

Figura 5.76

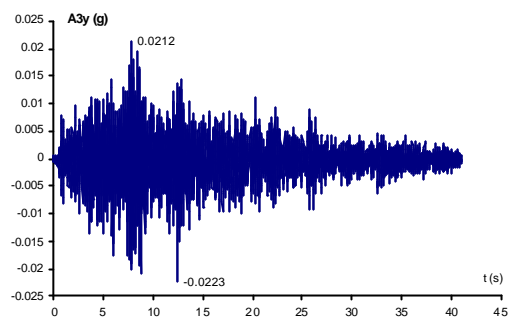


Figura 5.77

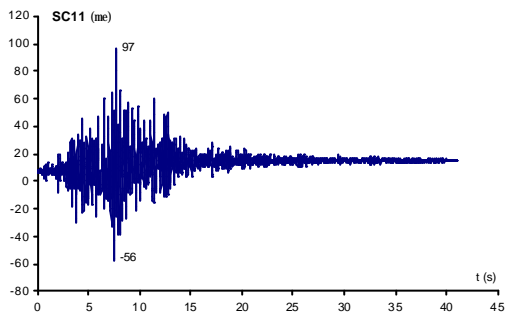


Figura 5.78

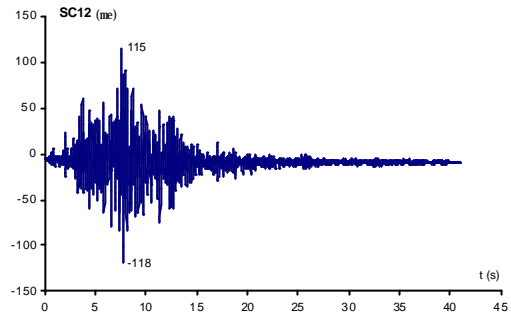


Figura 5.79

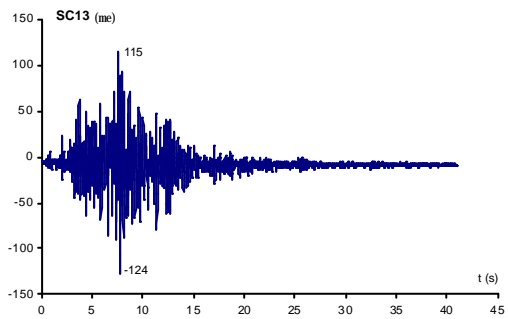


Figura 5.80

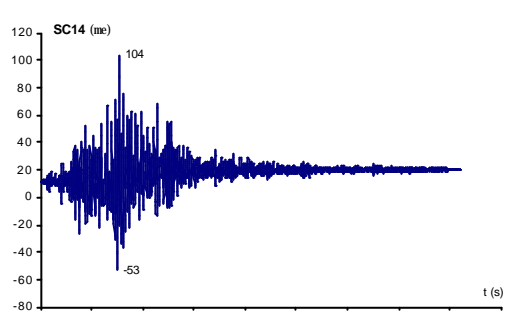


Figura 5.81

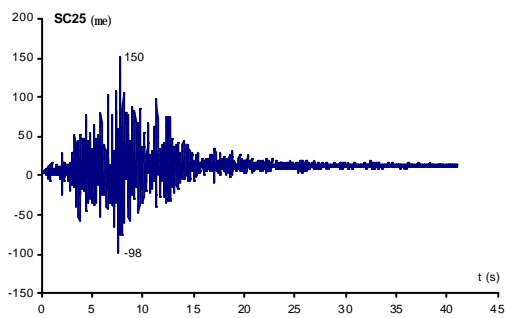


Figura 5.82

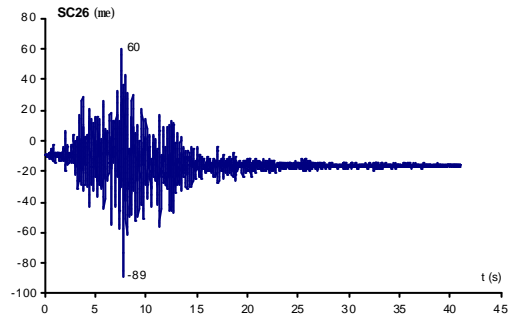


Figura 5.83

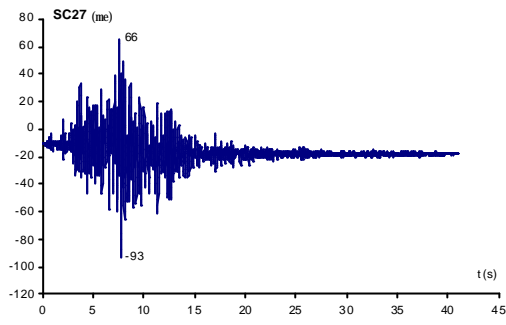


Figura 5.84

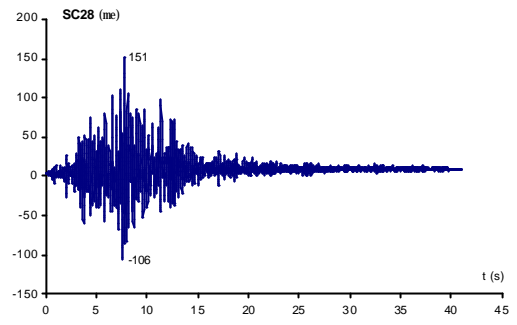


Figura 5.85

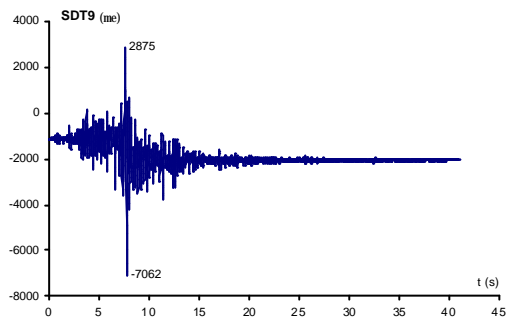


Figura 5.86

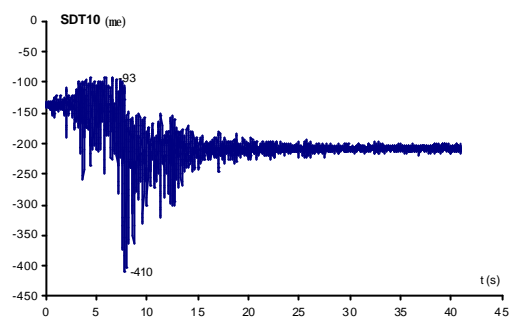


Figura 5.87

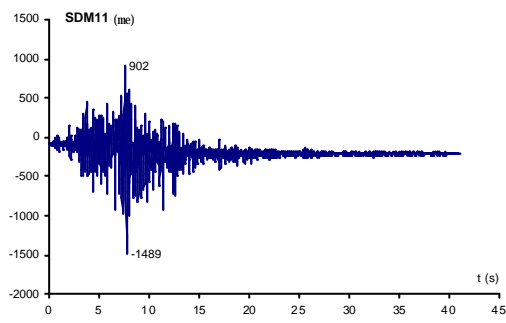


Figura 5.88

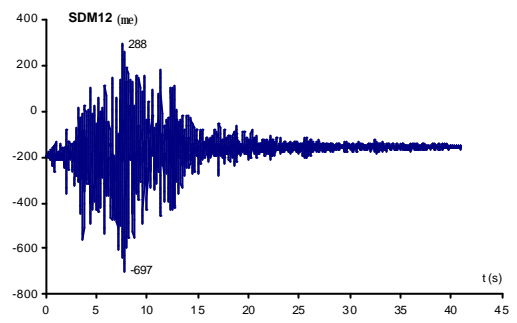


Figura 5.89

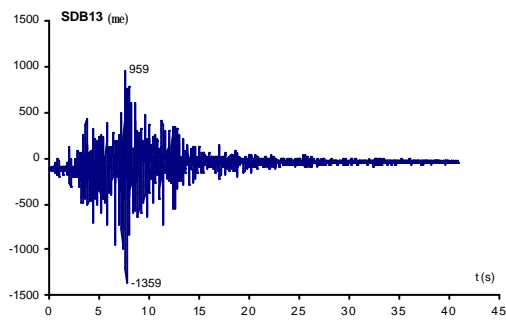


Figura 5.90

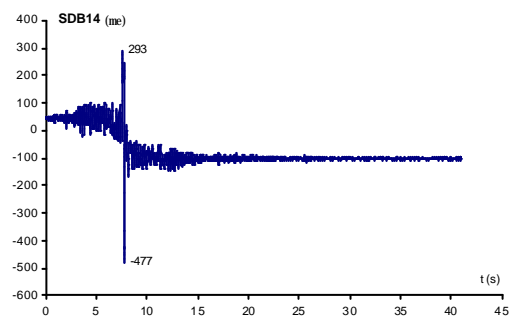


Figura 5.91

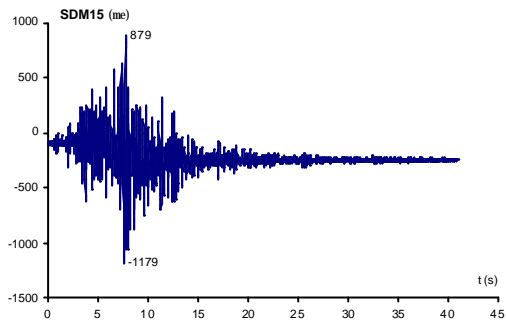


Figura 5.92

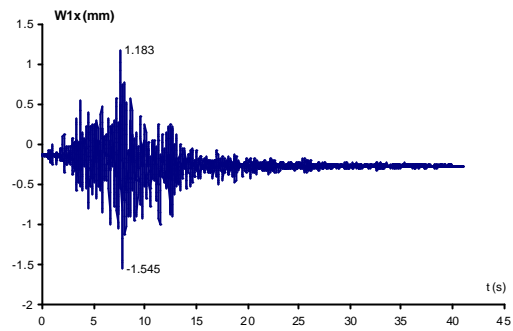


Figura 5.93

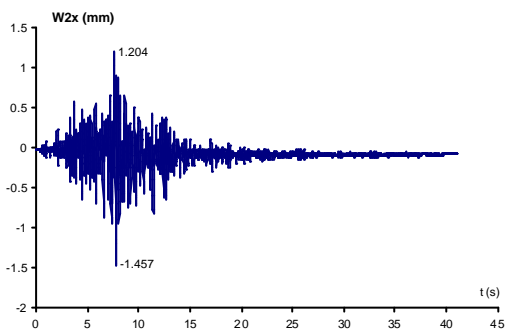


Figura 5.94

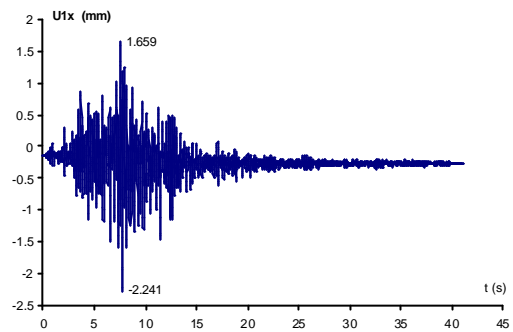


Figura 5.95

Señal escalada a 4 db (Atx simulación/Atx registro Loma Prieta = 1.585)

