

## Capítulo 5

### RESPUESTA DINÁMICA EXPERIMENTAL DE UNA ESTRUCTURA CON DISIPADORES

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analiza el comportamiento dinámico y experimental de un sistema de un grado de libertad donde se han incorporado disipadores de cortante.

En el apartado 5.2 se hace mención a los tests dinámicos empleados en estructuras, tanto para la determinación de sus parámetros dinámicos como para evaluar su comportamiento ante un evento sísmico.

En el apartado 5.3 se describe el modelo ensayado y los recursos empleados en los ensayos.

La secuencia y características de los test realizados se describe en el apartado 5.4., mientras que en el apartado posterior se ofrecen en formato gráfico la evolución temporal de las medidas observadas a través de los distintos transductores.

Finalmente, en el apartado 5.6 se analiza la respuesta estructural a partir de las medidas observadas en los diferentes ensayos y se extraen conclusiones al respecto.

#### 5.2 TESTS DINÁMICOS

##### 5.2.1 Tests de vibración libre

La vibración libre en una estructura puede obtenerse de distintas formas: i) a través de un cable tensado con el que se impone una deformación en la estructura, y el cual es liberado súbitamente, ii) a partir del impacto de un péndulo en una zona predeterminada. En ambos casos, a partir del registro de la respuesta frente al tiempo (figura 5.1), es posible determinar la frecuencia natural de la estructura:

$$f_n = \frac{m}{t_{n+m} - t_n} \quad [5.1]$$

donde  $t_{n+m}-t_n$  es el tiempo transcurrido en completar  $m$  ciclos. La fracción del amortiguamiento crítico se puede obtener a partir de la expresión (Clough y Penziem 1993):

$$\mathbf{x} = \frac{U_n - U_{n+m}}{2m\pi U_{n+m}} \quad [5.2]$$

donde  $U_n$  es la amplitud del desplazamiento en el ciclo  $n$ , y  $U_{n+m}$  es la amplitud transcurridos  $m$  ciclos.

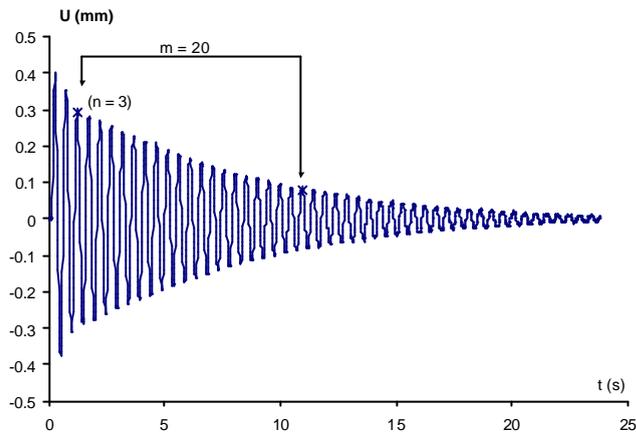


Figura 5.1 Evolución del desplazamiento en un movimiento vibratorio libre amortiguado.

### 5.2.2 Tests de vibración forzada.

El equipo requerido para un test de vibración forzada es más complejo que el empleado en un test de vibración natural. El tiempo destinado a la obtención de los parámetros dinámicos es superior, pero los valores obtenidos son más precisos. El procedimiento empleado es el siguiente:

1. Se introduce una excitación a frecuencia constante hasta que la estructura desarrolla una vibración estable en el tiempo
2. Se mide el desplazamiento máximo
3. Se incrementa la frecuencia y se repiten los pasos 1 y 2
4. Se representa la respuesta con respecto a la frecuencia.

En la figura 5.2 se puede observar un ejemplo de la representación de la amplitud del desplazamiento máximo frente a la frecuencia. La frecuencia fundamental se puede obtener de forma inmediata de la curva, y la fracción del amortiguamiento crítico  $\xi$  puede ser estimada a partir de la expresión (Wakabayashi 1986):

$$\mathbf{x} = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{f_n} \quad [5.3]$$

donde  $f_n$  = frecuencia resonante,  $\Delta f$  = anchura de la curva de resonancia al nivel de amplitud correspondiente a  $1/\sqrt{2}$  del valor pico.

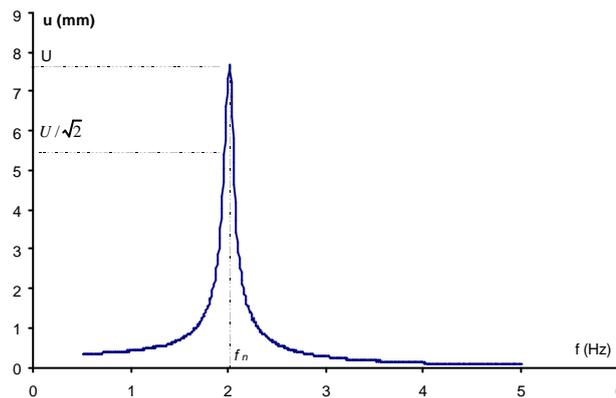


Figura 5.2 Curva amplitud vs. frecuencia obtenida de un test de vibración forzada

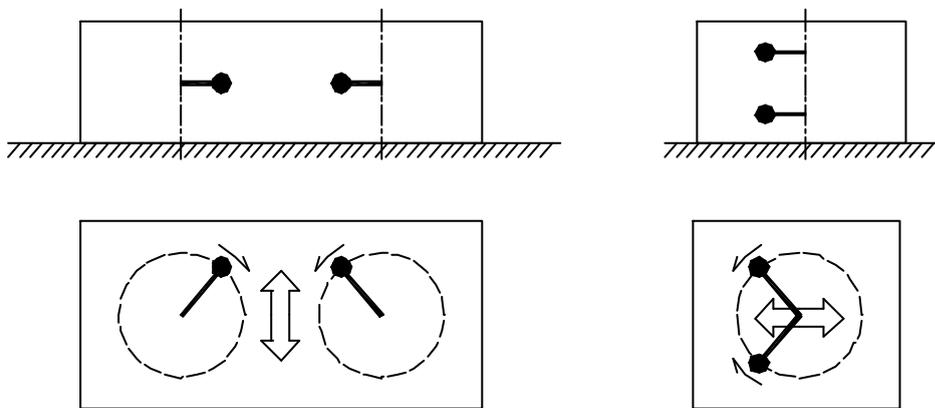


Figura 5.3 Tipos de generadores de vibraciones de masas excéntricas.

Los ensayos de vibraciones forzadas en estructuras reales se llevan a cabo mediante generadores de vibraciones incorporados en su seno. Los generadores de vibraciones aprovechan las fuerzas inerciales de masas en rotación excéntrica o bien alternante. Un sistema extendido consiste en masas excéntricas en rotación (figura 5.3). La fuerza inercial que introduce cada una de ellas toma por valor  $mr\omega^2$ , donde  $m$  = masa,  $r$  = radio del centro de gravedad de la masa con respecto al eje de

rotación,  $\omega$  = velocidad angular. Los generadores se pueden situar en una o varias partes de la estructura. Sincronizadas sus vibraciones, es posible analizar las características dinámicas del edificio.

### **5.2.3 Tests en mesa vibrante**

Las mesas vibrantes consisten en una bancada rígida, controlable dinámicamente en bucle cerrado. La mesa puede disponer hasta un máximo de 6 grados de libertad posibles, correspondientes a los tres desplazamientos y tres giros de un sólido rígido. El movimiento de la mesa se consigue generalmente a partir de pistones oleohidráulicos, aunque también se han empleado excitadores electromagnéticos.

Habitualmente reproducen movimientos sísmicos, a partir de uno o más de los componentes de sus acelerogramas registrados, los cuales se transmiten a los modelos estructurales a ensayar. Normalmente, antes de someter un modelo estructural a una sollicitación sísmica en la mesa vibrante, se determinan los parámetros dinámicos mediante un test de vibraciones forzadas. Para ello, la mesa reproduce un movimiento con una aceleración sinusoidal de amplitud constante hasta desarrollar una respuesta estable, momento en el cual se obtienen medidas de los distintos transductores. El proceso se realiza en un rango predeterminado de frecuencias, detectando así comportamientos resonantes en los modos de vibración naturales de la estructura.

