses antes de la ocurrencia de los macrosismos de septiembre de 1985, el Instituto de Ingeniería había instalado la Red de Guerrero y además contaba con ocho instrumentos en el valle de México. Esto ayudó al desarrollo de la ingeniería sísmica en México, debido a que se registró, por primera vez, un temblor de gran magnitud muy cerca de la zona epicentral y se obtuvieron registros en la ciudad de México que mostraban grandes efectos de amplificación del movimiento sísmico a una distancia de 400 km del epicentro.

Han pasado 15 años de los eventos de septiembre de 1985 y la coordinación de Instrumentación sísmica ha realizado un vigoroso y constante esfuerzo para operar, mantener y actualizar la instrumentación sísmica existente, así como para instalar nuevas redes acelerográficas en regiones que no contaban con esta cobertura.

La Coordinación de Instrumentación sísmica, a cargo del M en I Leonardo Alcántara Nolasco, está integrada por un investigador, 13 técnicos académicos y 10 becarios.

Puede decirse que su mayor fortaleza está en el trabajo de grupo que se realiza, lo que también ha permitido tener una relación muy estrecha para el desarrollo de proyectos conjuntos con las coordinaciones de Mecánica aplicada, Estructuras, Geotecnia e Ingeniería sísmológica.

La Coordinación de Ingeniería sísmica ha contado con el patrocinio de instituciones como el Gobierno del Distrito Federal, la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, la Comisión Nacional de Aguas y el CONACYT. Permanentemente se realizan gestiones para la consecución de recursos que permitan mantener operando ininterrumpidamente la que hoy en día representa la red de monitoreo de temblores fuertes más importante del país.

### **Líneas de Investigación**

Las principales líneas de investigación de este grupo de trabajo son:

- ✓ Instalación, operación y mantenimiento de redes acelerográficas de campo libre. Se operan aproximadamente 100 estaciones sísmicas, las cuales se encuentran ubicadas a lo largo de la franja costera del Pacífico, donde se localiza la zona de subducción mexicana. En la actualidad, se tiene una cobertura continua que va desde la estación de Caleta de Campos, en el estado de Michoacán, hasta la estación de Niltepec en el Istmo de Tehuantepec. Esta infraestructura se complementa con arreglos instrumentales que van de la costa hacia el interior del continente, los cuales también son conocidos como líneas de atenuación del movimiento sísmico. Adicionalmente, se mantienen operando redes en las ciudades de Acapulco, Chiapas, Puebla y Oaxaca así como en el valle de México, algunas de ellas complementadas con equipos de pozo profundo como en el caso de las ciudades de México y Acapulco.
- ✓ Instrumentación de estructuras. Se tienen instrumentados, en la ciudad de México, cuatro edificios de concreto reforzado, dos de ellos ubicados en una zona que presentó un elevado índice de daños durante los sismos de 1985; además se tiene prevista la instrumentación de un edificio en Acapulco. Por otro lado, y con el objetivo de estudiar la vulnerabilidad sísmica del sistema Cutzamala, se tiene instrumentado un tramo de la tubería enterrada, así como la Catedral Metropolitana de la ciudad de México y se realiza el monitoreo de las presas el Guineo, en Guerrero y Trigomil en Jalisco, mediante convenios con la CNA
- ✓ Procesamiento de acelerogramas. Son relevantes las actividades de procesamiento, catalogación y distribución de los registros de aceleración, obtenidos en las redes sísmicas,

debido a que son datos fundamentales para las investigaciones que se realizan en el Instituto sobre el fenómeno sísmico. El procesamiento de acelerogramas se ha desarrollado con base en la experiencia acumulada durante 40 años de registro sísmico. La coordinación de Instrumentación sísmica es eje fundamental del grupo conocido como Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, el cual integra a las instituciones del país que operan las principales redes de registro de movimientos fuertes, como son el propio Instituto de Ingeniería, el CENAPRED, la CFE-GIEC, el CIRES, el CICESE, el RIIS y el Instituto de Geofísica de la UNAM