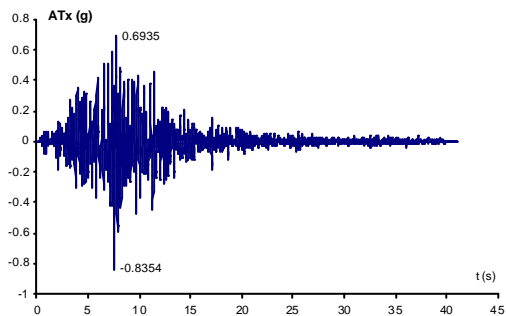


Figura 5.96

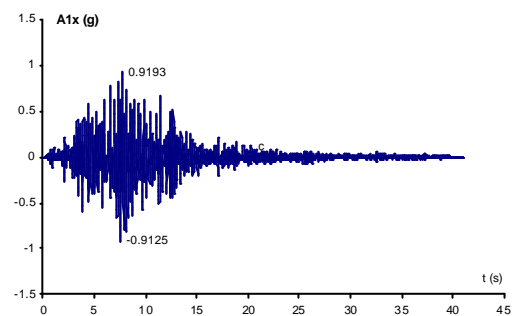


Figura 5.97

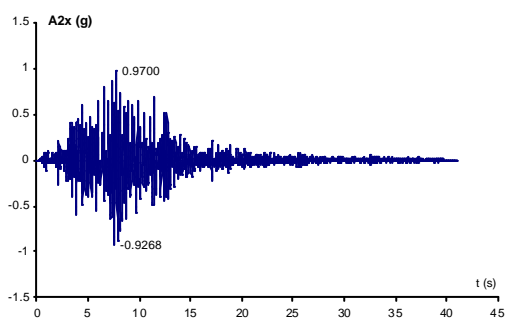


Figura 5.98

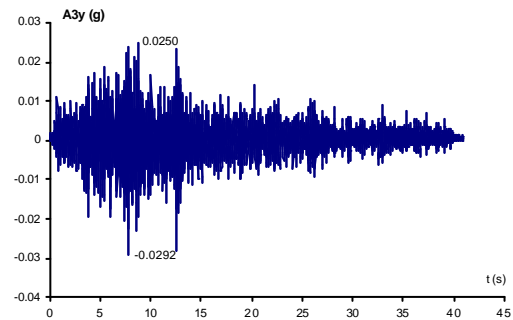


Figura 5.99

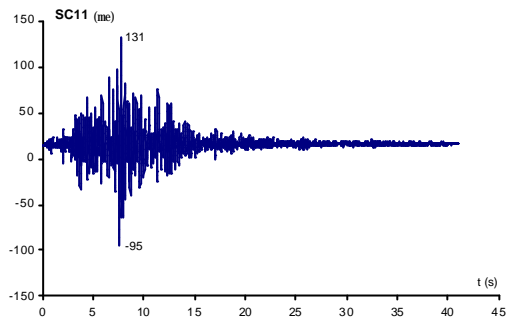


Figura 5.100

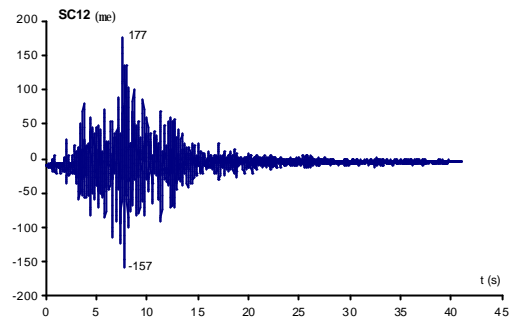


Figura 5.101

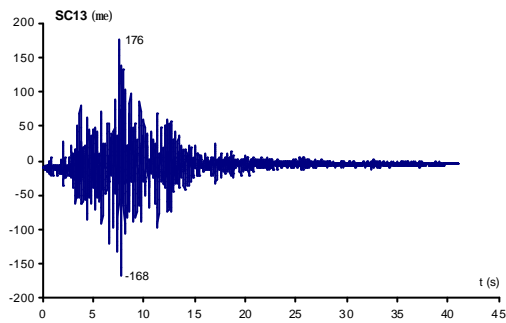


Figura 5.102

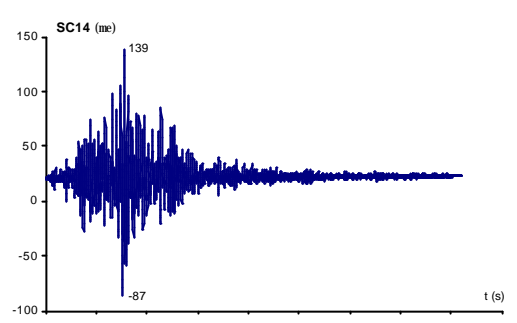


Figura 5.103

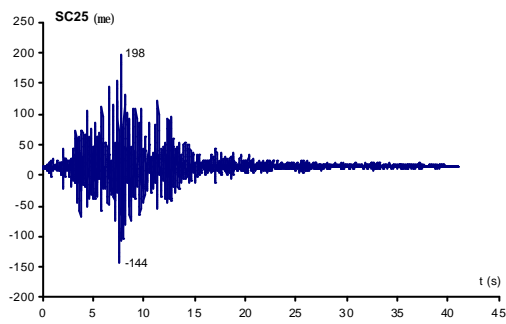


Figura 5.104

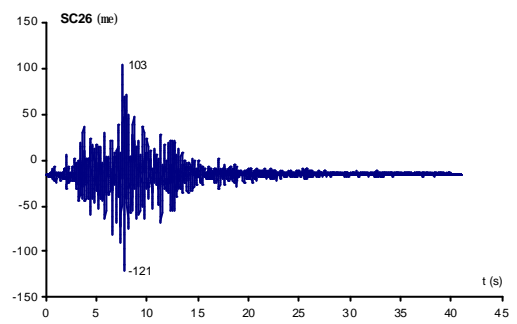


Figura 5.105

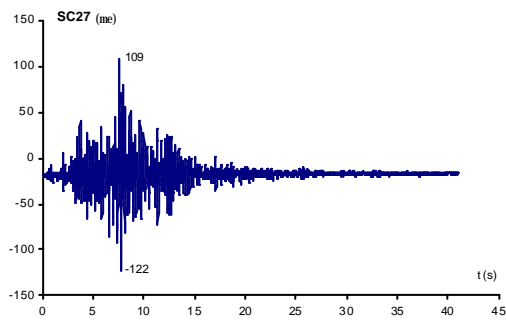


Figura 5.106

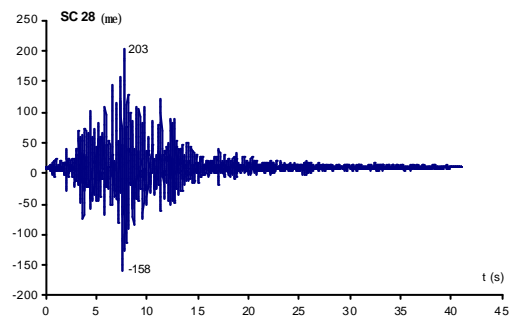


Figura 5.107

5.23 *Capítulo 5*

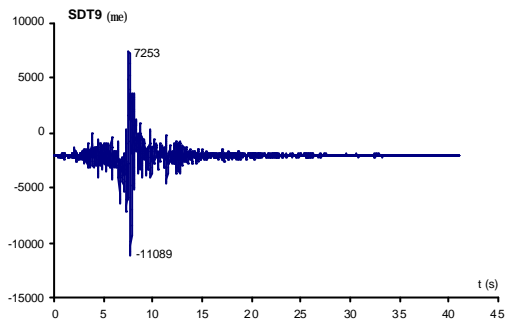


Figura 5.108

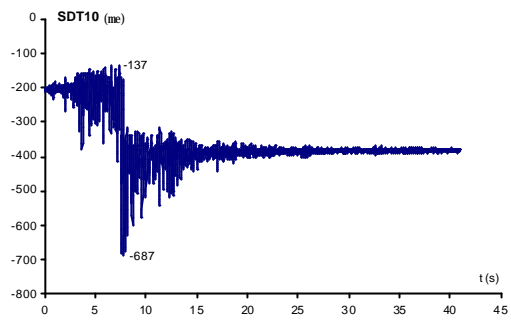


Figura 5.109

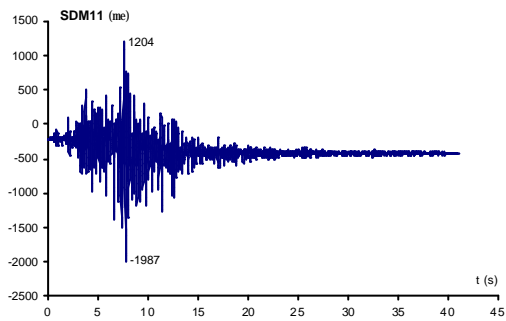


Figura 5.110

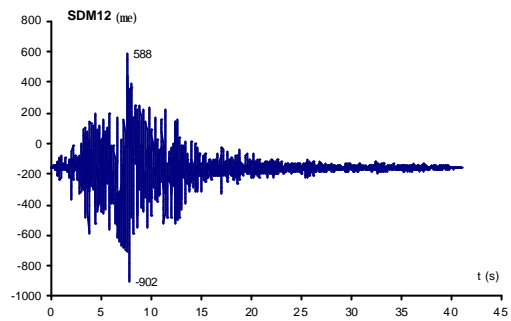


Figura 5.111

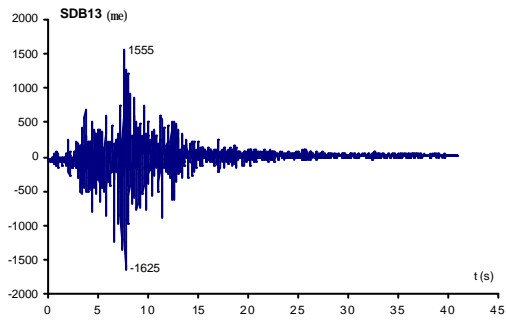


Figura 5.112

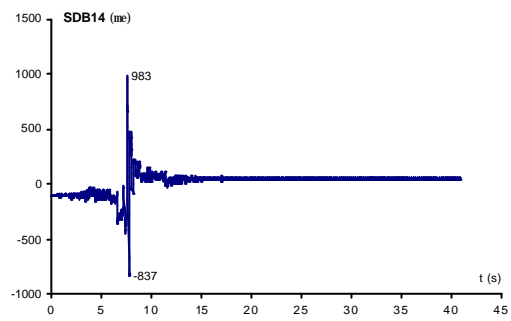


Figura 5.113

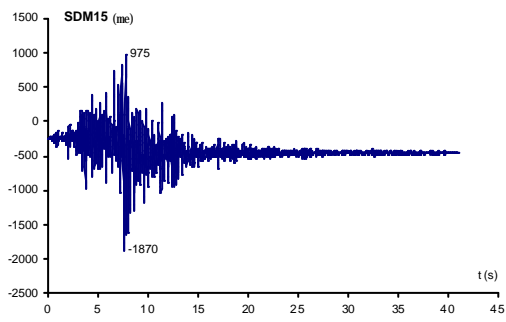


Figura 5.114

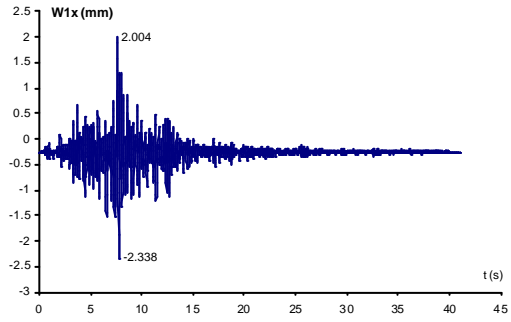


Figura 5.115

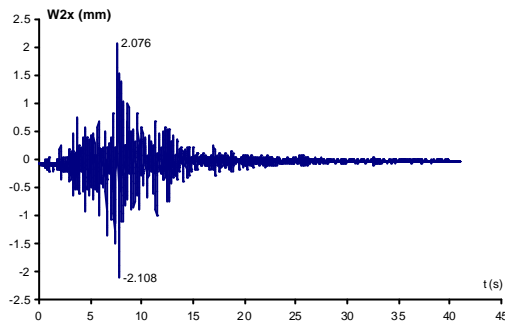


Figura 5.116

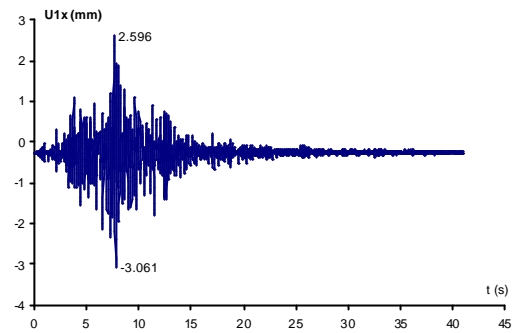


Figura 5.117

Señal escalada a 6 db (Atx simulación/Atx registro Loma Prieta = 1.995)