En la figura 5.4 se puede observar el algoritmo de control de una mesa hidráulica con un solo grado de libertad operativo (Abrams et al. 1990). Se aprecian distintos elementos funcionales: i) una bancada, encargada de sustentar al modelo de ensayo y a elementos auxiliares de fijación de los transductores de desplazamiento ii) un sistema donde descansa la bancada, iii) los actuadores (hidráulicos o electromagnéticos) y sus sistemas de alimentación, encargados de proporcionar movimiento a la bancada, iv) el foso y los pórticos de reacción donde se aloja la mesa y se sustentan los actuadores y v) el sistema de adquisición y control. El control del sistema obedece a un algoritmo en bucle cerrado, donde la señal enviada a las válvulas de servocontrol es una función del movimiento consignado y de la respuesta real medida a partir de transductores.

Las características técnicas de las mesas vibrantes se definen principalmente por sus dimensiones, número de grados de libertad, aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos y capacidad portante. Las dimensiones de las mesas vibrantes se sitúan entre 3 y 5 metros. En caso de modelos estructurales (edificios, puentes etc...) su uso se limita habitualmente a modelos a escala reducida (entre 1/5 y 1/100 del prototipo) y resulta fundamental preservar las relaciones entre prototipo y modelo establecidas a partir de la teoría de modelos (Harry y Sabnis 1999).

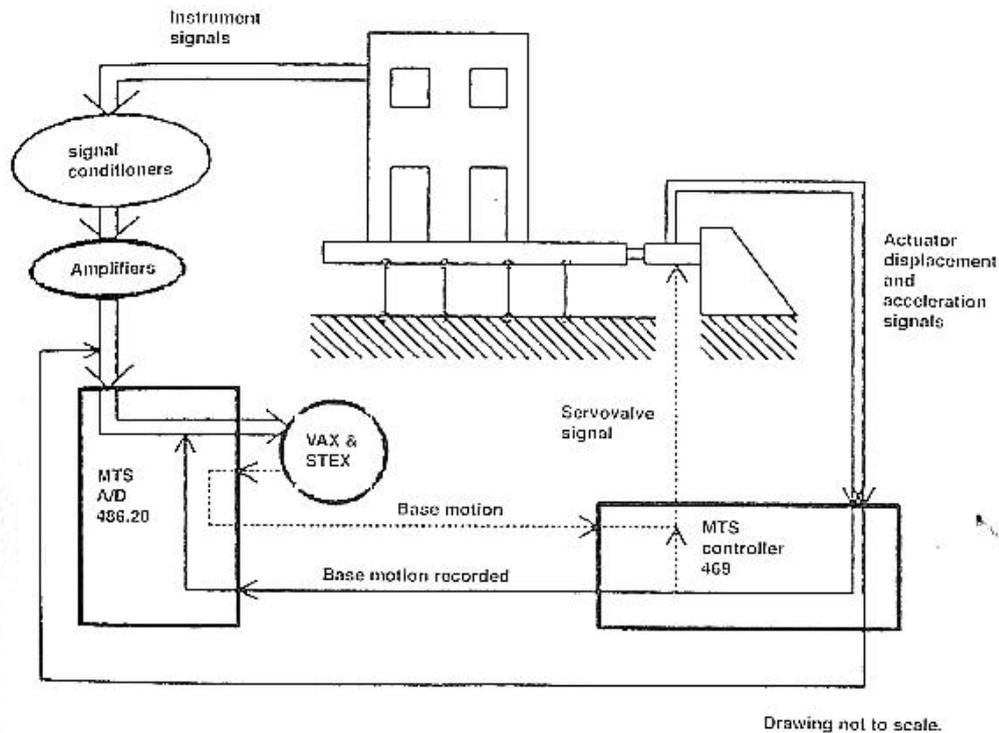


Figura 5.4. Esquema de funcionamiento de una mesa vibrante (Abrams et al. 1990)

## 5.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE ENSAYO

### 5.3.1 Estructura

En la figura 5.5 se puede observar el modelo estructural ensayado en los laboratorios de ISMES (Bérgamo - Italia). Se trata de un sistema mixto rígido - flexible, con disipadores de energía formando parte del sistema rígido y actuando como "shear links" entre ambos sistemas. El sistema flexible está formado por 4 pilares HEA100 sobre una planta rectangular de 2.5 x 2 metros aproximadamente, coronados por 4 vigas HEB 300, formando 4 pórticos, paralelos dos a dos. En los pórticos frontal y dorsal (más flexibles), se encuentran dos disipadores (uno en cada pórtico) conectados a media luz, mientras que los pórticos laterales se encuentran arriostrados en cruz. Dos bloques de hormigón en masa, de 3190 kp cada uno de ellos, se acomodan sujetos a las vigas frontal y dorsal. El peso sobre los 4 pilares se eleva a 8380 Kp, proporcionando un período de vibración natural respecto al plano flexible (previa conexión del sistema disipativo) de 0.5 segundos.

Las fuerzas inerciales se transmiten a la base a partir de los pilares (sistema flexible) y del sistema disipativo. El sistema disipativo, previa plastificación, manifiesta una rigidez muy superior a la de la estructura principal porticada. La

acción se transmite de los dinteles a los disipadores, a partir de perfiles HEB 280 rigidizados, y de los disipadores a la mesa vibrante mediante muros de hormigón armado entre perfiles HEB. Las uniones atornilladas de los dos disipadores se precargaron con el par de apriete correspondiente al 80 % del límite elástico de los tornillos empleados (TR16 8.8), y se impregnaron en sus juntas de un barniz frágil para detectar si se producían deslizamientos relativos.

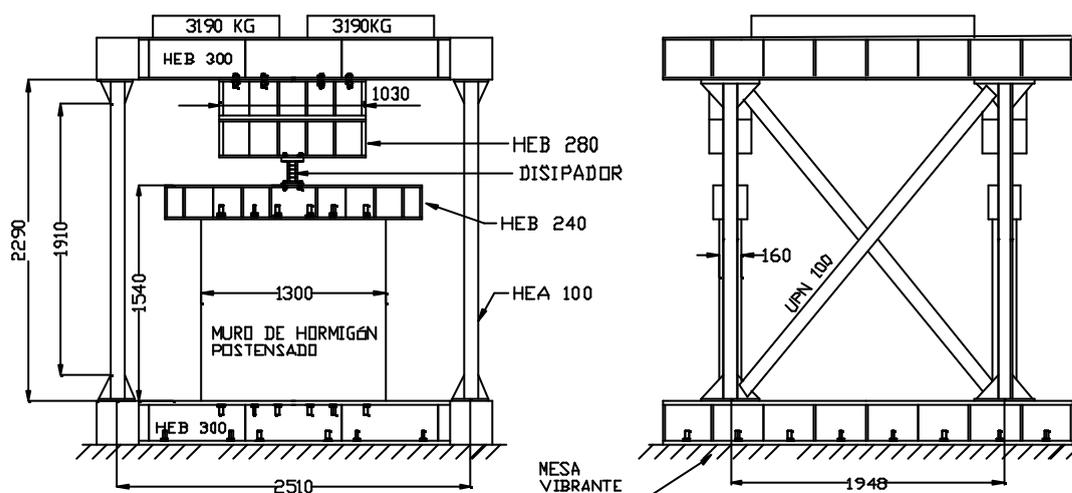


Figura 5.5 Modelo estructural de ensayo. Geometría y dimensiones principales

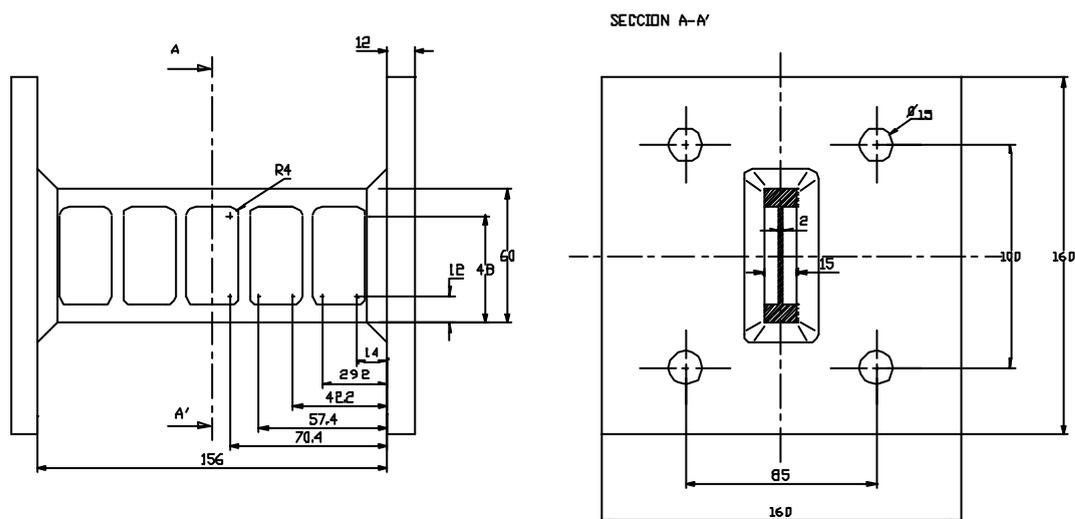


Figura 5.6 Geometría y dimensiones del disipador empleado

Originariamente se había pensado en emplear muros de mampostería con distintos grados de postensado en lugar de los de hormigón armado que finalmente se utilizaron. La confluencia de factores diversos obligó a emplear elementos ya disponibles en el propio laboratorio.