- ✓ Desarrollo de nuevas tecnologías de registro sísmico. Se ha implantado un sistema de registro sísmico conocido como el acelerógrafo digital ADII y aún cuando no se ha comercializado, sí ha permitido actualizar varios de los equipos existentes. Paralelamente, se han realizado diversos desarrollos para mejorar los sistemas de registro con que se cuenta. Asimismo, se han instrumentado sistemas de interrogación remota por medio de telefonía de línea y celular, adaptando los avances de la tecnología actual a instrumentación que data de los años ochenta.
- ✓ Instalación y operación de redes sísmicas temporales. Estas actividades están ligadas a proyectos de investigación de corta duración y normalmente se ejecutan con la colaboración de las diferentes coordinaciones de la subdirección de estructuras del Instituto de Ingeniería.
- ✓ Instalación, operación y mantenimiento de redes sismológicas con transmisión vía telemétrica. Durante 20 años la Coordinación de Instrumentación sísmica operó la red SISMEX, siendo esta la única que registró con éxito los sismos de septiembre de 1985. Aunque la operación de la misma ha sido transferida a la Coordinación de Ingeniería sismológica, se continúa participando con asesoramiento y colaboración en la ejecución de proyectos

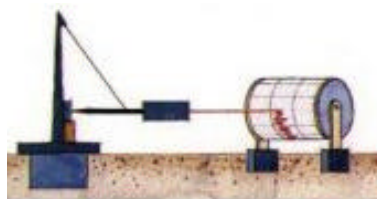
## MEDICIÓN DE TERREMOTOS

Se realiza a través de un instrumento llamado sismógrafo, el que registra en un papel la vibración de la Tierra producida por el sismo (sismograma). Nos informa la magnitud y la duración.

Este instrumento registra dos tipos de ondas: las superficiales, que viajan a través de la superficie terrestre y que producen la mayor vibración de ésta (y probablemente el mayor daño) y las centrales o corporales, que viajan a través de la Tierra desde su profundidad.

La secuencia típica de un terremoto es: primero el arribo de un ruido sordo causado por las ondas ("P") compresivas, luego las ondas ("S") cortantes y finalmente el "retumbar" de la tierra causado por las ondas superficiales

## SISMÓGRAFOS



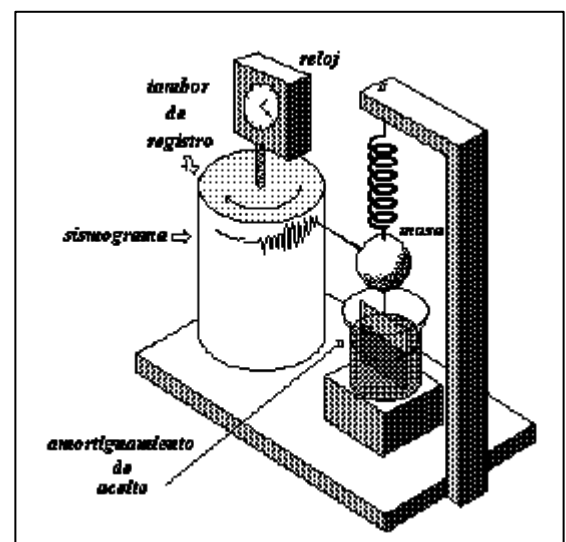
Sismógrafo tradicional

Los sismógrafos fueron ideados a fines del siglo pasado y perfeccionados a principios del presente. En la actualidad, estos instrumentos han alcanzado un alto grado de desarrollo electrónico, pero el principio básico empleado no ha cambiado como veremos a continuación.