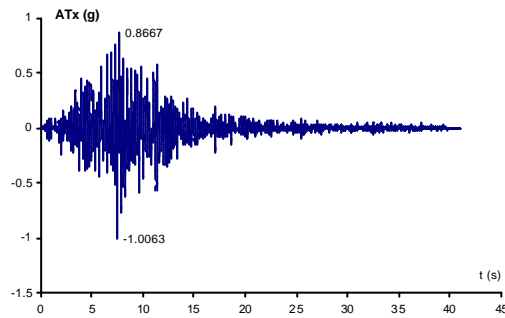


Figura 5.118

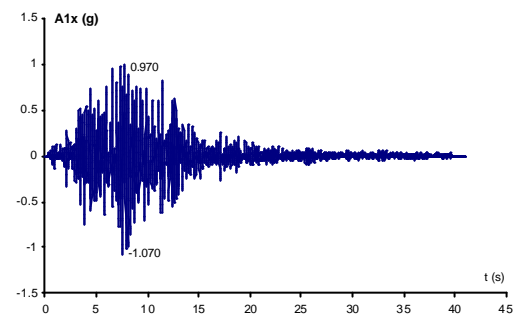


Figura 5.119

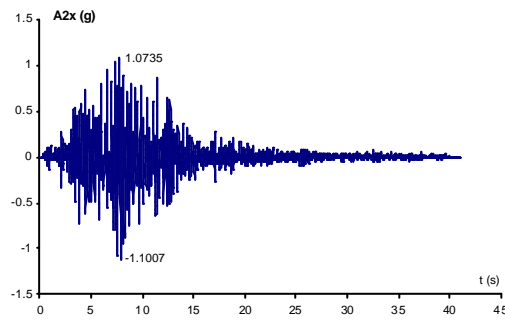


Figura 5.120

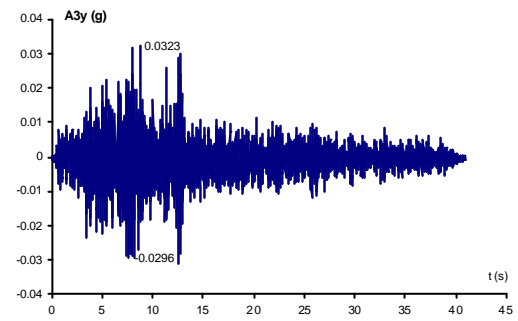


Figura 5.121

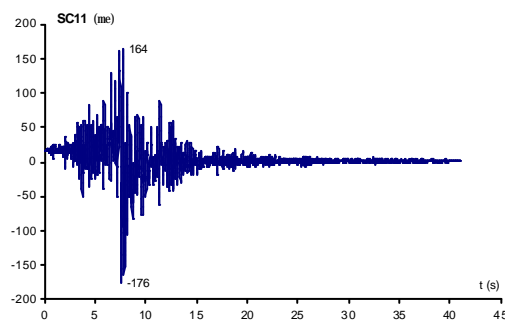


Figura 5.122

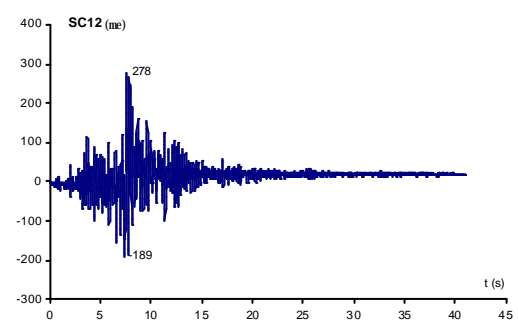


Figura 5.123

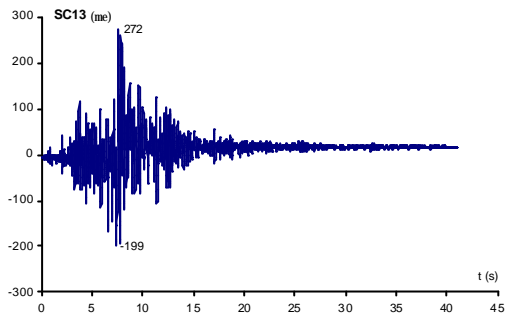


Figura 5.124

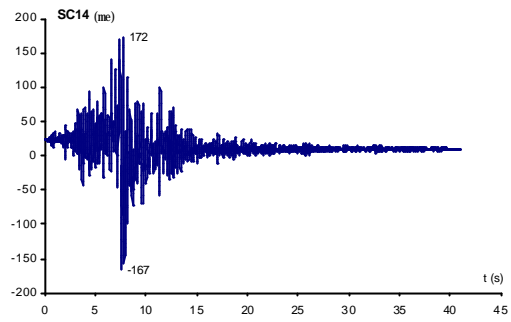


Figura 5.125

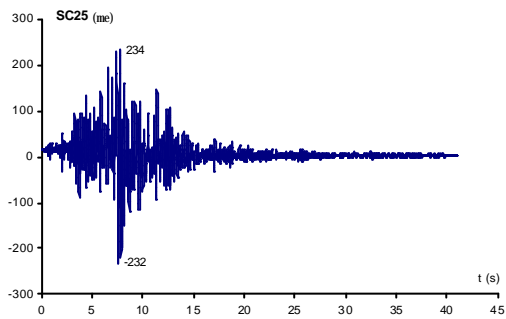


Figura 5.126

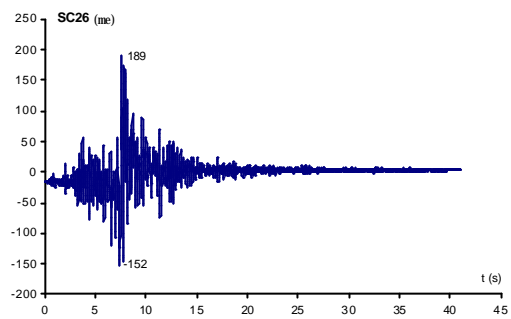


Figura 5.127

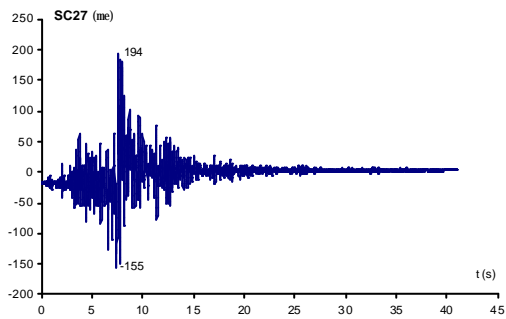


Figura 5.128

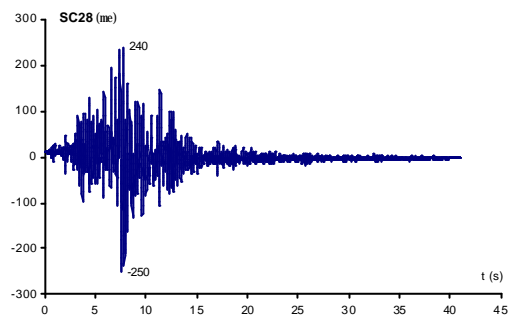


Figura 5.129

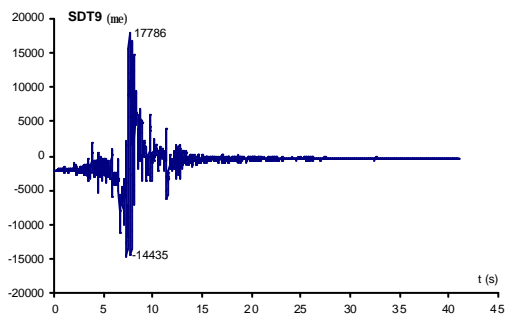


Figura 5.130

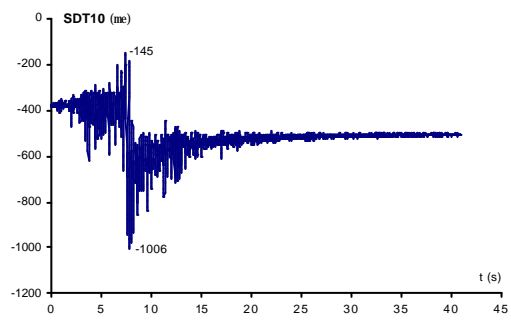


Figura 5.131

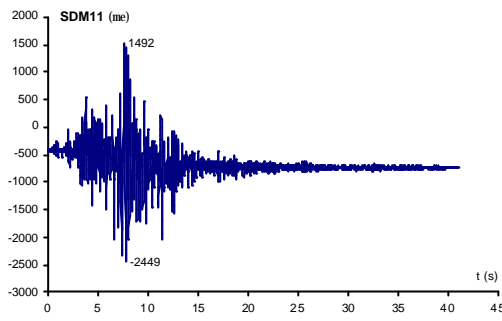


Figura 5.132

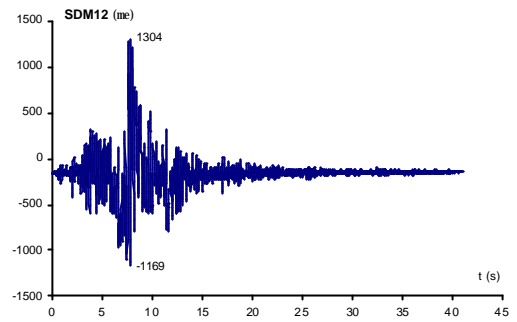


Figura 5.133

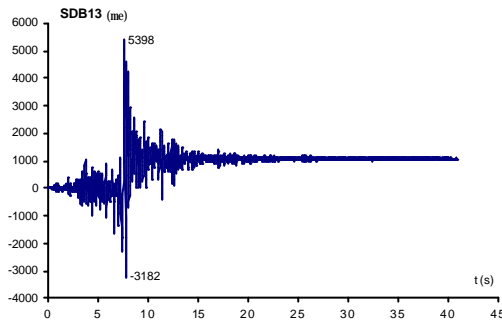


Figura 5.134

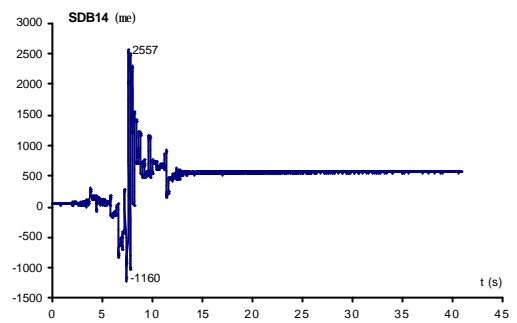


Figura 5.135

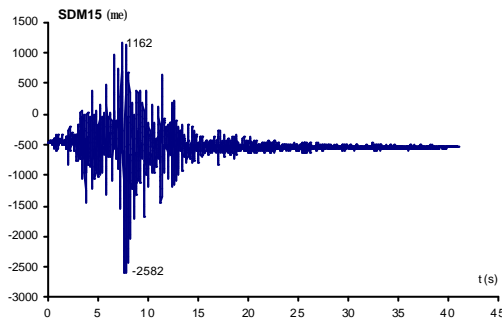


Figura 5.136

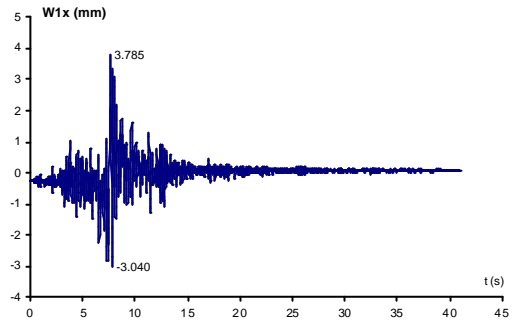


Figura 5.137

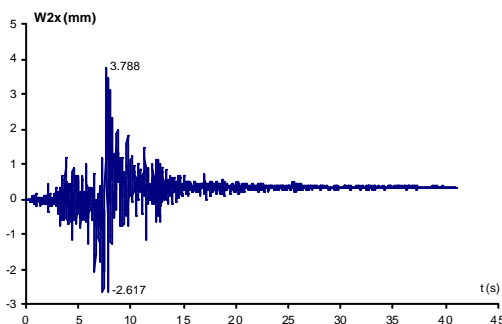


Figura 5.138

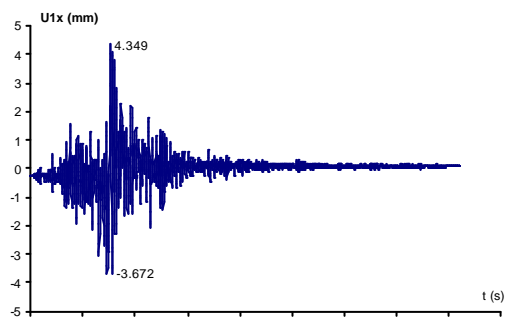


Figura 5.139

Señal escalada a 7 db (Atx simulación/Atx registro Loma Prieta = 2.238)