Los dos disipadores se construyeron en acero A42. La geometría del cuerpo disipativo (figura 5.6) coincide con la adoptada en el modelo A1 (figura 3.1). Sin embargo, los disipadores empleados en la estructura se construyeron a partir de un bloque de dimensiones iguales al cuerpo de disipación, con lo cual la zona comprendida entre el cuerpo de disipación y las placas de anclaje mantiene una sección constante.

### 5.3.2 Elementos de sollicitación y medida

El modelo estructural se dispuso firmemente conectado a una mesa vibrante de 6 grados de libertad. La sollicitación del modelo tuvo lugar, sin embargo, a partir de una excitación en una sola dirección. La adquisición de las medidas y el control de la mesa vibrante se realizó con el sistema NewMACS.

La instrumentación empleada se puede observar en la figura 5.7. En los dinteles se situaron tres acelerómetros: dos en la dirección de la excitación proporcionada a la mesa vibrante ( $A1x$  y  $A2x$ ), situados en ambos dinteles para captar un posible modo de torsión, y otro en dirección perpendicular ( $A3y$ ). En la base se situó un cuarto acelerómetro,  $A4x$ , en la dirección de la excitación, cuyas medidas permitirían registrar la excitación real y serían, además, empleadas para el control de la mesa vibrante. Los desplazamientos relativos entre ambos extremos de disipadores se midieron a partir de transductores de desplazamiento  $W1$  y  $W2$ .

El desplazamiento relativo entre dinteles y la base en la dirección de la excitación se midió, de forma indirecta, a partir de las galgas extensométricas de los pilares. Ello resultó posible debido al comportamiento elástico previsto y mantenido durante los ensayos en el sistema flexible. Para su calibración se han empleado los datos obtenidos durante el test de vibración forzada (según se expone en el apéndice I.3).

De los dos disipadores instalados, el correspondiente al pórtico frontal (figura 5.7) se instrumentó con galgas extensométricas tal como se indica en la figura 5.8. Las galgas SDT9 y SDB13 se instalaron para observar la distribución de la deformación en el alma. Las galgas SDM11, 12 y 15 permitían observar la distribución de la deformación normal en un mismo plano.

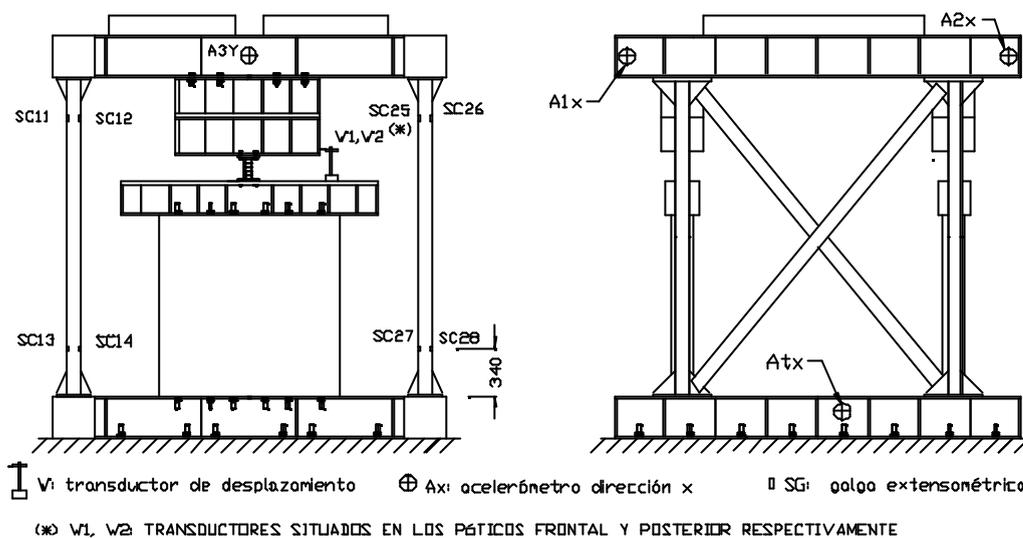


Figura 5.7 Estructura e instrumentación empleados durante los tests dinámicos

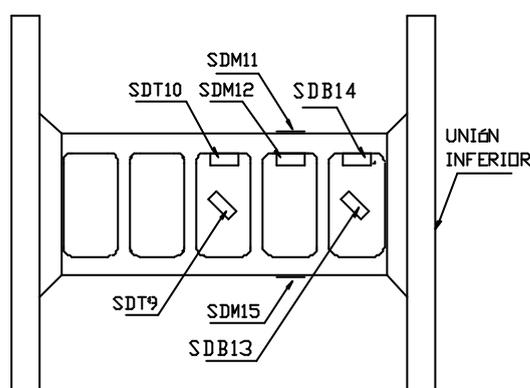


Figura 5.8. Situación de las galgas extensométricas en el disipador

## 5.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENSAYO

El diagrama de la figura 5.9 ilustra la secuencia con que se desarrollaron las pruebas dinámicas. En primer lugar, se realizó un test de vibración libre amortiguada en el sistema flexible, a partir del impacto con una masa pendular ("shock test"). A partir de la evolución sinusoidal amortiguada del desplazamiento máximo medido, y utilizando las ecuaciones [5.1] y [5.2], se estimaron los parámetros dinámicos período natural y fracción del amortiguamiento crítico. Los parámetros obtenidos se

confirmaron con un posterior test de vibración forzada, previa realización del cual se estimó la amplitud apropiada para la aceleración (véase anejo I-2), de forma que la estructura no se deformara plásticamente.

Determinadas las constantes dinámicas, se procedió a la calibración de la mesa vibrante con el sistema estructural con disipadores. Se realizaron pruebas de calibración con el registro de Loma Prieta - Santa Cruz (1989), escalado a -18dB y -9 dB, con comportamiento previsto lineal y elástico.

Finalmente, se realizaron una serie de ensayos consecutivos aumentando su factor de escala con respecto al registro de referencia, con aumento progresivo de la no linealidad del sistema estructural (localizada en el disipador). Se finalizó la serie de ensayos con una amplificación de 7 dB (correspondiente a un factor de escala de 2.238).