Unos son con péndulos verticales de gran peso, que inscriben el movimiento por medio de una aguja o estilete, sobre un papel ahumado. Otros son horizontales y al oscilar por la sacudida sísmica

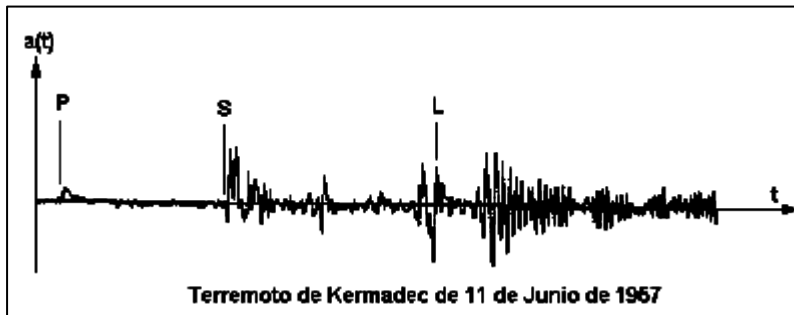
El instrumento esencial para estudiar los temblores es el sismógrafo. Este es un aparato que registra el movimiento del suelo causado por el paso de una onda sísmica.

Los sismógrafos fueron ideados a fines del siglo pasado y



trazan un gráfico con una aguja sobre un papel ahumado arrollado a un tambor o cilindro que gira uniformemente.

Para registrar el movimiento del suelo es necesario referirlo a un punto fijo en el espacio; si quisiéramos referirlo a un punto anclado al mismo suelo nos sería imposible obtener un registro puesto que el punto también se movería junto con el suelo al que está anclado. Para salvar esta dificultad, podemos recurrir al principio de inercia de los cuerpos, como sabemos este principio nos dice que todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento o a variar su velocidad. Así, el movimiento del suelo puede ser medido con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento que le permita permanecer en reposo por algunos instantes con respecto al suelo. El mecanismo consiste usualmente en una masa suspendida de un resorte atado a un soporte acoplado al suelo, cuando el soporte se sacude al paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa hace que ésta permanezca un instante en el mismo sitio de reposo. Posteriormente cuando la masa sale del reposo, tiende a oscilar. Sin embargo, ya que esta oscilación posterior del péndulo no refleja el verdadero movimiento del suelo, es necesario amortiguarla. En la figura está representado un aparato en el que el amortiguamiento se logra por medio de una lámina sumergida en un líquido (comúnmente aceite). Este era el método utilizado en los aparatos antiguos, actualmente se logra por medio de bobinas o imanes que ejercen las fuerzas amortiguadoras de la oscilación libre de la masa.



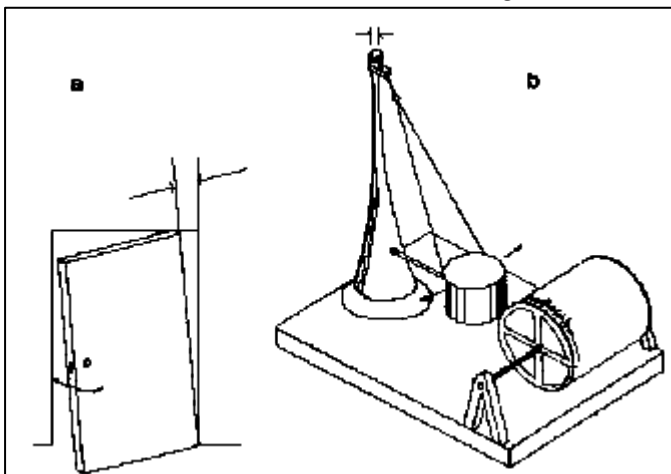
antiguos, actualmente se logra por medio de bobinas o imanes que ejercen las fuerzas amortiguadoras de la oscilación libre de la masa.

Si se sujeta un lápiz a la masa suspendida, para que pueda inscribir en un papel pegado sobre un cilindro que gira a velocidad constante, se podrá registrar una componente del movimiento del suelo (como veremos adelante los

sismógrafos reales poseen un sistema amplificador entre la masa y el papel para producir registros analizables a simple vista). El instrumento hasta aquí descrito, detecta la componente vertical del movimiento del suelo y se conoce como sismógrafo vertical. El papel donde traza el movimiento se conoce como sismograma. En la figura se muestra un sismograma típico.