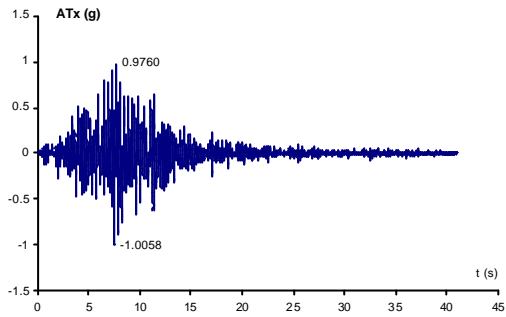


Figura 5.140

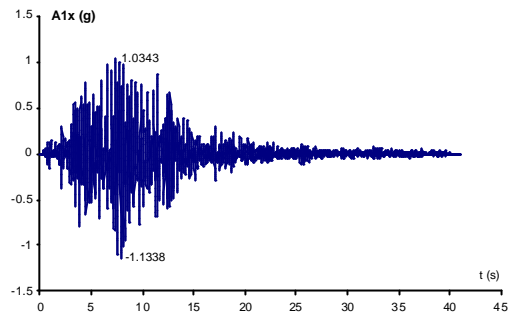


Figura 5.141

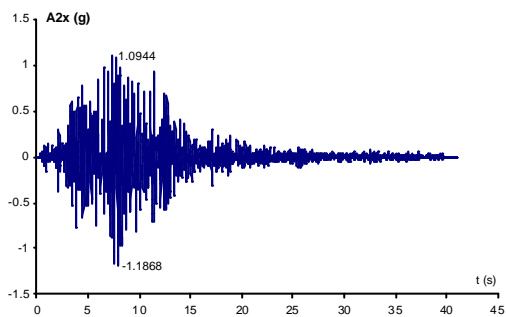


Figura 5.142

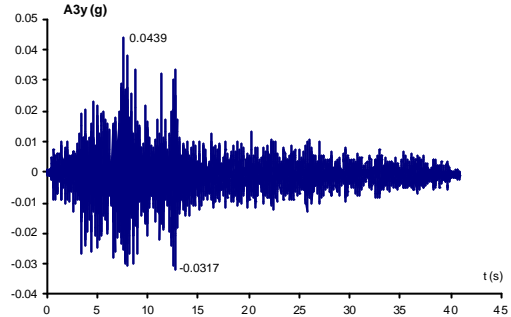


Figura 5.143

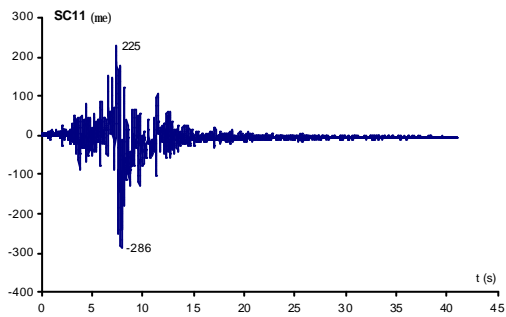


Figura 5.144

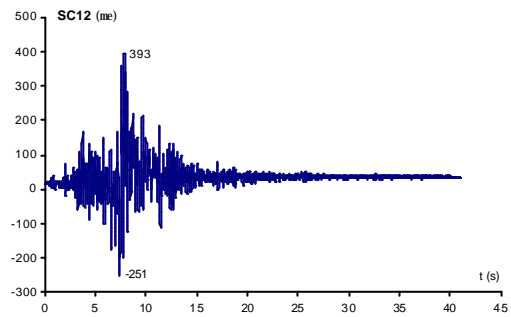


Figura 5.145

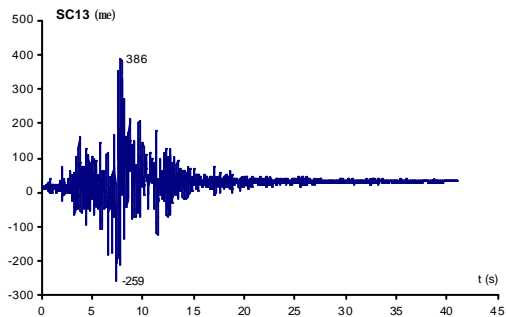


Figura 5.146

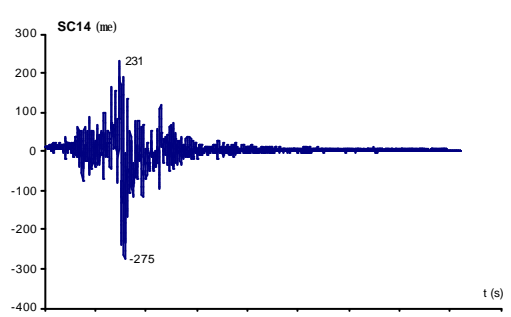


Figura 5.147

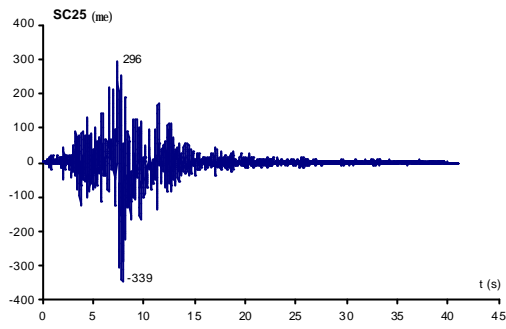


Figura 5.148

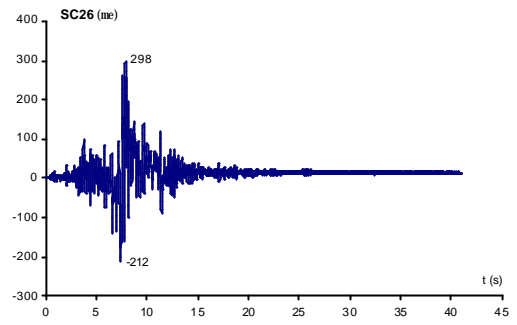


Figura 5.149

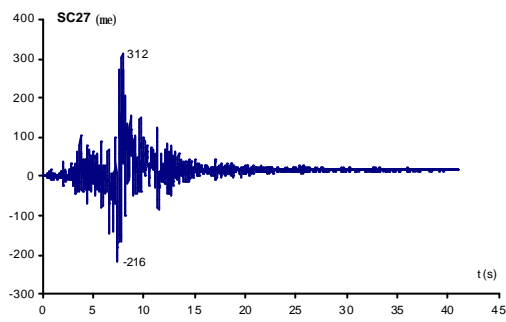


Figura 5.150

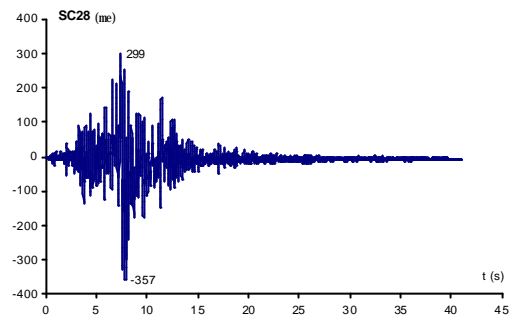


Figura 5.151

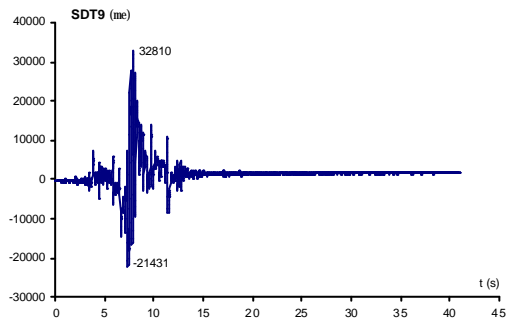


Figura 5.152

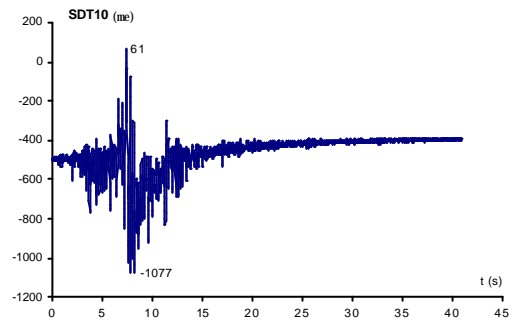


Figura 5.153

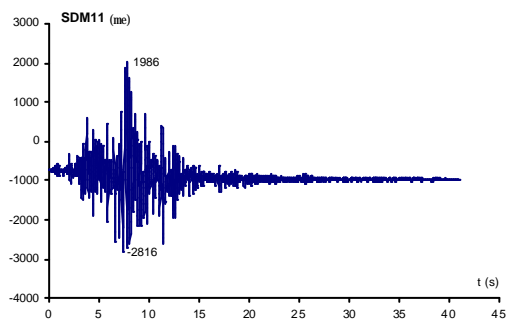


Figura 5.154

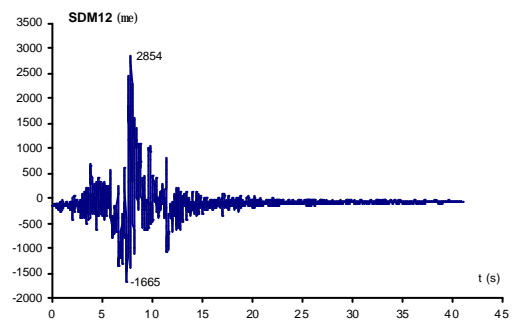


Figura 5.155

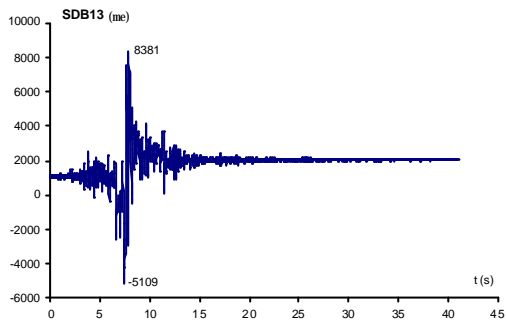


Figura 5.156

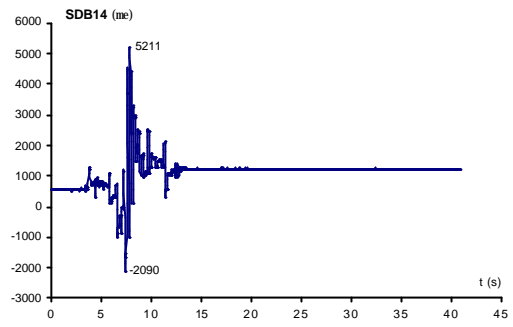


Figura 5.157

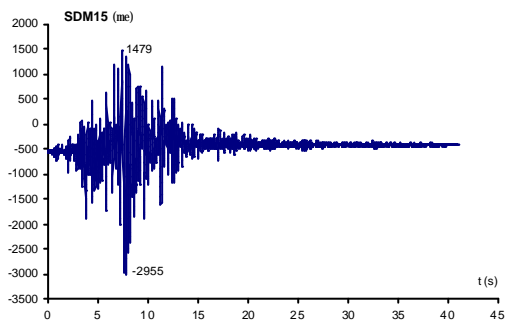


Figura 5.158

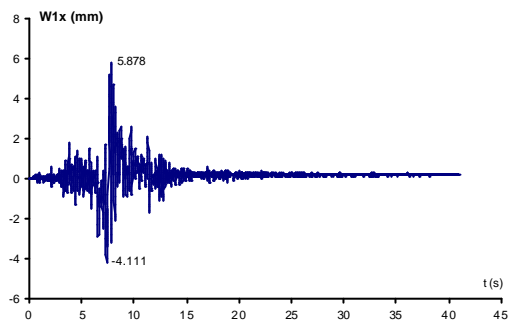


Figura 5.159

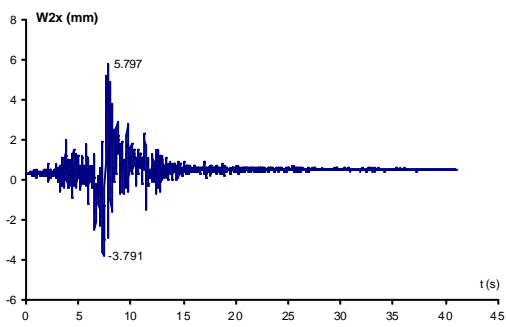


Figura 5.160

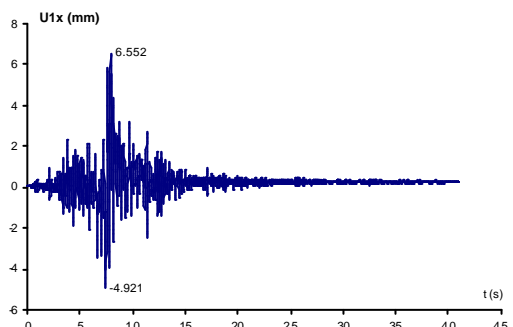


Figura 5.161

5.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.6.1 Determinación de los parámetros dinámicos de la estructura

Estructura sin disipadores

En la estructura sin el sistema disipativo se realizaron dos tests de caracterización: i) un primer test de vibración libre, a partir del impacto con un péndulo y ii) un segundo test de vibración forzada, con excitación controlada de su base.

Del registro del desplazamiento obtenido a partir del test de vibración libre (figuras 5.11 y 5.12), y a partir de las expresiones [5.1] y [5.2] se obtienen los valores aproximados de la frecuencia natural y la fracción del amortiguamiento crítico, con valores de 2.057 Hz y 2.13% respectivamente.

Partiendo de los resultados obtenidos en el test de vibración libre, el test de vibración forzada se acotó a un rango de frecuencias comprendido entre los 0.5 y 5 Hz, barriéndolo con incrementos de 0.007 Hz. A partir de las medidas observadas, se detecta un solo modo de vibración, con una frecuencia de 2.0137 Hz (figuras 5.13 - 5.25). La fracción del amortiguamiento crítico, calculada a partir de las medidas efectuadas por los transductores de desplazamiento (figuras 5.24 y 5.25) y de la ecuación [5.3], resulta del 2.2%.

Asimilando la estructura a un oscilador de un grado de libertad con comportamiento elástico, con toda la masa concentrada en su dintel, se puede estimar su rigidez a partir de la expresión:

$$K = (2\pi f_n)^2 \cdot M \quad [5.3]$$

A partir de una masa M de 8380 Kg y una frecuencia natural f_n de 2.0137 Hz, la rigidez de la estructura K resulta de 1341508 N/m.

Estructura con disipadores

En el sistema estructural con disipadores se realizó un test de vibración forzada para determinar sus características dinámicas. Se amplió el rango de barrido de frecuencias de 1 a 30 Hz, con incrementos de 0.018 Hz. Aún habiendo excitado el pórtico en el plano de disipación, los registros correspondientes a las aceleraciones del pórtico frontal A_{1x} y dorsal A_{2x} (figuras 5.26 Y 5.27 respectivamente), y al desplazamiento frontal W_{1x} (figura 5.28), señalan los tres modos de vibración posibles. Se observa una actitud resonante más acentuada a los 10.708 Hz, casi por igual en los acelerómetros A_{1x} y A_{2x} , razón por la cual se identifica con el modo de flexión en el plano del sistema disipativo. Las menos acusadas, a 17 y a 22 Hz, se corresponden con el modo de torsión y flexión en el plano lateral.

Para determinar la fracción del amortiguamiento estructural equivalente, se parte de la amplitud del desplazamiento del pórtico frontal en relación a la frecuencia de la excitación (figura 5.162). Según la ecuación [5.3], el valor en cuestión resulta del 8.89%.