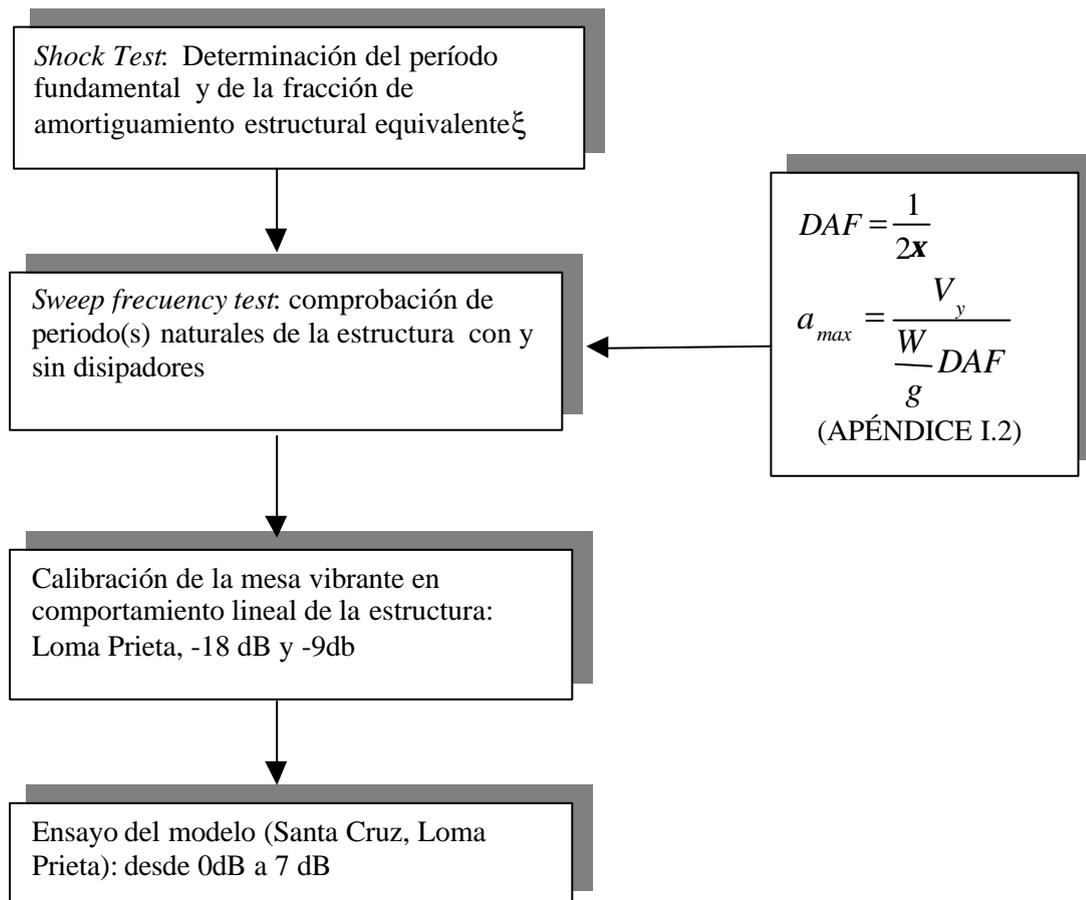


Figura 5.9. Estructuración de los tests de análisis dinámico

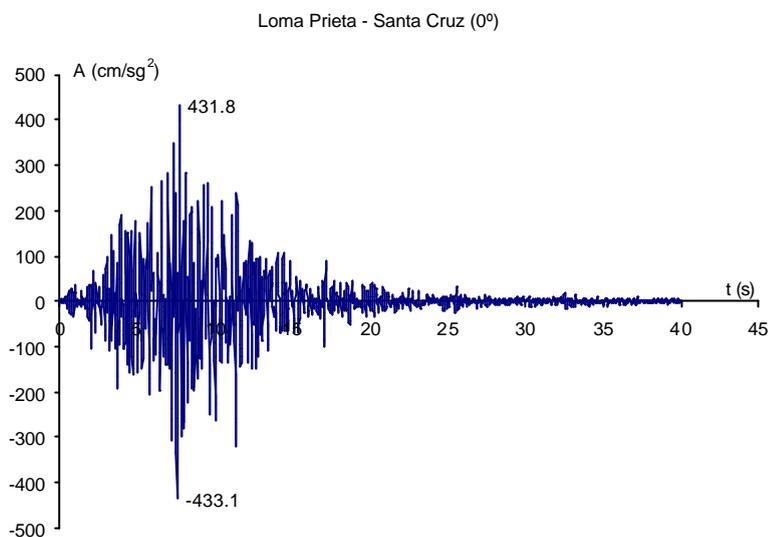


Figura 5.10 Registro de Santa Cruz del terremoto de Loma Prieta (1989).

## 5.5 MEDICIÓN EXPERIMENTAL

En este apartado se reproducen gráficamente las evoluciones temporales de las mediciones realizadas con los transductores. El desplazamiento superior de pórtico frontal  $u$  (figura 5.11) ha sido medido de forma indirecta a partir de las galgas introducidas en sus pilares, tal como se describe en el anejo I.3.

### Oscilación libre

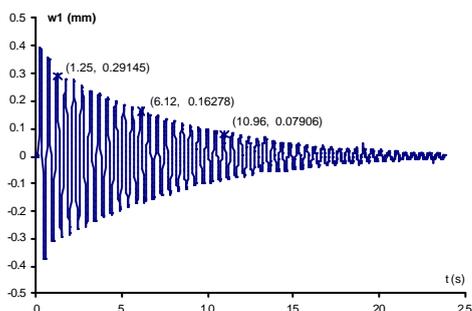


Figura 5.11

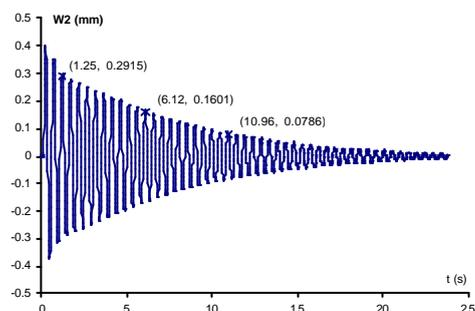


Figura 5.12

Test de barrido de frecuencias en la estructura sin disipadores (0.5 - 5 Hz)