El gráfico puede ser también señalado mediante un rayo de luz que incide sobre un papel fotográfico, en el cual van marcados los intervalos de tiempo por horas, minutos y segundos. Otros son péndulos invertidos llamados astáticos, constituidos por una gran masa, que permanece inmóvil, apoyada sobre un vástago.

Como el movimiento del suelo tiene lugar en las tres dimensiones del espacio, los movimientos del



suelo también tienen dos componentes horizontales. Para medir este movimiento se requiere de péndulos horizontales que oscilan como una puerta aunque con el eje ligeramente inclinado para lograr un punto de estabilidad, figura (a). El sismógrafo horizontal se representa en la figura (b).

Además del péndulo y el sistema de amortiguamiento los sismógrafos emplean un sistema de amplificación para producir registros que puedan ser analizados a simple vista. Antiguamente la amplificación se realizaba por medio de un sistema mecánico, hoy la amplificación se realiza electrónicamente.

Actualmente los sismógrafos son electromagnéticos, recogiendo el registro de los movimientos en cintas magnéticas que se pueden procesar y digitalizar por medio de computadoras.



Los sismógrafos que se emplean actualmente, en general, tienen masas que pueden ser de unos gramos hasta 100 kg., mientras que los sismógrafos antiguos de amplificación mecánica solían tener grandes masas con el fin de obtener mayor inercia y poder vencer las fuerzas de razonamiento que se originan entre las partes móviles del sistema, tal es el caso del sismógrafo horizontal Wiechert de 17 toneladas que opera en la estación sismológica de Tacubaya (México)

El movimiento del suelo con respecto a la masa se efectuaba en los primeros instrumentos por medio de una pluma o estilete que inscribía sobre un tambor giratorio. Después se introdujo la inscripción sobre película o papel fotográfico de un haz de luz reflejado en la masa o sistema amplificador del sismógrafo. Actualmente existen sismógrafos que detectan el movimiento de la masa electrónicamente y lo digitalizan para ser almacenado en cinta magnética u otros medios de almacenamiento digital.

Es oportuno aclarar en este lugar que cada instrumento, dada su frecuencia natural de oscilación y su sistema de magnificación, detecta a cada una de las muchas frecuencias que componen una onda sísmica de diferente manera y es necesario conocer con detalle que magnificación le da el instrumento a cada una para calcular el movimiento real del suelo a partir de los sismogramas. Si esta información se ha determinado para un instrumento dado se dice que este está calibrado o que se conoce la respuesta del instrumento. En este sentido se dice que un sismómetro es un sismógrafo que ha sido calibrado. Al presente, los sismómetros más avanzados son los llamados de banda ancha que hacen posible obtener un registro digital de movimientos con un gran intervalo de frecuencias ya que fueron diseñados para detectar un intervalo grande de frecuencias con la misma respuesta.

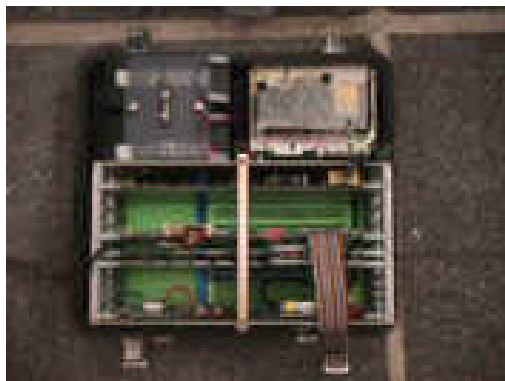
Para finalizar esta sección es oportuno mencionar que para determinar con precisión el epicentro de un temblor así como otras de sus características, se requiere del auxilio de varias estaciones sismológicas. Una serie de sismógrafos arreglados para observar la sismicidad de una región es conocida como una red sismológica.