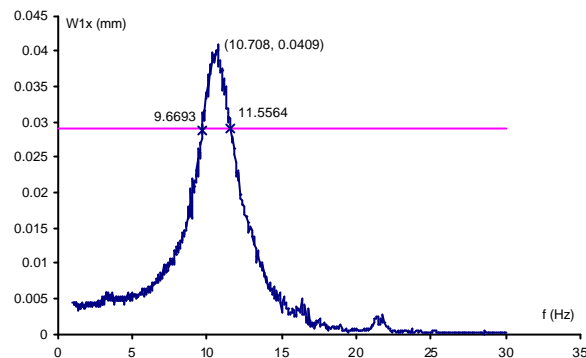


Figura 5.162 Amplitud del desplazamiento en el test de barrido de frecuencias (sistema estructural con disipadores)

5.6.2 Análisis de la aceleración máxima de la estructura

La respuesta de ambos pórticos con disipadores (desde el registro a -9dB hasta el de escala máxima, de 2 dB), registrada a través de los transductores de desplazamiento y aceleración, ha sido prácticamente simétrica, y los valores medidos por el acelerómetro A_{3y} han resultado inferiores al 4% de los manifestados por los acelerómetros A_{1x} y A_{2x} . La respuesta se puede considerar limitada a la misma dirección de la excitación, comportándose la estructura como un sistema de un grado de libertad.

El contenido en frecuencias del registro Santa Cruz puede ser observado a partir de su transformada de Fourier (figura 5.163). En ella se manifiesta un predominio de las frecuencias comprendidas entre 2 y 7 Hz, situadas entre la frecuencia natural del pórtico sin disipadores (2.013 Hz) y con disipadores (10.78 Hz). Las figuras 5.164, 5.166, 5.168, 5.170, 5.172 y 5.174 representan los espectros de frecuencias correspondientes a las excitaciones empleadas en los tests. En la tabla 5.1 se puede apreciar, de forma discreta y por frecuencias, la relación entre las amplitudes del espectro original y las correspondientes a las excitaciones empleadas. El valor de la relación está próximo, en las frecuencias dominantes, al factor de escala utilizado para la determinación de la excitación a partir del registro original.

Analizando la evolución de las FTs (transformadas de Fourier) de la respuesta en aceleraciones de la estructura en tests sucesivos (figuras 5.165, 5.167, 5.169, 5.171, 5.173 y 5.175) se aprecia como, conforme aumenta el factor de escala empleado en la excitación, y debido al aumento del grado de plastificación de los disipadores, el centro de gravedad de los espectros se desplaza hacia frecuencias

inferiores. Recogiendo de las anteriores representaciones las amplitudes de las frecuencias dominantes, y calculando su cociente respecto a las amplitudes en la excitación, se ha calculado y representado (figura 5.176-a) el factor de amplificación *FA*. Se puede apreciar como la plastificación de los disipadores disminuye el efecto de amplificación dinámica. En la figura 5.176-b se observa de forma más clara como, en el último de los tests, empieza a disminuir la amplificación en la frecuencia de 6.32 Hz para aumentar la correspondiente a la frecuencia de 2.85 Hz, lo cual parece indicar que el período de la estructura en los instantes de máxima plastificación de los disipadores se acerca a la zona más resonante del espectro de respuesta elástico (figura 5.177).

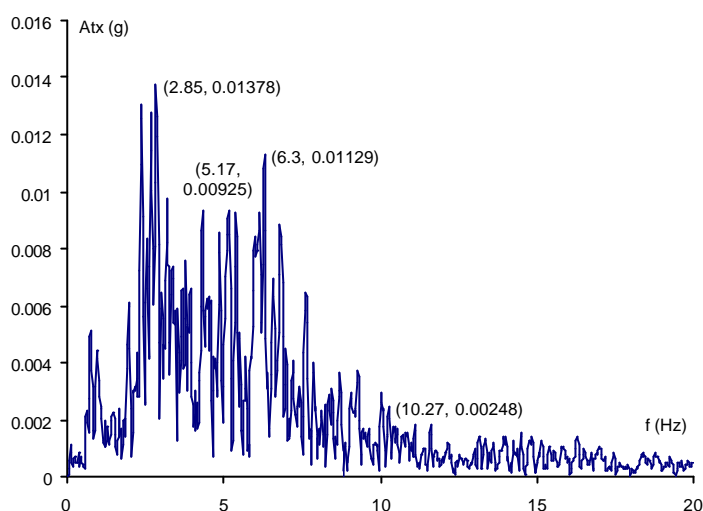


Figura 5.163 Registro de Loma Prieta (Santa Cruz) en su forma espectral

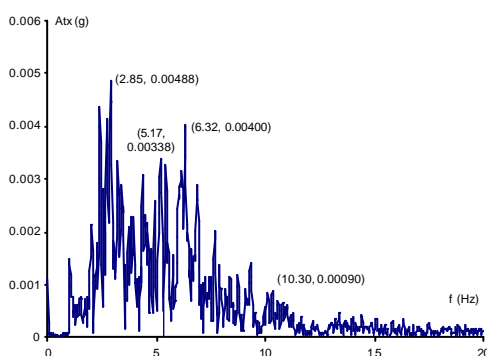


Figura 5.164 Espectro de la aceleración de base a -9dB

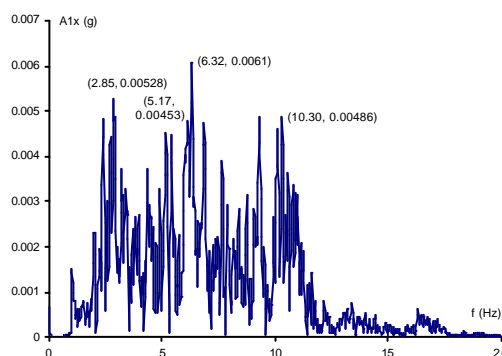


Figura 5.165 Espectro de la aceleración superior a -9dB

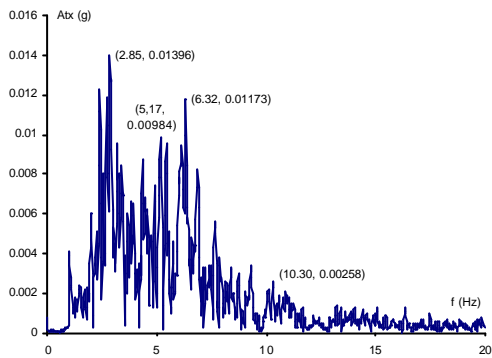


Figura 5.166 Espectro de la aceleración de base a 0dB

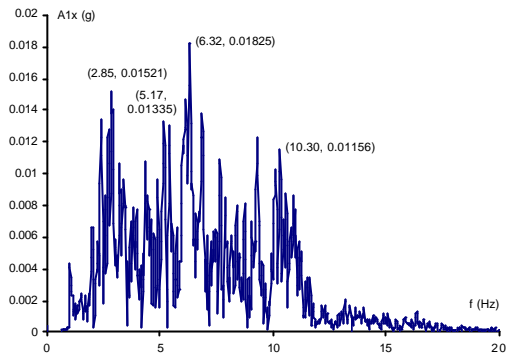


Figura 5.167 Espectro de la aceleración superior a 0dB

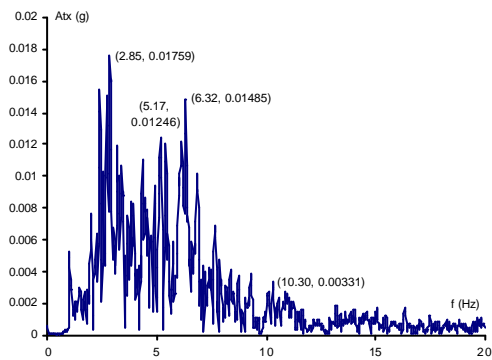


Figura 5.168 Espectro de la aceleración de base a 2dB

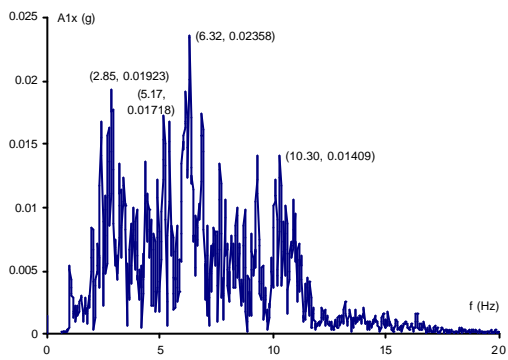


Figura 5.169 Espectro de la aceleración superior a 2dB

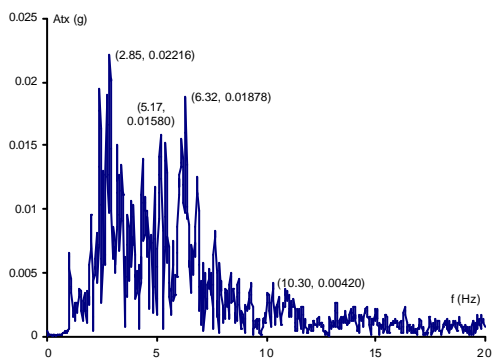


Figura 5.170 Espectro de la aceleración de base a 4dB

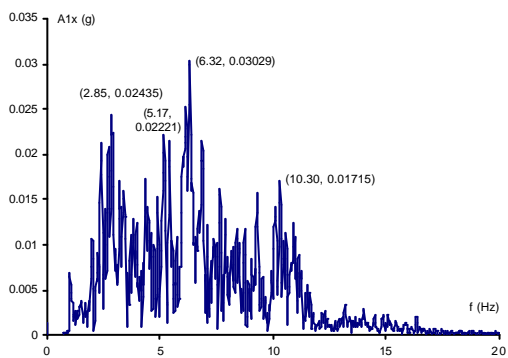


Figura 5.171 Espectro de la aceleración superior a 4dB

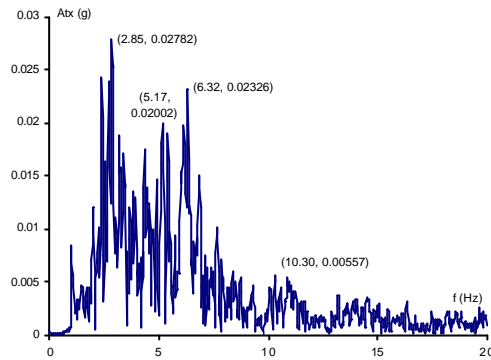


Figura 5.172 Espectro de la aceleración de base a 6dB

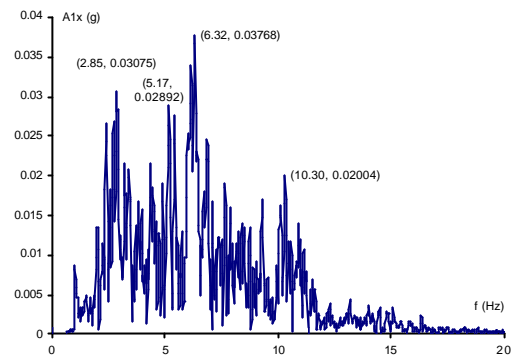


Figura 5.173 Espectro de la aceleración superior a 6dB

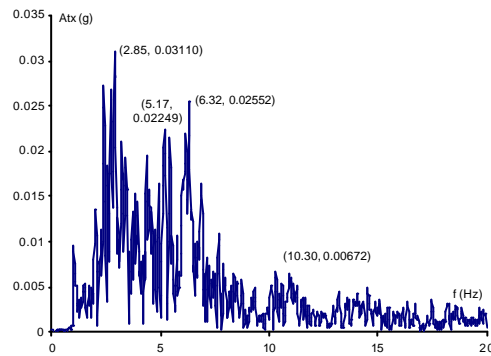


Figura 5.174 Espectro de la aceleración de base a 7dB

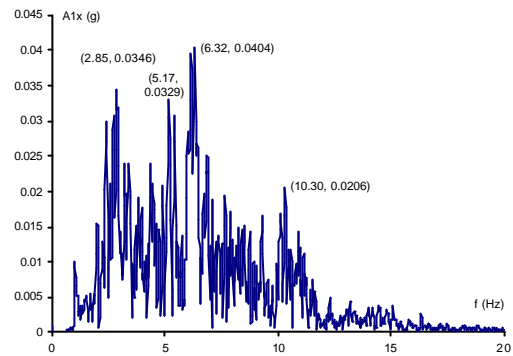


Figura 5.175 Espectro de la aceleración superior a 7dB

Tabla 5.1 Relación entre amplitudes de los espectros de aceleraciones de base y las correspondientes al espectro del registro de Santa Cruz, en sus frecuencias dominantes

<i>F.E.</i> \ f (Hz)	2.85	5.17	6.32	10.3
0.353	0.354	0.365	0.354	0.520
1	1.013	1.064	1.039	1.647
1.259	1.276	1.347	1.315	1.913
1.585	1.608	1.708	1.663	2.428
1.995	2.019	2.164	2.060	3.220
2.238	2.257	2.431	2.260	3.884