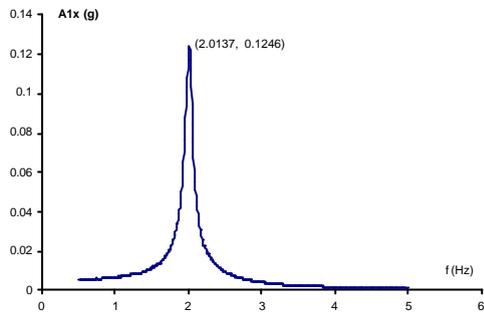


Figura 5.13

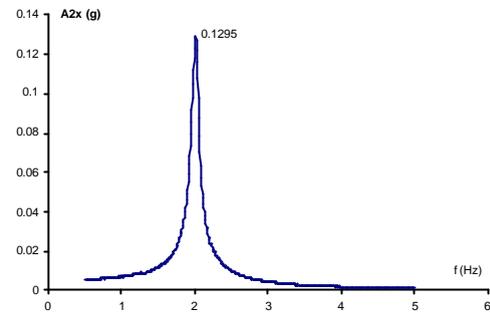


Figura 5.14

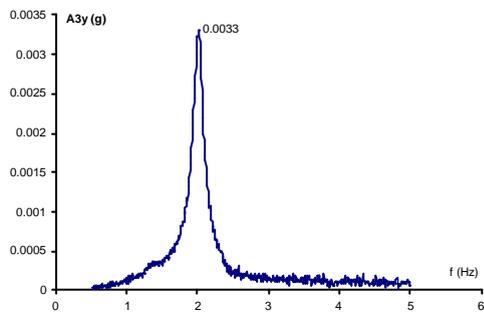


Figura 5.15

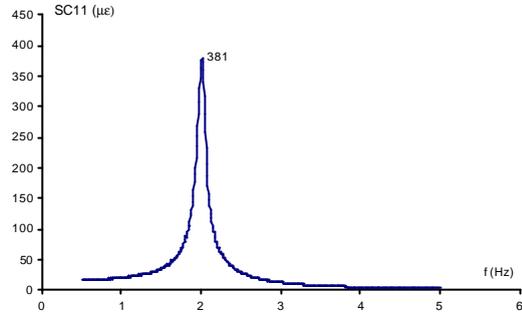


Figura 5.16

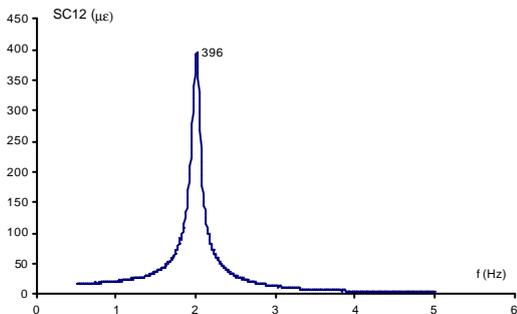


Figura 5.17

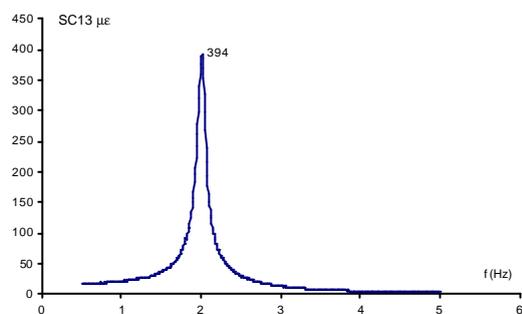


Figura 5.18

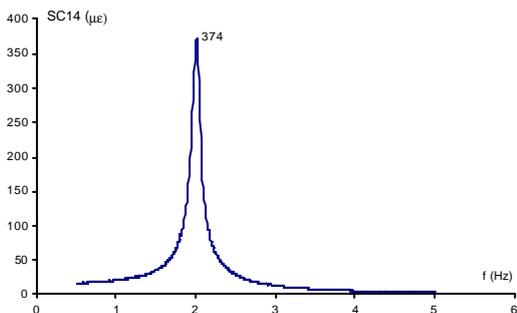


Figura 5.19

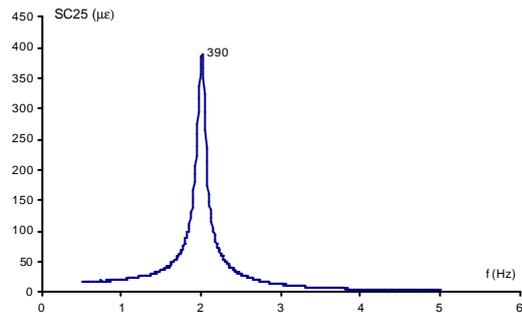


Figura 5.20

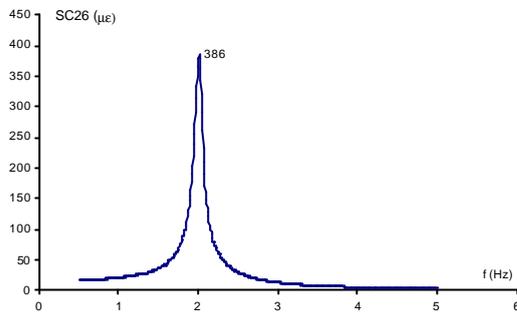


Figura 5.21

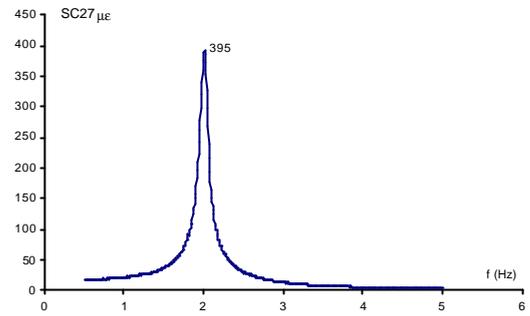


Figura 5.22

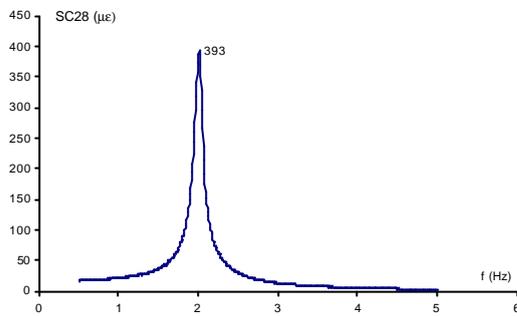


Figura 5.23

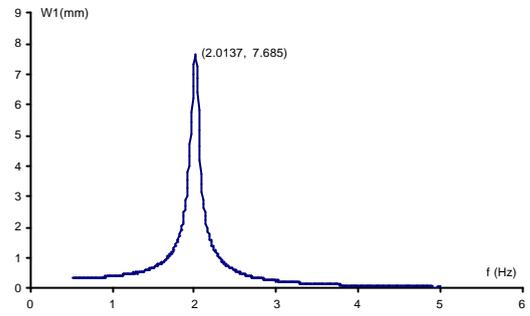


Figura 5.24

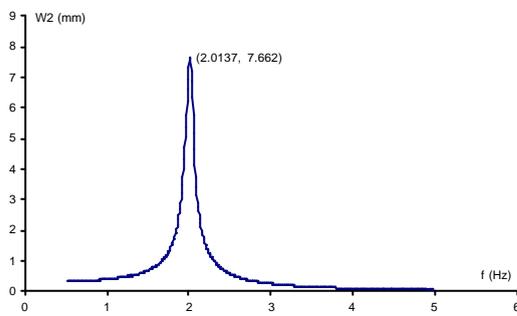


Figura 5.25

Test de barrido de frecuencias en la estructura con disipadores (1 - 30 Hz)

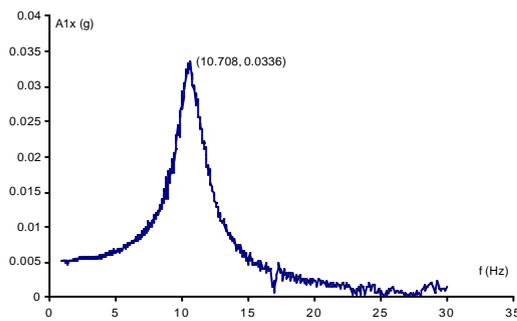


Figura 5.26

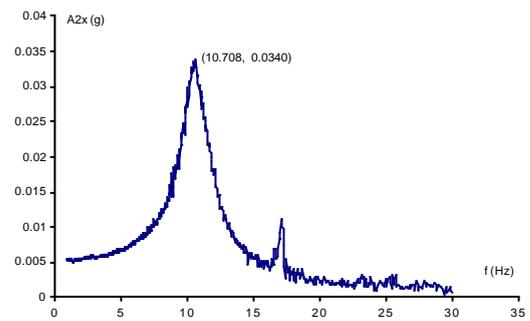


Figura 5.27

5.13 *Capítulo 5*

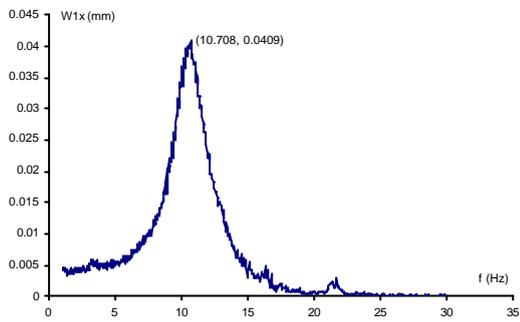


Figura 5.28

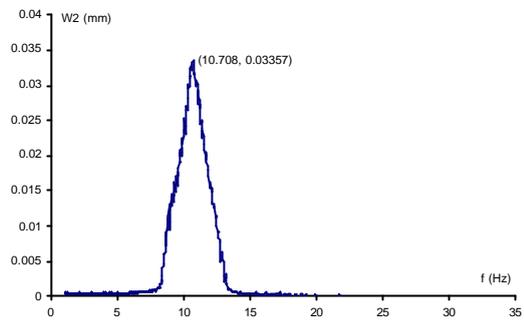


Figura 5.29

Señal escalada a -9db (Atx simulación/Atx registro Loma Prieta = 0.353)