Mediante diversas observaciones y la comparación de datos de diferentes observatorios, se pueden trazar sobre un mapa las líneas isosistas, que unen los puntos en que se ha registrado el fenómeno con la misma intensidad y las homosistas, que unen todos los puntos en que la vibración se aprecia a la misma hora.

### **ACELEROGRAFOS - ACELEROMETROS**

Las ondas sísmicas pueden ser registradas mediante los aparatos denominados sismógrafos que pueden ser diseñados para registrar aceleraciones, velocidades o desplazamientos.

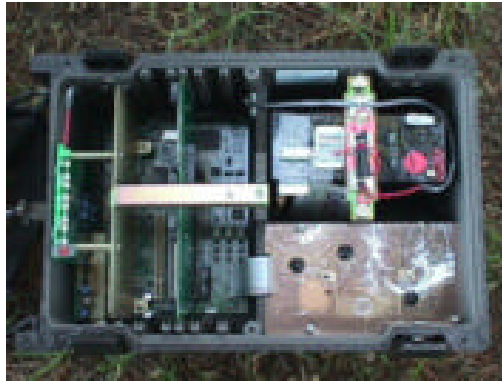
Estos instrumentos emparentados con los sismógrafos y que son muy utilizados en sismología e ingeniería son los llamados acelerómetros, instrumentos con el mismo principio del sismómetro pero diseñados para responder a la aceleración del terreno más que a su velocidad o a su desplazamiento.



Acelerógrafo SSA1



Acelerógrafo SSA2



Acelerógrafo ETNA



Acelerógrafo ETNA y Computadora

**Acelerógrafo SSA-1 y SSA-2:** Estos instrumentos son acelerómetro triaxiales de fuerza balanceada con una frecuencia natural de 50 Hz y un coeficiente de amortiguamiento del 70%, instalado dentro del acelerógrafo. Las señales de los sensores son amplificadas y filtradas, su rango de respuesta en las frecuencias es plano entre los 0 a los 50 Hz. La señal analógica es convertida a valores digitales por un convertidor analógico/digital con una resolución de 12 bits y una frecuencia de muestreo de 200 Hz. El rango de máxima escala de la aceleración es preseleccionado entre los valores de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 1 y 2 g. Para escalas máximas de 1 g la exactitud es aproximadamente de  $0.5 \text{ cm/seg}^2$

El acelerógrafo cuenta con una memoria de pre eventos que sirve para que se registre el movimiento del suelo evitando que se pierda la llegada de las ondas P del sismo. El tiempo para el registro de los pre eventos puede seleccionarse entre 1.28 hasta 15.36 segundos. El tamaño de la memoria es de 512 Kb para el SSA-1 y de 256 Kb para el SSA-2, en el primer caso se cuenta con una capacidad de almacenaje de 20 minutos de movimiento fuerte del suelo con tres canales a 200 muestras por segundo y en el segundo caso la capacidad de almacenaje es de 10 minutos.

**Acelerógrafo ETNA** es un acelerómetro triaxial de fuerza balanceada con una frecuencia natural de 50 Hz y un coeficiente de amortiguamiento del 70%, instalado dentro del acelerógrafo. Las señales de los sensores son amplificadas y filtradas, su rango de respuesta en las frecuencias es plano entre los 0 a los 80 Hz. La señal analógica es convertida a valores digitales por un convertidor analógico/digital con una resolución de 18 bits y una frecuencia de muestreo de 200 Hz. El rango de máxima escala de la aceleración es preseleccionado entre los valores de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 1 y 2 g. Para escalas máximas de 1 g la exactitud es aproximadamente de  $0.0075 \text{ cm/seg}^2$ .

El tiempo para el registro de los pre-eventos puede seleccionarse por software a incrementos de 1 segundo hasta máximo 60 segundos. La duración del post-evento puede seleccionarse también vía software entre 0 a 65.000 segundos. El nivel de disparo varía entre 0.01% hasta el 100% de la escala máxima.