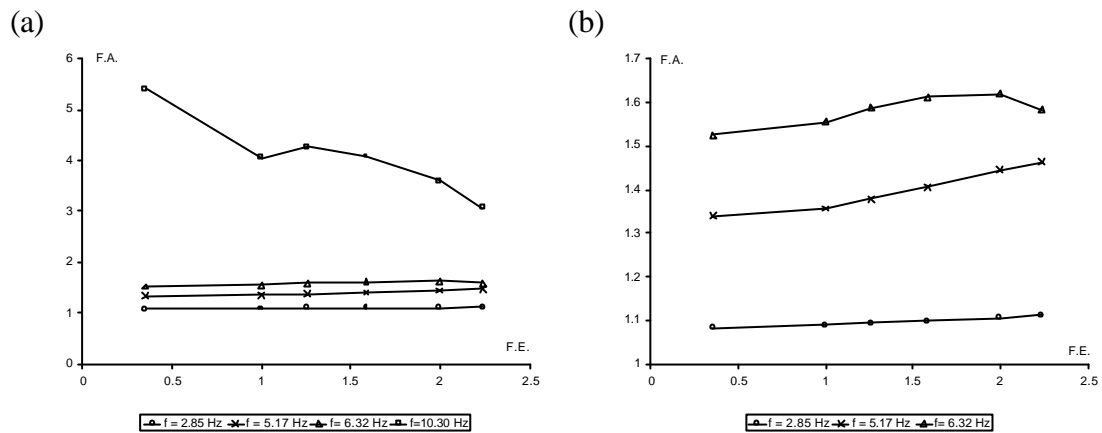


Figura 5.176 Representación del Factor de Amplificación frente al Factor de Escala aplicado a la excitación

A través de los distintos tests se ha observado la evolución de la aceleración máxima de la estructura (y por tanto del cortante de base, el cual se mantiene proporcional) conforme aumenta el factor de escala FE aplicado al registro original (figura 5.178). La acción mitigadora de los disipadores se produce a partir del segundo test, en el cual se inicia el proceso de plastificación. En la misma figura aparecen las rectas numéricas correspondientes a la respuesta lineal y elástica de la estructura con disipadores y sin disipadores. La respuesta lineal y elástica mantiene una diferencia con la respuesta experimental elástica (a -9dB de amplificación) del 10.8 %. En el último de los tests, donde se desarrolla el mayor trabajo de deformación plástica, la respuesta elástica de la estructura con disipadores resulta 1.55 veces superior a la respuesta experimental, mientras que la respuesta experimental se aproxima, de forma progresiva, a la respuesta de la estructura sin disipadores, mucho más flexible.

Las deformaciones medidas por la galga central $STD9$ ($3813 \mu\epsilon$ según se aprecia en la figura 5.64) junto a la aparición de deformación residual confirman el inicio de la plastificación a partir del segundo test. La galga $SDB13$, situada en la zona disipativa inferior del disipador, no manifiesta aún plastificación. Durante los tests de caracterización de los disipadores ya se observó que las zonas extremas del cuerpo disipador plastificaban posteriormente a la zona central.

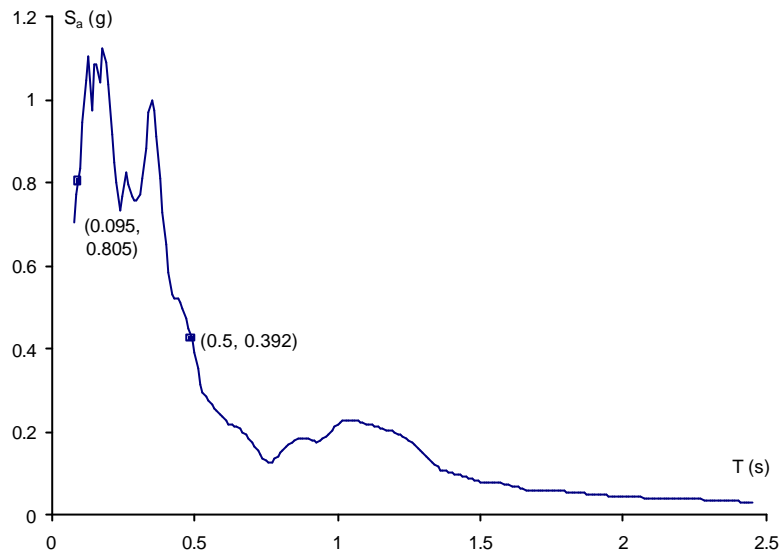


Figura 5.177 Espectro de respuesta en aceleraciones para el registro de Santa Cruz durante el terremoto de Loma Prieta (1989) para una fracción de amortiguamiento crítico del 8.89%

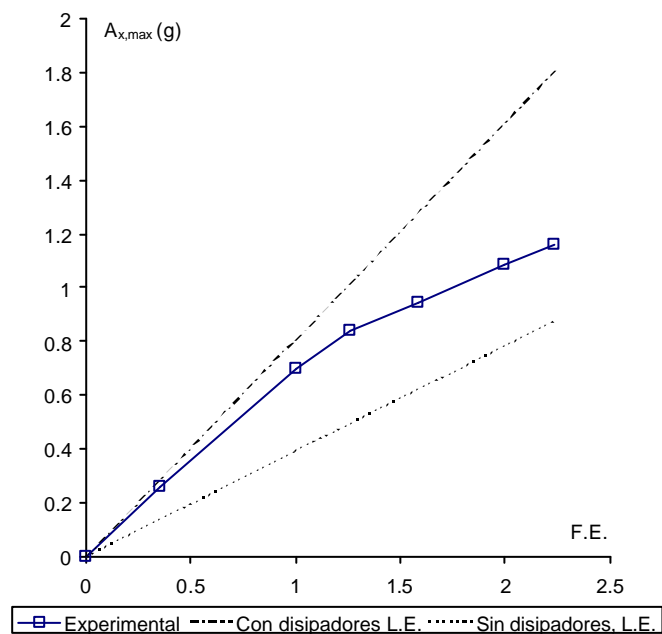


Figura 5.178 Respuesta máxima en aceleración observada en los distintos test, comparada con las respuestas lineales y elásticas de la estructura con disipadores y sin disipadores

5.6.2 Análisis de desplazamientos

En la figura 5.179 se observa la evolución del desplazamiento máximo experimental de la estructura U_{1x} conforme se incrementa el factor de escala FE aplicado al registro de Santa Cruz. En la misma figura se incluyen las curvas numéricas correspondientes a las estructuras con disipadores y sin disipadores, en comportamiento lineal y elástico. Se puede apreciar que el desplazamiento experimental resulta 8.9 veces inferior al que manifestaría la estructura sin disipadores en comportamiento lineal y elástico (más flexible) y sólo 1.55 veces superior al de la estructura lineal y elástica con disipadores (más rígida).

La figura 5.180 enfrenta los valores máximos de los desplazamientos relativos U_{1x} (desplazamiento relativo entre zona superior de la estructura y su base) y W_{1x} (desplazamiento entre extremos del disipador frontal) y el FE escala aplicado a las excitaciones. Durante la fase lineal y elástica, el desplazamiento total es aproximadamente de 1.5 veces la deformación del disipador. A medida que aumenta la deformación plástica en los disipadores, la relación entre U_{1x} y W_{1x} decrece (figura 5.181) debido a que el cortante que se transmite a los muros está limitado ante el comportamiento plástico de los disipadores (figura 5.182).

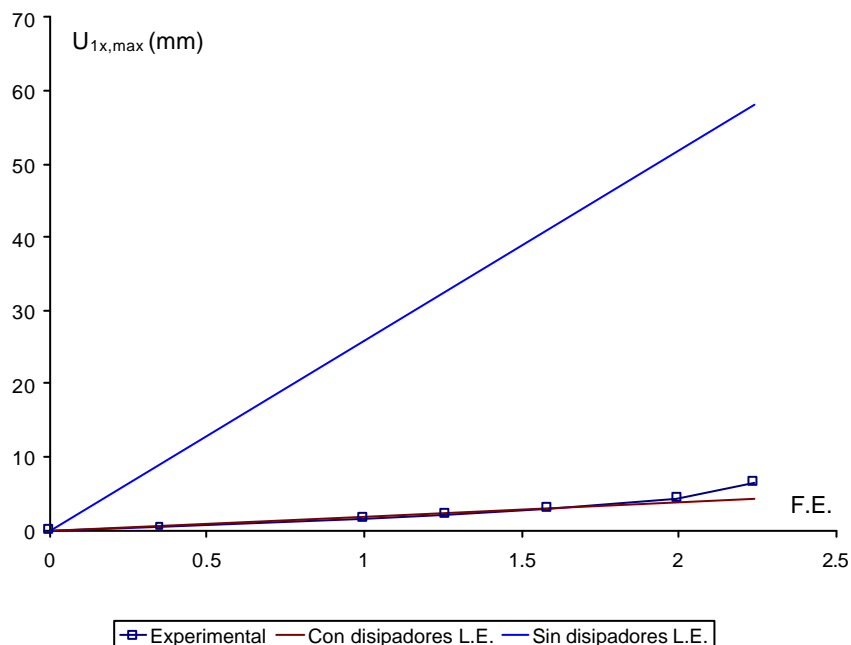


Figura 5.179 Desplazamientos máximos observados en los distintos test, comparados con los de la estructura con y sin disipadores en comportamiento lineal y elástico

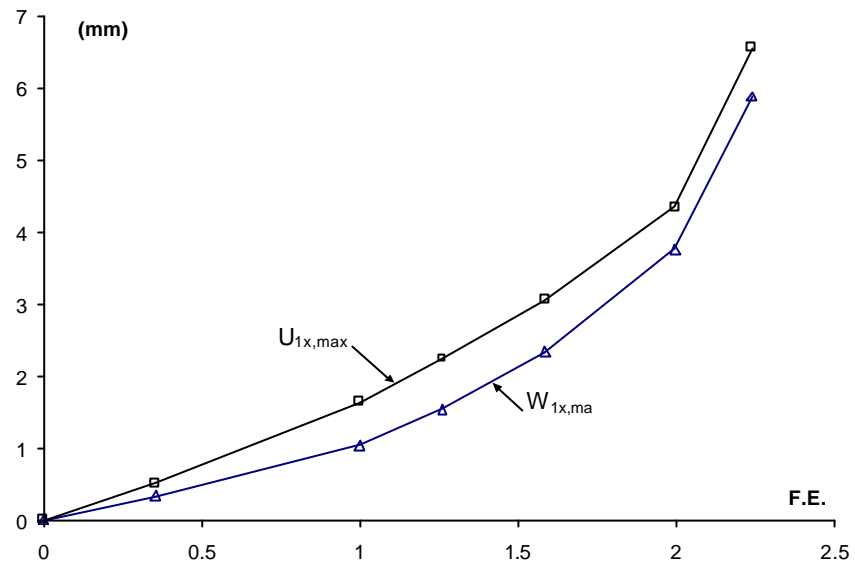


Figura 5.180 Evolución de los desplazamientos relativos máximos $U_{1x,max}$ y $W_{1x,max}$ en tests sucesivos en relación al FE aplicado a la excitación

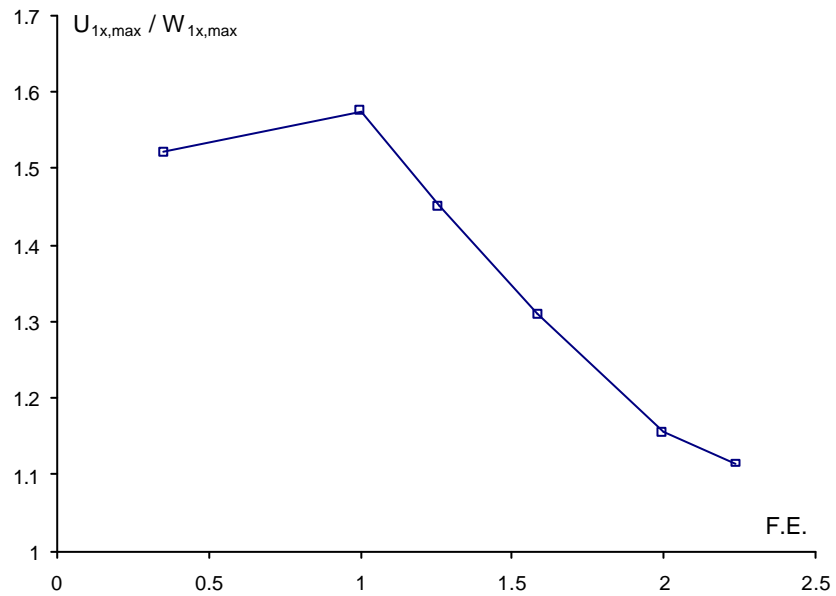


Figura 5.181 Evolución en los distintos tests del cociente entre desplazamiento máximo de la estructura y desplazamiento entre extremos de disipador

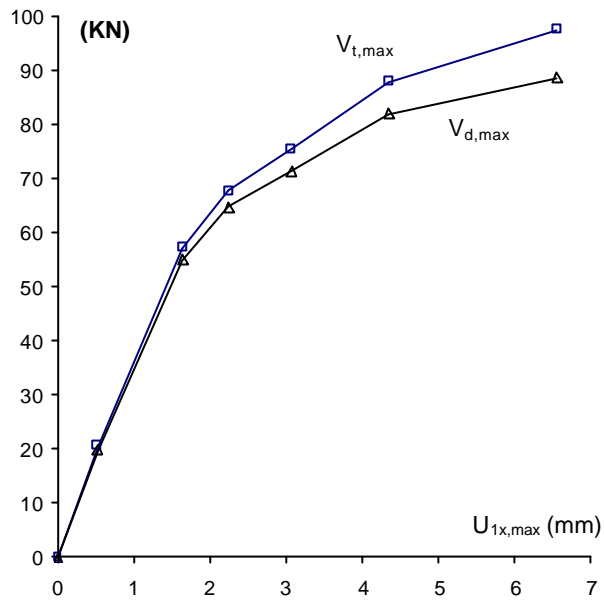


Figura 5.182 Representación del esfuerzo cortante total y del esfuerzo cortante soportado por los disipadores en relación con el desplazamiento máximo de la estructura