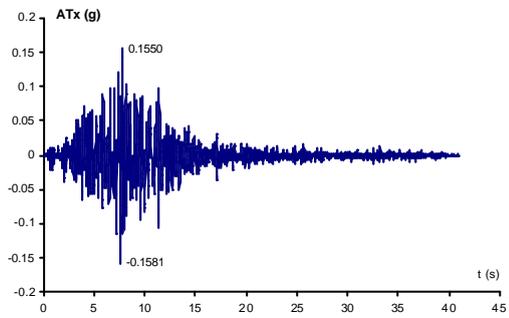


Figura 5.30

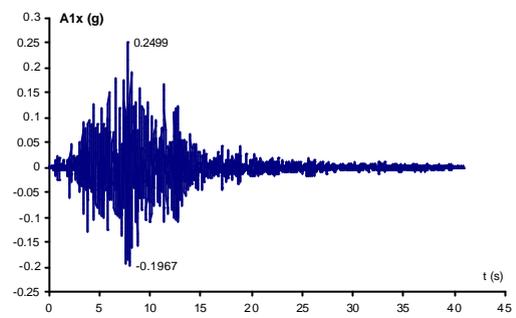


Figura 5.31

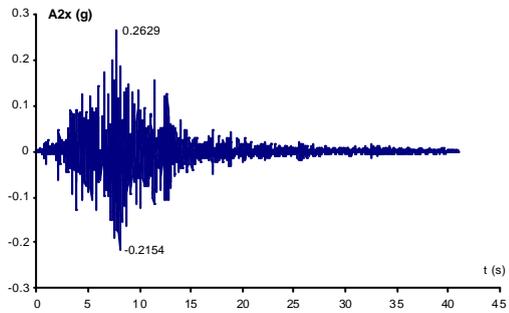


Figura 5.32

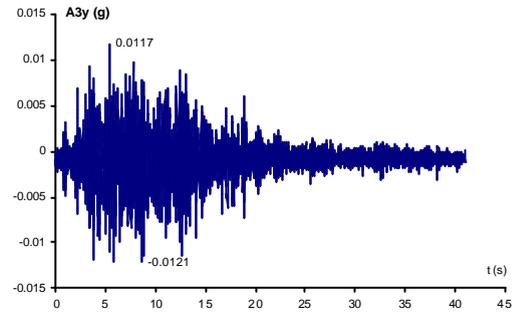


Figura 5.33

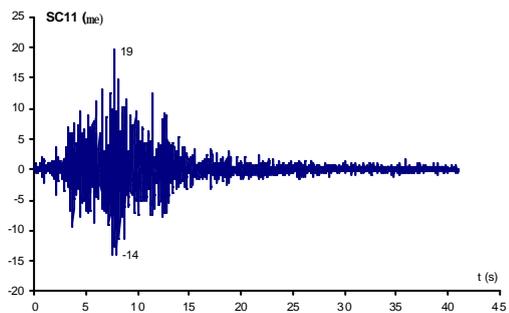


Figura 5.34

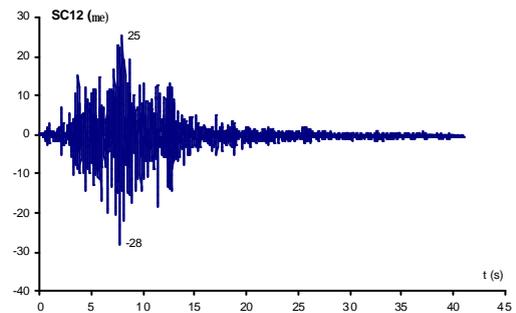


Figura 5.35

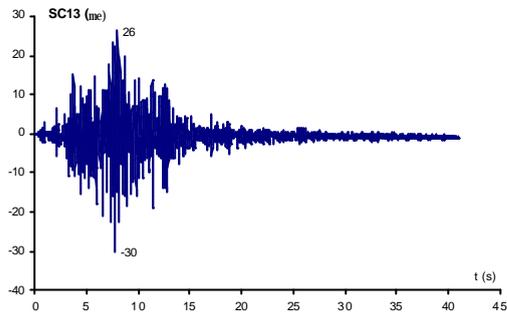


Figura 5.36

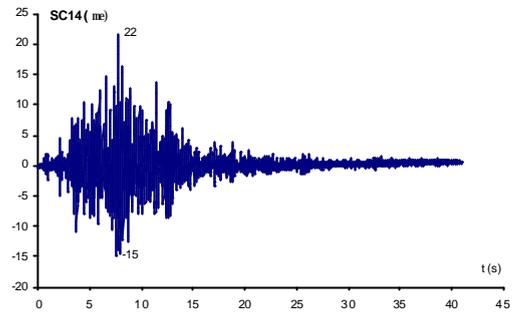


Figura 5.37

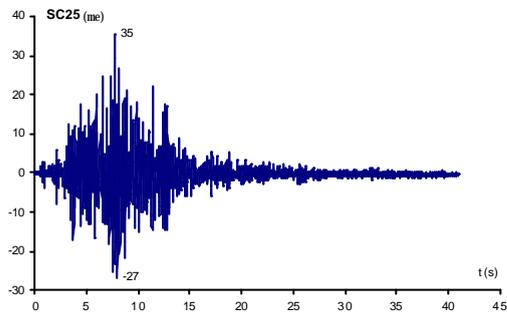


Figura 5.38

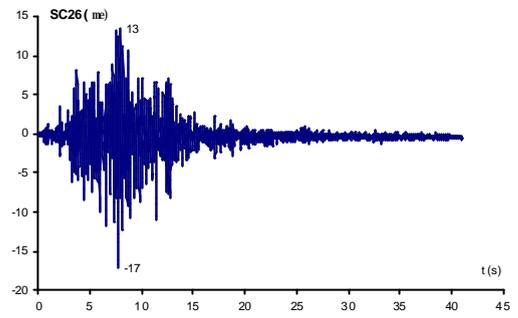


Figura 5.39

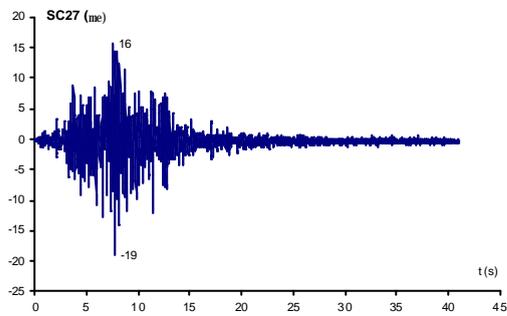


Figura 5.40

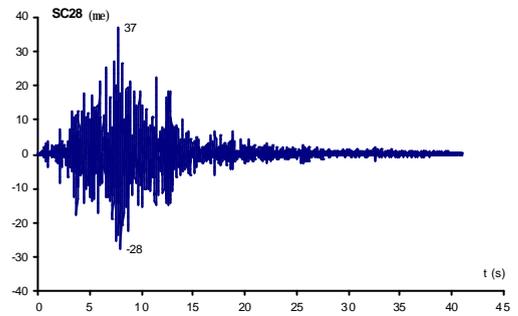


Figura 5.41

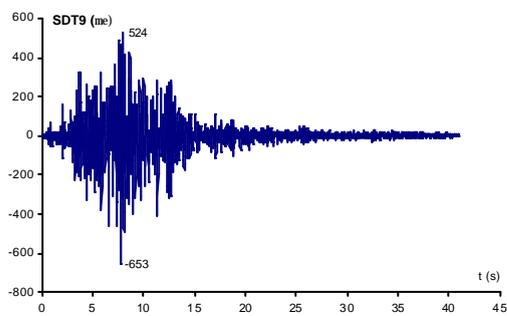


Figura 5.42

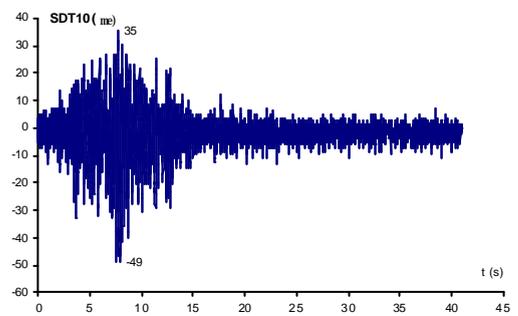


Figura 5.43

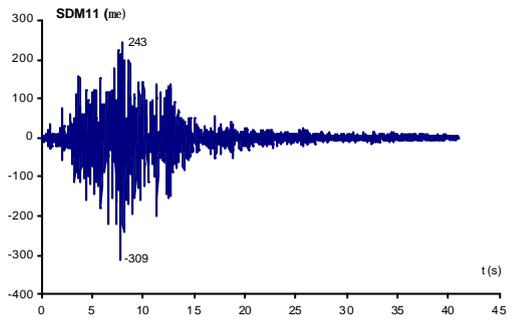


Figura 5.44

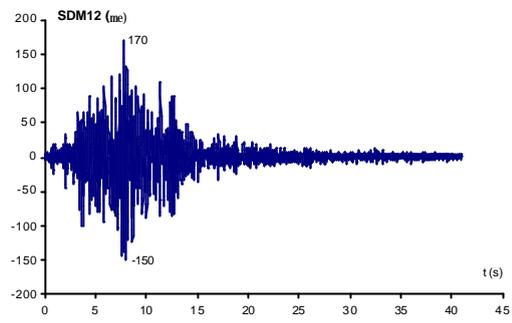


Figura 5.45

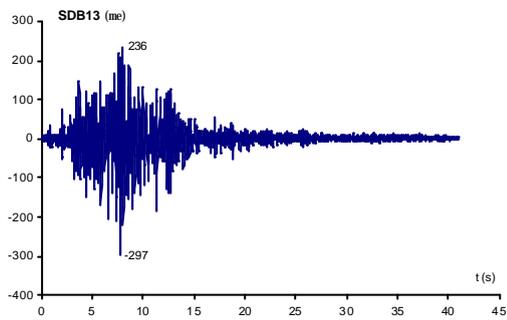


Figura 5.46

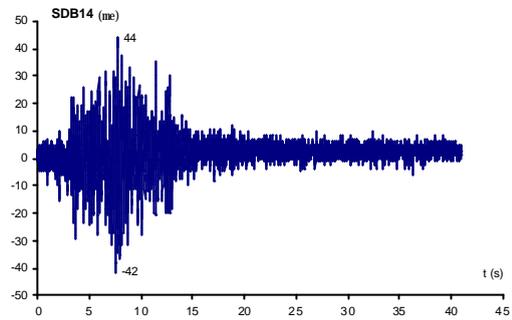


Figura 5.47

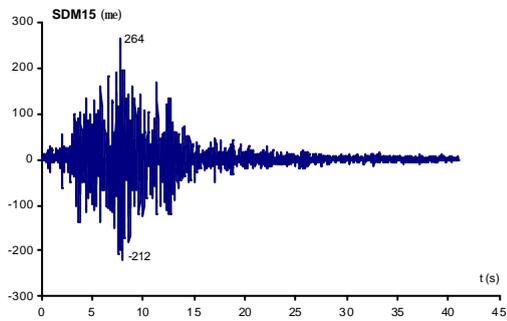


Figura 5.48

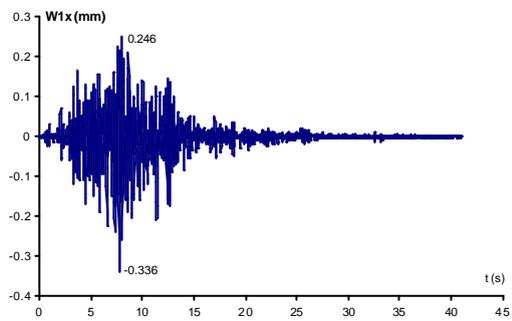


Figura 5.49

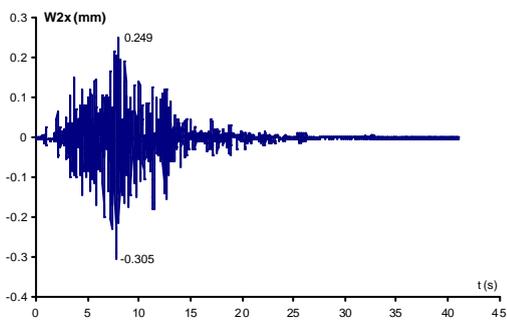


Figura 5.50

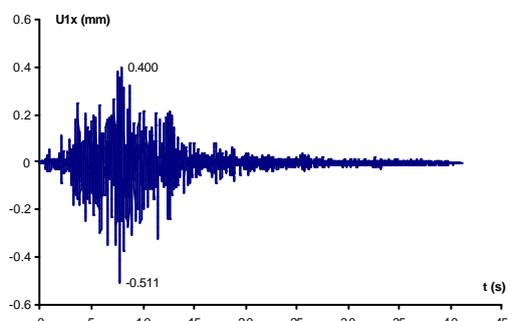


Figura 5.51

Señal escalada a 0 db (Atx simulación/Atx registro Loma Prieta = 1)