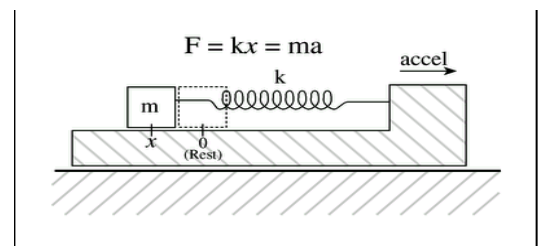
### Microacelerómetros

Estos acelerómetros están constituidos por un sistema masa resorte como el observado en la figura.

En estos dispositivos de medición se aplican dos leyes físicas para realizar la conversión de aceleración en desplazamiento, estas leyes son: Ley de Hooke, de donde se obtiene la relación entre fuerza y desplazamiento para el sistema ( $[F=kx]$ ), y la segunda ley de Newton, de donde se obtiene la relación entre la aceleración de un cuerpo y la fuerza que actúa sobre el mismo  $[F=ma]$ . Posteriormente se utiliza la propiedad de los capacitores eléctricos para realizar la conversión del desplazamiento en señales eléctricas.

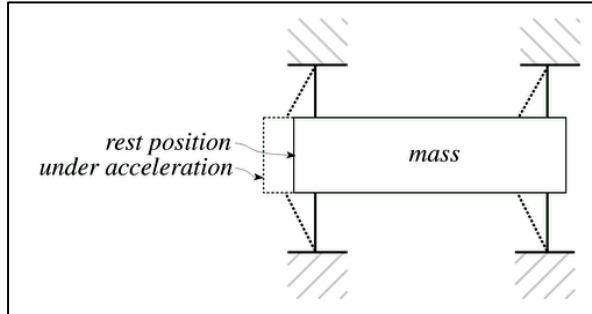
La aceleración produce un desplazamiento generando

una fuerza proporcional a la rigidez del resorte y al desplazamiento del mismo.  $[F=ma=kx]$



Así una aceleración  $a$  causará un desplazamiento  $x$  del sistema, si la masa  $m$  y la constante de proporcionalidad del resorte  $k$  son conocidas se puede obtener la aceleración midiendo el desplazamiento.

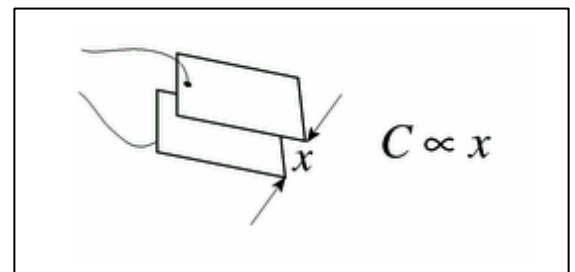
Los acelerómetros de “Analog devices” integran un sistema masa resorte para la medición de la aceleración y el circuito electrónico necesario para acondicionar la señal.



El sistema masa resorte utilizado en este sistema es el observado en la figura, la masa esta constituida por una barra de silicio, el resorte esta constituido por cuatro delgas que sujetan a la masa por sus cuatro extremos. El sistema solo responde a aceleraciones que actúan de forma paralela a la masa. Como los resortes no son ideales la respuesta no es exactamente lineal, las alineadas son compensadas por circuitos

internos.

Para la medición del desplazamiento de la barra se utiliza una propiedad de los capacitores eléctricos. Un capacitor formado por dos placas metálicas paralelas presentará una capacidad inversamente proporcional a la distancia que separa a ambas placas.