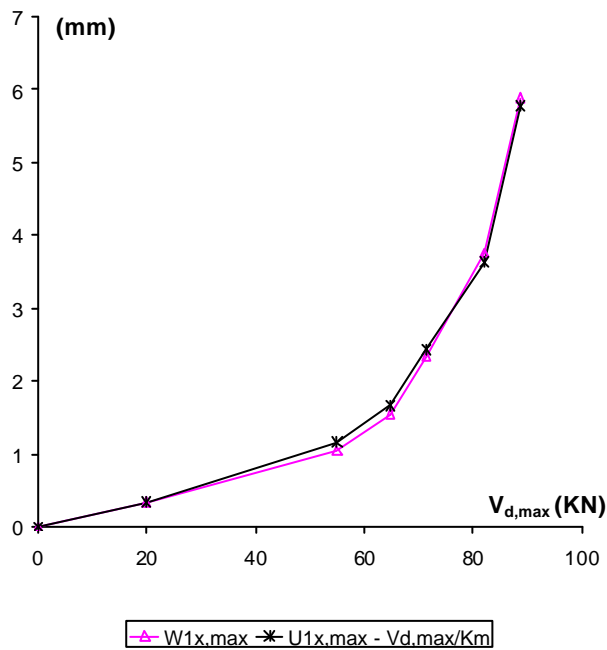


Figura 5.183 Comparación entre el desplazamiento entre extremos de disipador medido de forma directa e indirecta (a partir de la hipótesis de comportamiento lineal del muro)

A partir de los resultados obtenidos en el primero de los tests, se puede calcular una rigidez total de los muros de hormigón K_m de 113.31 KN/mm. La figura 5.183 compara el desplazamiento experimental medido W_{Ix} con el obtenido deduciendo del desplazamiento máximo de la estructura U_{Ix} el desplazamiento superior de los muros. La buena correlación entre ambas curvas confirma un comportamiento lineal del muro.

5.6.4 Análisis de la respuesta histerética. Energía disipada.

A partir de los registros de desplazamiento máximo (U_{Ix}) y de la evolución temporal de la fuerza inercial ($m A_{xI}$), se ha representado la respuesta histerética de la estructura para cada uno de los tests realizados (figuras 5.184 - 5.189). Se observa un comportamiento prácticamente lineal en el primero de los tests. A partir del segundo test se produce ya histéresis, en aumento conforme aumenta la intensidad del movimiento de la mesa vibrante. La energía disipada por el conjunto estructural se ha determinado a partir del área interior de las curvas, anotándose en su margen inferior izquierdo.

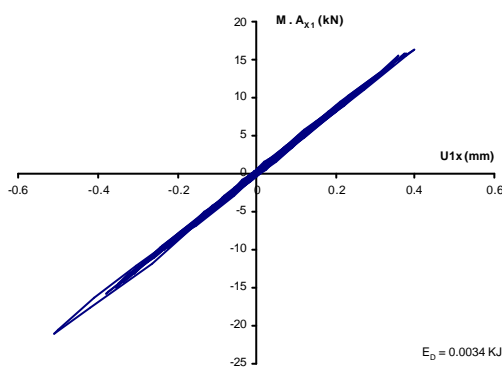


Figura 5.184 Respuesta histerética estructura a -9dB

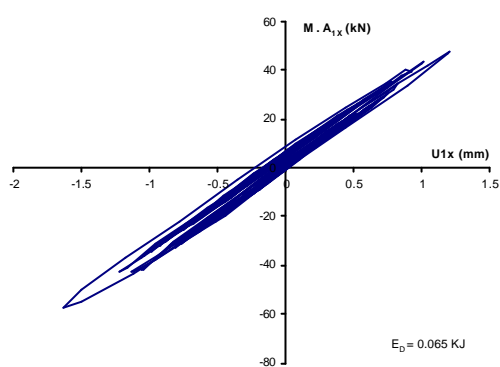


Figura 5.185 Respuesta histerética estructura a 0dB

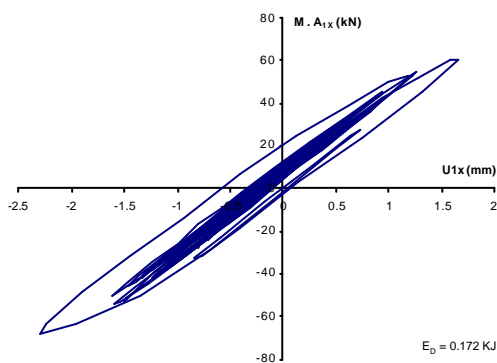


Figura 5.186 Respuesta histerética estructura a 2 dB

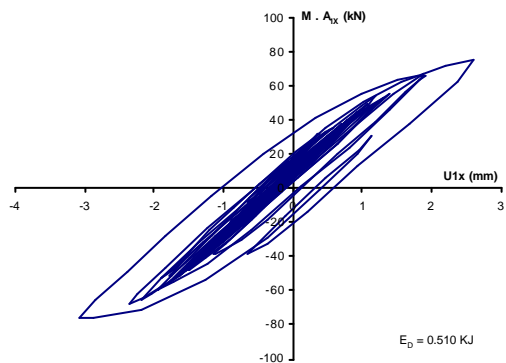


Figura 5.187 Respuesta histerética estructura a 4 dB

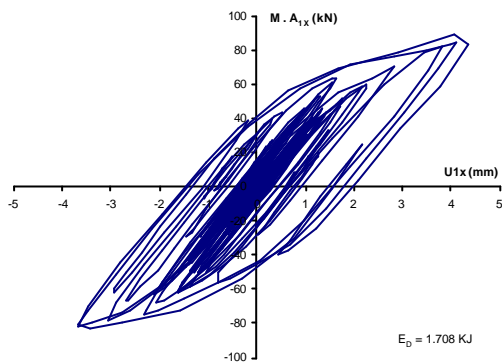


Figura 5.188 Respuesta histerética estructura a 6 dB

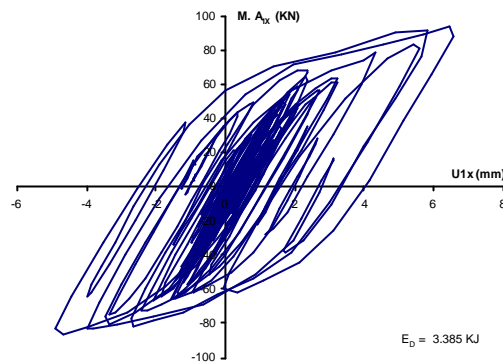


Figura 5.189 Respuesta histerética estructura a 7dB

Housner (1956) propuso un método de cálculo sísmico en clave energética para estructuras que manifestaran deformación plástica. Observó que la demanda de energía de deformación plástica de una estructura ante un evento sísmico podía determinarse de forma aproximada a partir de la expresión:

$$E_P = E_H - E_E \quad [5.4]$$

Donde E_E representa la energía elástica acumulada previo inicio de la formación de rótulas plásticas y E_H la energía que acumularía una estructura lineal y elástica de un grado de libertad con el mismo período al de la estructura real. Housner proponía la determinación de E_H a partir del pseudoespectro de velocidades:

$$E_H = \frac{1}{2} m S_{v,T}^2 \quad [5.5]$$

donde m = masa total de la estructura real, $S_{v,T}$ = pseudovelocidad obtenida con un amortiguamiento estructural ν y el mismo período fundamental T de la estructura real. El método propuesto se limita a un comportamiento plástico que no comporte cambios significativos en los parámetros dinámicos de la estructura. Housner advierte que en caso que estos cambios en los parámetros dinámicos fueran importantes y para períodos elásticos superiores a los 0.5 segundos (dato vinculado al espectro de respuesta medio adoptado por Housner), el comportamiento plástico desacoplaría parcialmente la estructura de su base y la demanda energética resultaría inferior a la correspondiente a la estructura elástica.

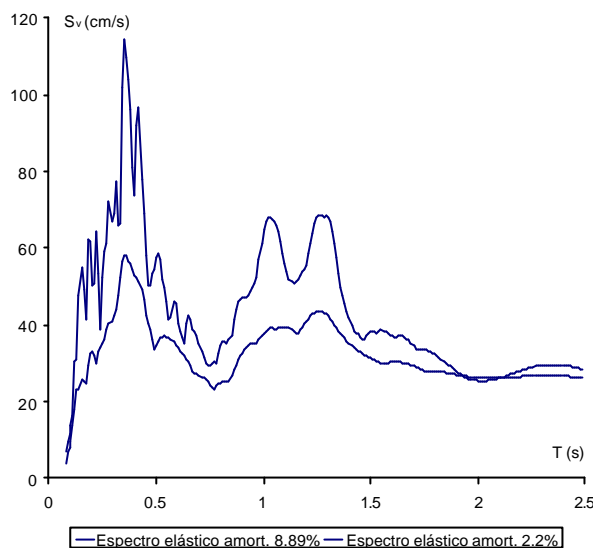


Figura 5. 190 Espectro de respuesta de velocidades para el registro de Santa Cruz

El sistema estructural ensayado dispone de un período natural, bajo comportamiento elástico del sistema disipativo, próximo a 0.1 segundos. Observando el espectro de respuesta de velocidades del registro de Santa Cruz (figura 5.190), la plastificación de la estructura debería conducir a un aumento de la energía introducida al sistema.

Se ha evaluado la energía introducida al sistema, $E_D + E_E$, de forma experimental y para distintos grados de plastificación del sistema disipativo, comparándola con los valores que proporciona la ecuación [5.4]. La energía elástica E_E se ha valorado basándose en la siguiente ecuación:

$$E_E = \frac{1}{2} V_y W_{x1,y} + \frac{1}{2} K U_{x1,max}^2 \quad [5.6]$$

donde V_y y $W_{x1,y}$ representan, respectivamente, el cortante total soportado por los dos disipadores y el desplazamiento a partir del cual estos se comportan de forma no lineal, K es la rigidez de la estructura sin disipadores y $U_{x1,max}$ el desplazamiento máximo observado por la estructura en cada uno de los tests.

En la figura 5.191 se representan los siguientes parámetros en función del período estructural: i) E_H , obtenida a partir de los espectros de velocidades de Santa Cruz para fracciones del amortiguamiento crítico del 2,2% y 8.89% (correspondientes a la estructura flexible con y sin sistema disipativo), ii) la energía disipada total E_D , calculada a partir de los tests 1º, 5º y 6º, y dividida por el factor de escala FE aplicado a la excitación; iii) la suma de la energía disipada y de la máxima energía acumulada por deformación elástica, $E_D + E_E$, dividida por el factor de escala FE aplicado a la excitación. Los valores de las abscisas correspondientes a los valores experimentales se han determinado a partir de la figura 5.176b, en la cual se puede apreciar como evoluciona el Factor de Amplificación en las frecuencias

dominantes a través de los distintos tests y con aumento de la deformación plástica. Se puede observar que la frecuencia de 6.32 Hz ($T = 0.158$ s) llega a su máximo en el 5º test, mientras que la frecuencia de 5.17 Hz ($T = 0.194$ s) se aproxima a su máximo en el último test.

De la figura 5.194 se observa: i) la plastificación de una estructura de elevada rigidez puede conducir a un "input" energético muy superior al predecible a partir de E_H con un período fundamental en comportamiento elástico; ii) en sistemas disipativos de acción relativa, el desplazamiento se concentra en los disipadores, con lo cual no es recomendable considerar la fracción del amortiguamiento crítico atribuible al sistema rígido.