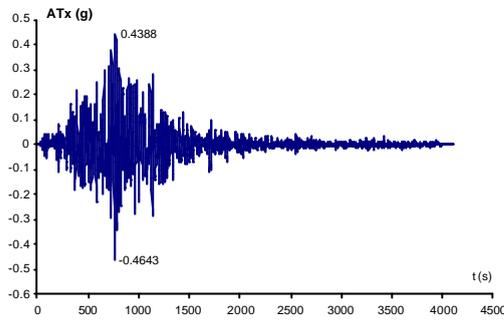


Figura 5.52

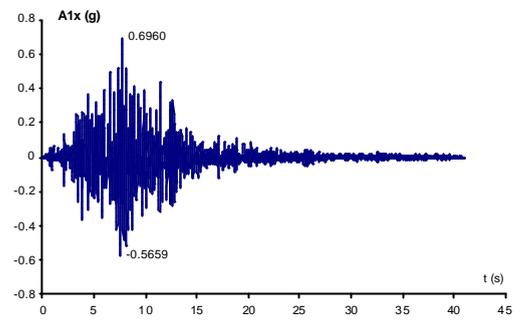


Figura 5.53

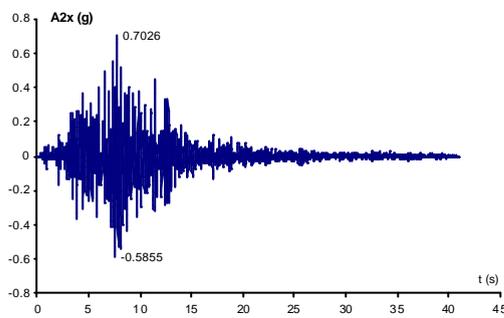


Figura 5.54

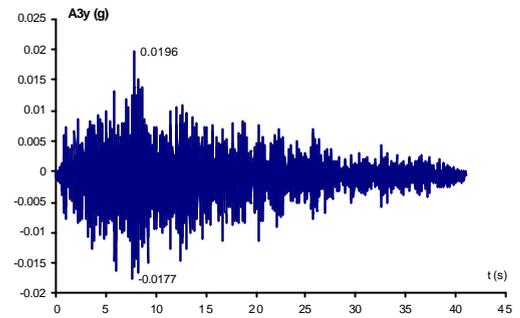


Figura 5.55

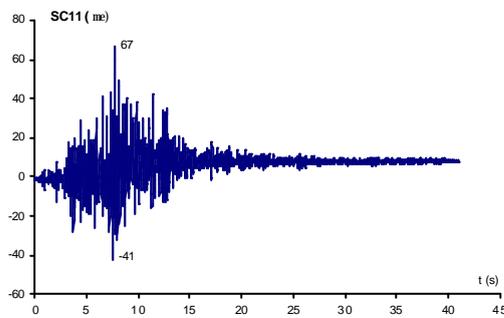


Figura 5.56

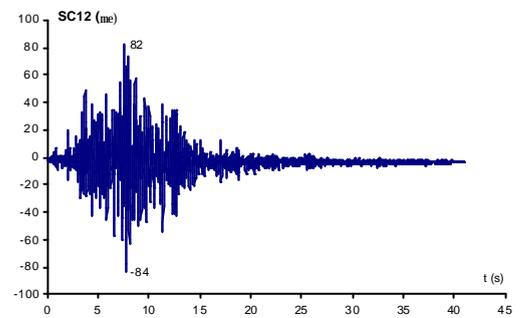


Figura 5.57

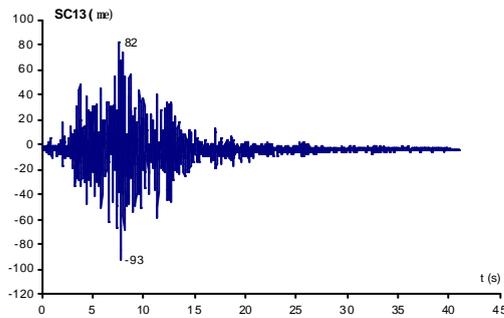


Figura 5.58

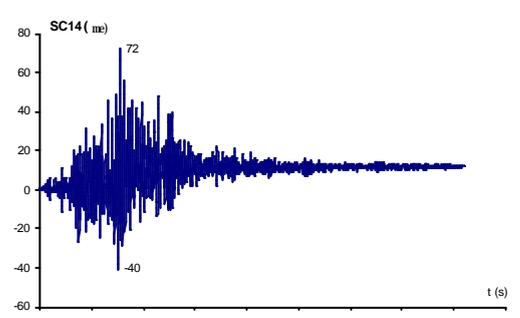


Figura 5.59

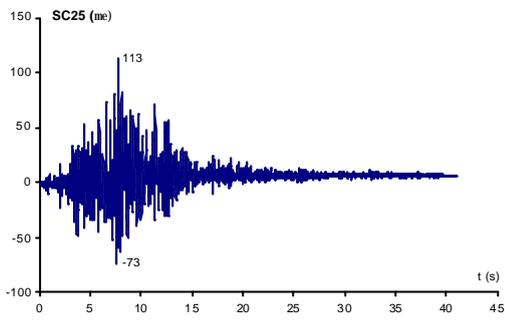


Figura 5.60

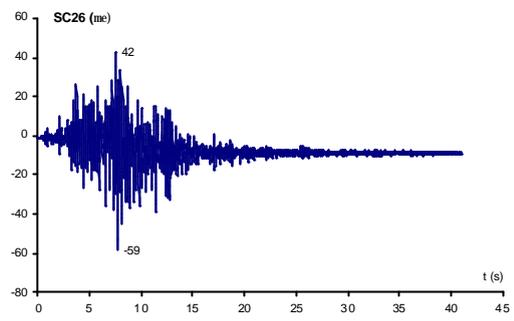


Figura 5.61

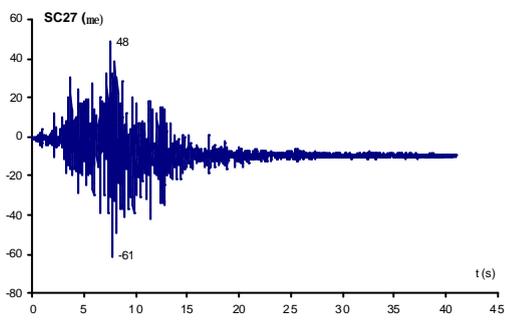


Figura 5.62

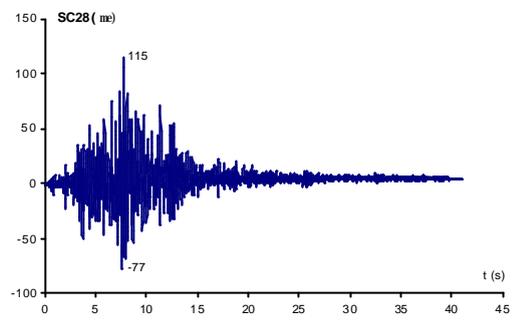


Figura 5.63

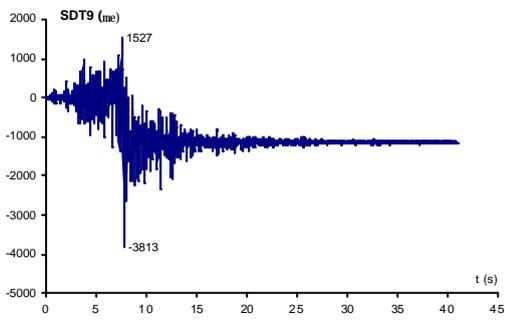