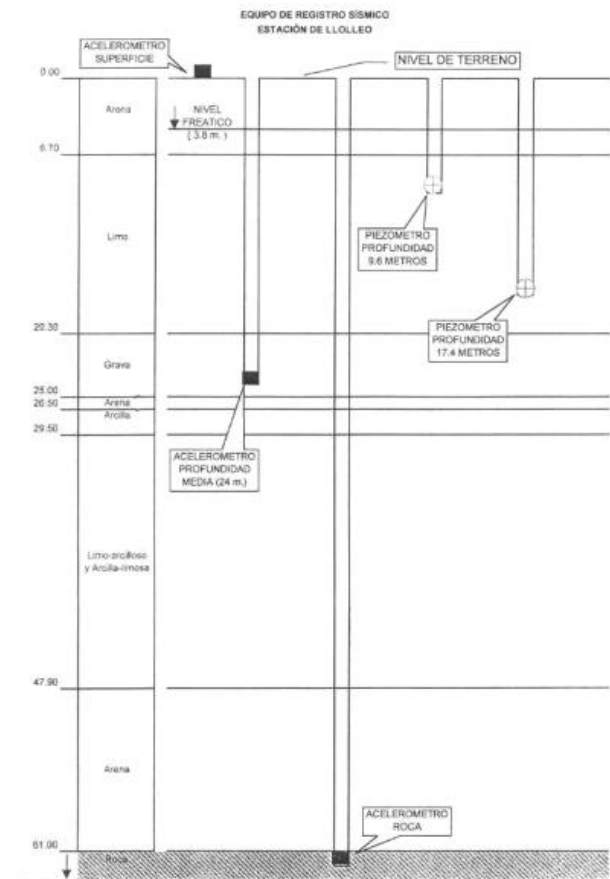


Conociendo la constante de proporcionalidad con la medición de la capacidad se puede obtener la distancia que separa las dos placas.

## ESTACIÓN ACELEROGRÁFICA

En superficie, la estación consiste de una caseta de albañilería sobre la cual se instala un reloj GPS que permite mantener la hora internacional con una alta confiabilidad. En el interior de la caseta se encuentra el sistema electrónico y computador que permite la lectura permanente de los 6 sensores instalados (3 acelerómetros, 2 piezómetros y 1 reloj GPS). En la Fig. 1 se ilustra la ubicación en profundidad de los acelerómetros y piezómetros.

El programa computacional para el manejo de las lecturas de los instrumentos consiste en la lectura permanente de todos los sensores cada 0.02 segundos. Todos los datos leídos son almacenados inmediatamente en un arreglo matricial, el cual una vez lleno, es sobre escrito desde el comienzo. Cuando ocurre un evento sísmico, el cual es reconocido por que el nivel de aceleraciones sobrepasa un umbral (se trabajo con un umbral de 0.005g), se toman los datos desde el arreglo, con 20 segundos de antelación y hasta 100 segundos después que se haya sobrepasado por última vez el umbral.





Estos datos son almacenados en un archivo con el nombre dado por la fecha y hora del evento. Es un equipo destinado a la monitorización, tratamiento y almacenamiento de señales provenientes de diferentes tipos de transductores, captadores o sensores, como células de carga, dinamómetros, acelerómetros, electro goniómetros u otros.

La idea original de SignalMaster fue crear un equipo totalmente portátil y autónomo que permitiese realizar valoraciones tanto de laboratorio como de campo y en las más diversas condiciones.

El equipo básico cuenta con dos canales a los que se conecta una célula de carga y un electro goniómetro. De este modo puede monitorizarse las señales de ambos transductores simultáneamente, de modo visual, o enviarse a un ordenador personal (señal analógica de  $\pm 10V$ ) para ser capturada mediante el software de SignalMaster (incluido con el equipo), a través de una tarjeta de adquisición de datos instalada en el PC (no incluida).

El software de SignalMaster permite capturar simultáneamente las señales (hasta 8) que envía el equipo al ordenador personal

#### Resumen de prestaciones

Muy sencillo manejo.

Autónomo (baterías recargables).

Dos canales para alimentación, monitorización y salida analógica de una célula de carga y un electro goniómetro.

Ampliación opcional hasta 8 canales.

Señal analógica de salida: DC  $\pm 10V$  (Conectores BNC).

Dimensiones: 18x7x12 centímetros ; Peso: 1.2 Kilos