Figura 5.64

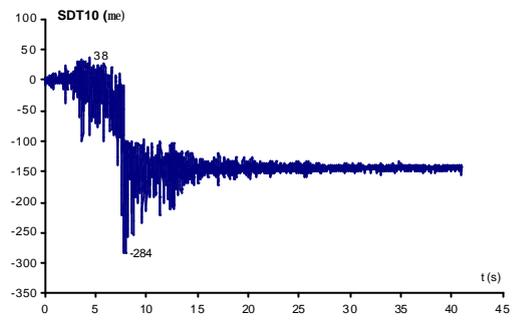


Figura 5.65

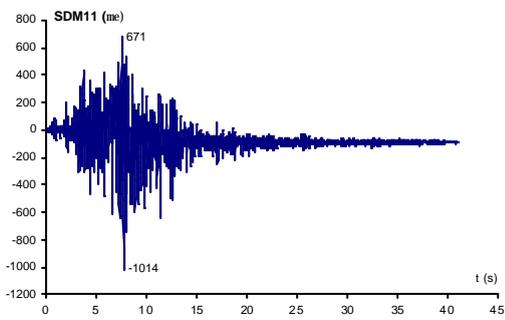


Figura 5.66

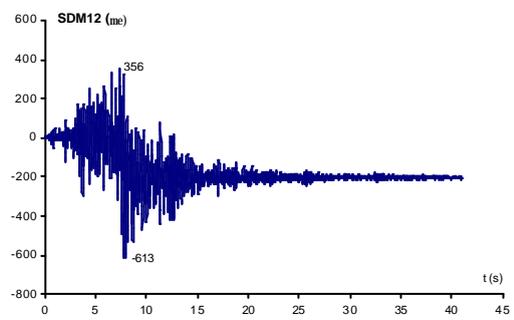


Figura 5.67

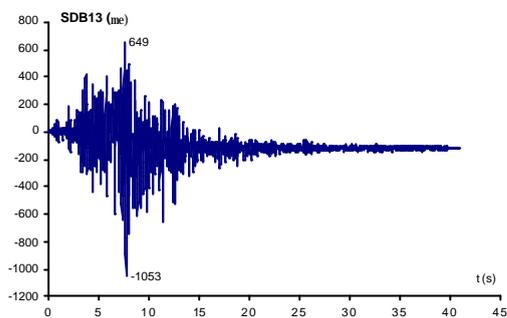


Figura 5.68

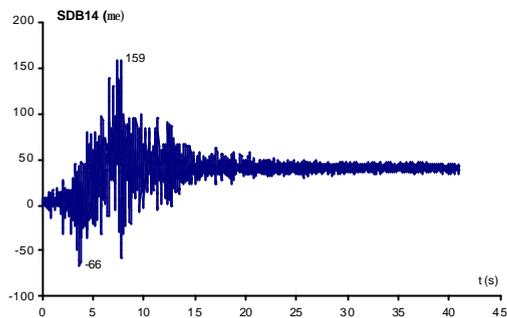


Figura 5.69

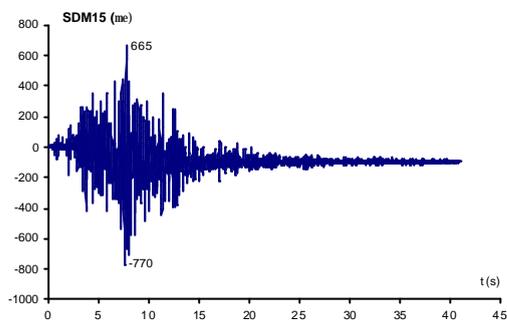


Figura 5.70

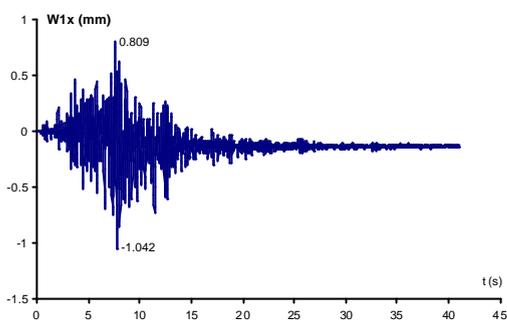


Figura 5.71

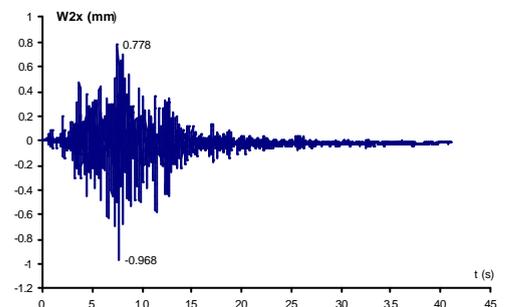


Figura 5.72

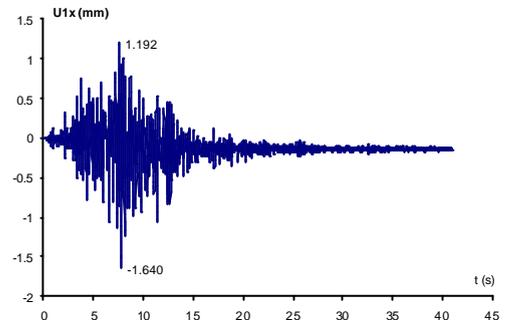


Figura 5.73

Señal escalada a 2 db (Atx simulación/Atx registro Loma Prieta = 1.259)

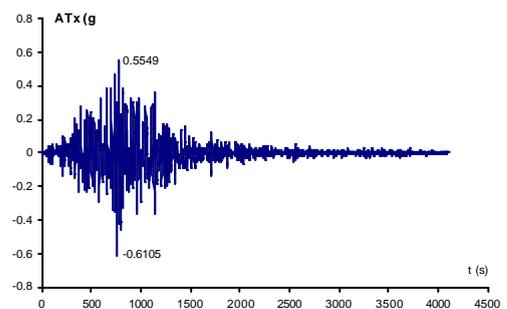


Figura 5.74

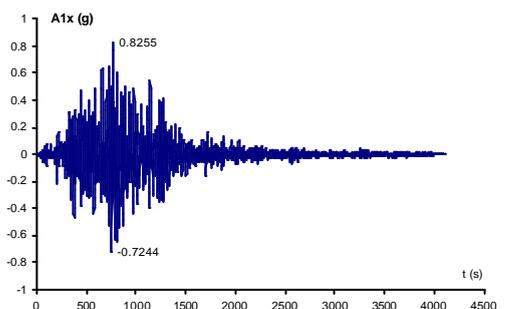


Figura 5.75