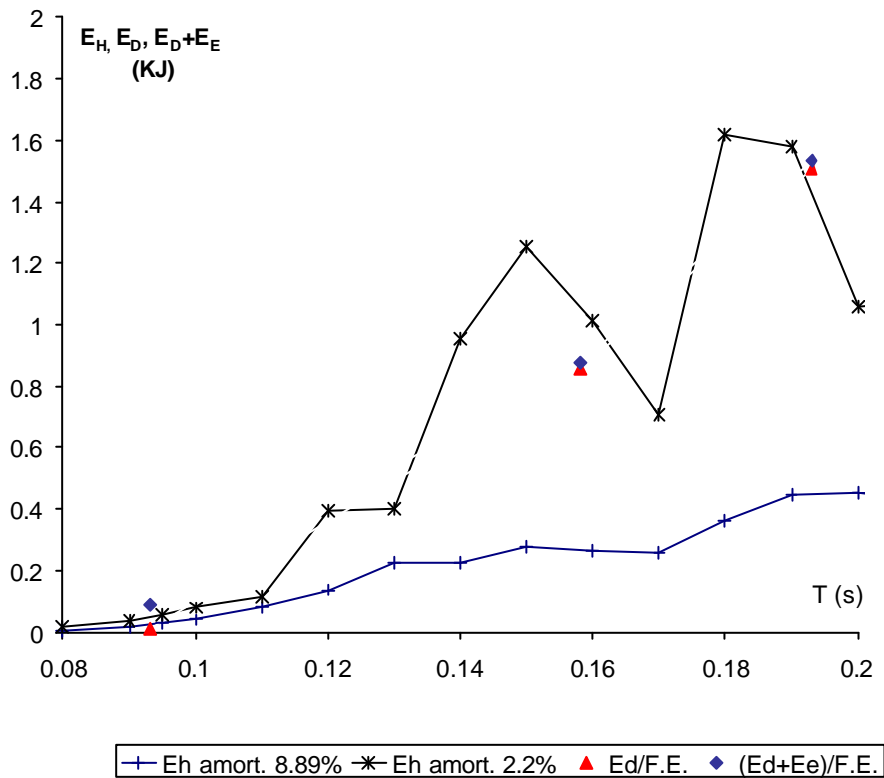


Figura 5.191 Comparación entre el "input" energético propuesto por Housner (E_H) y el manifestado experimentalmente en la estructura ensayada

5.6.5 Evolución del esfuerzo normal en los disipadores

En los disipadores caracterizados en máquina de ensayos, con restricción del desplazamiento vertical, se han constatado esfuerzos verticales significativos debido a efectos no lineales geométricos. En este apartado se pretende analizar si los disipadores manifiestan el mismo comportamiento en una estructura real.

Por equilibrio estático de las fuerzas verticales (suponiendo despreciable toda fuerza inercial que no sea en dirección horizontal y en el plano de disipación) la sollicitación normal resultante en el disipador frontal resulta (figura 5.192):

$$N_d = N_{c1} + N_{c2} \quad [5.7]$$

donde N_{c1} y N_{c2} son los esfuerzos normales en ambos soportes. Cada uno de ellos se han determinado indirectamente empleando las lecturas de dos galgas opuestas y situadas simétricamente en la misma sección de cada soporte:

$$N_{c1} = \frac{e_{SC11} + e_{SC12}}{2} A.E \quad [5.8]$$

$$N_{c2} = \frac{e_{SC25} + e_{SC26}}{2} A.E \quad [5.9]$$

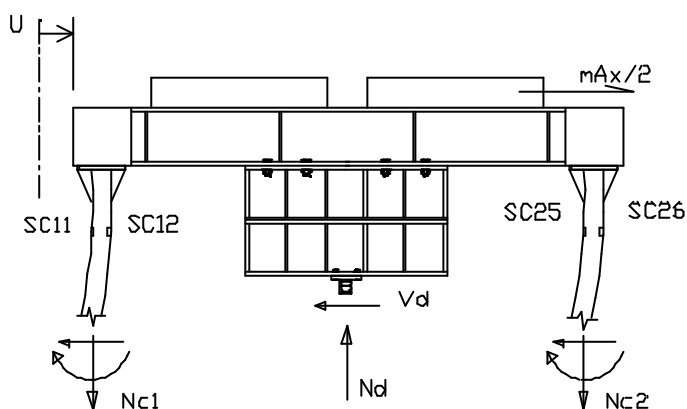


Figura 5.192 Representación de los esfuerzos de los pilares y del disipador (en su eje horizontal de simetría) correspondientes al pórtico frontal

El disipador ya se encuentra en compresión al inicio del último test (figura 5.193) debido a deformaciones permanentes provocadas en los anteriores tests. Comparando el registro del desplazamiento horizontal (figura 5.161) y el registro indirecto del esfuerzo normal en el disipador (figura 5.193), se observa como se produce un escalón permanente en el esfuerzo normal del disipador a partir del desplazamiento máximo horizontal.

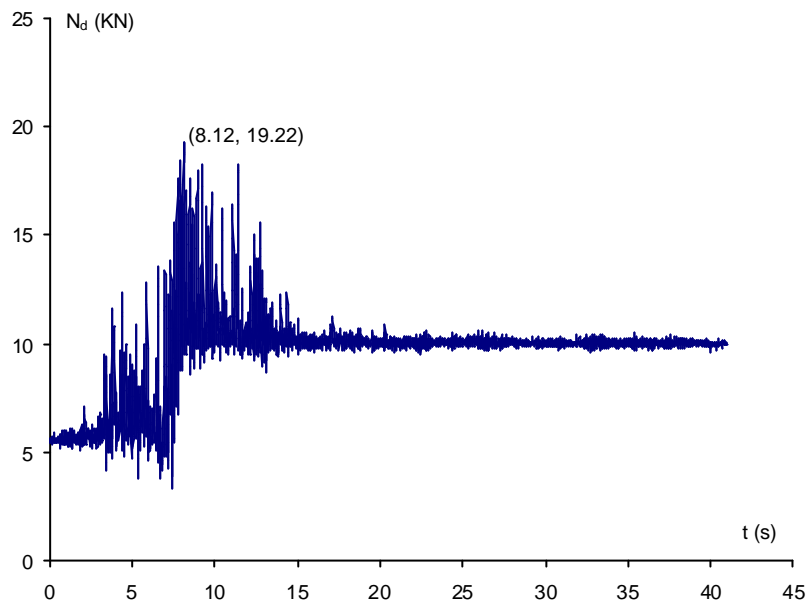


Figura 5.193 Evolución temporal del esfuerzo normal en el dissipador frontal durante el último test

El esfuerzo normal máximo, de 19.22 KN, que se corresponde con un desplazamiento del dissipador de 5.878 mm, se alcanza con deformaciones del material por encima del límite elástico. En la figura 5.194 se puede apreciar dos zonas de curvas en U centradas sobre el desplazamiento nulo, las cuales son una clara manifestación de los efectos geométricos no lineales sobre el esfuerzo normal y de un comportamiento prácticamente lineal del material. Con la respuesta no lineal del material el esfuerzo normal representado queda fuera de las zonas en U. El valor máximo del esfuerzo normal resulta muy inferior al que se contabilizaría bajo predominio de los efectos no lineales geométricos (hipótesis de alargamiento normal uniforme): si se supone, por ejemplo, una distribución de la tensión en las alas uniforme e igual de límite elástico garantizado de un acero A42 (260 MPa) se obtiene un esfuerzo resultante de 62.4 KN en las alas del dissipador. Sin embargo se alcanzan los 20 kN, valor similar a los obtenidos durante los ensayos de caracterización, con desplazamiento vertical restringido (véase apartado 3.4.3) y previa degradación del alma. El momento flector es, por tanto, el agente más activo en el proceso de plastificación de las alas, y su presencia disminuye los esfuerzos normales predecibles a partir de los efectos no lineales geométricos. Las representaciones de la semisuma y la semidiferencia de las deformaciones observadas por las galgas SDM15 y SDM11 en las figuras 5.195 y 5.196 confirman el predominio de las deformaciones normales debido a la flexión por encima de las deformaciones normales por efectos no lineales geométricos.

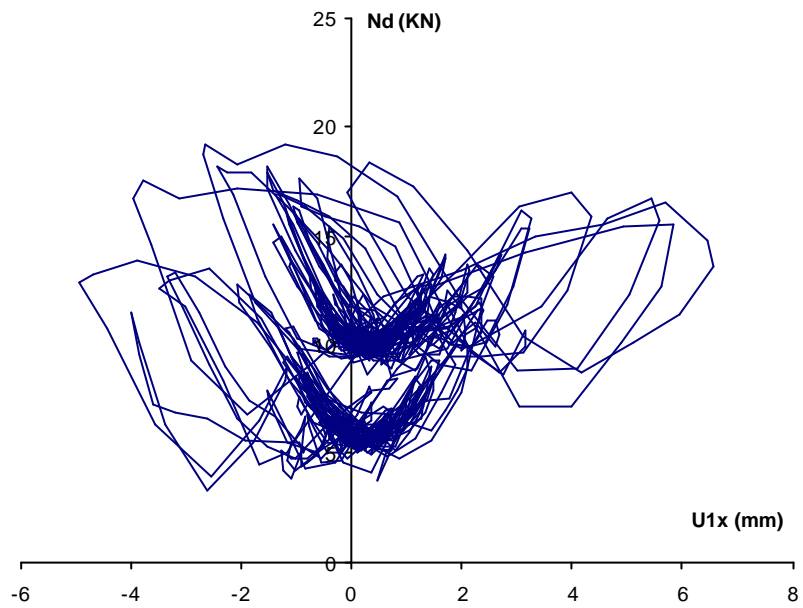


Figura 5.194 Relación entre el desplazamiento máximo de la estructura y el esfuerzo normal en el disipador frontal durante el último test

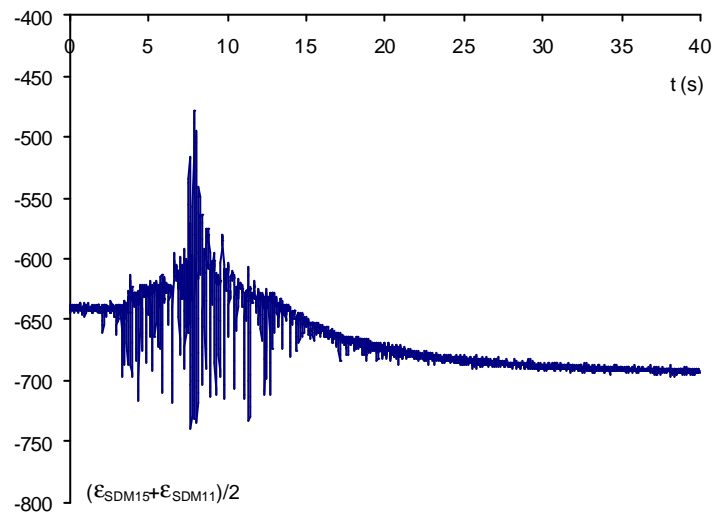


Figura 5.195 Semisuma de deformaciones medidas por galgas en alas opuestas, durante el último test

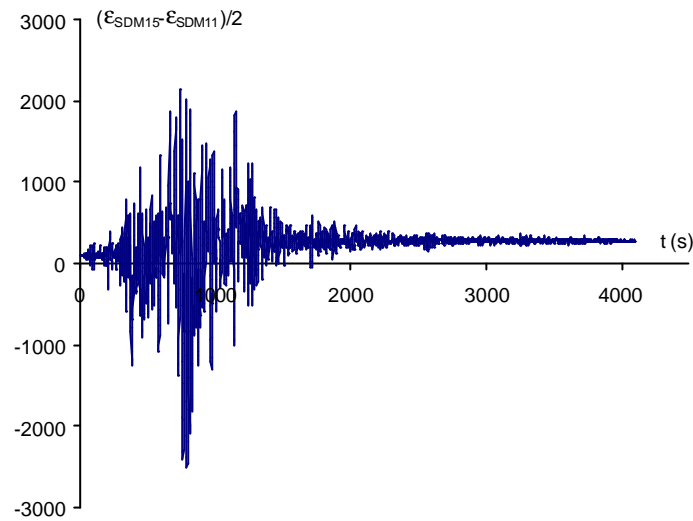


Figura 5.196 Semidiferencia de deformaciones medidas por galgas en alas opuestas, durante el último test

5.6.6 Análisis de la deformación en los disipadores

El inicio de la deformación plástica se produce antes en el centro del disipador que no en sus extremos. Las figuras 5.65 y 5.69 muestran el registro de deformaciones durante el segundo test para la zonas del alma central y extrema del disipador respectivamente. La deformación máxima en el centro del disipador es de un 3.8%, claramente en zona plástica tratándose de una acero A42, y 3.62 veces superior a la constatada por la galga SDB13. Analizando los registros correspondientes al último test (figuras 5.153 y 5.157), la deformación en los extremos se reduce a un 25 % de la deformación central.

En la figura 5.197 se ha representado la deformación observada por la galga SDT9 frente al cortante del disipador. La baja frecuencia de muestreo en relación a la alta velocidad de deformación (un $6.14\% \text{ s}^{-1}$, previo inicio de la deformación plástica en la zona central del disipador) permite pocos puntos correspondientes al inicio de la plastificación del acero, y resulta poco precisa la determinación de sus coordenadas (fuerza y desplazamiento). Se han estimado a través de la intersección entre las rectas correspondientes al comportamiento elástico y plástico, con valores indicados en la propia figura. La tensión cortante del material en zona elástica se puede calcular a partir de la expresión:

$$t = G.g \quad [5.10]$$

Dado que el material esta solicitado a cortante puro, la deformación angular γ resulta igual al doble de la deformación lineal observada por la galga SDT9. Considerando un módulo elástico transversal para el acero de $8 \cdot 10^4 \text{ MPa}$, la tensión cortante, calculada a partir de [5.20] resulta de 268 MPa. Bajo la consideración de

Von Mises [4.4], el material dispondría de un límite elástico a tracción simple de 464 MPa (un 78% superior al límite elástico garantizado).

El esfuerzo cortante de inicio de plastificación observado experimentalmente resulta de 25.56 KN. A partir de este valor y de la expresión [4.3], se puede calcular una tensión cortante de inicio de plastificación $\tau_y = 259$ MPa, con una diferencia del 3.3% respecto al valor observado a partir de la deformación unitaria de la galga.

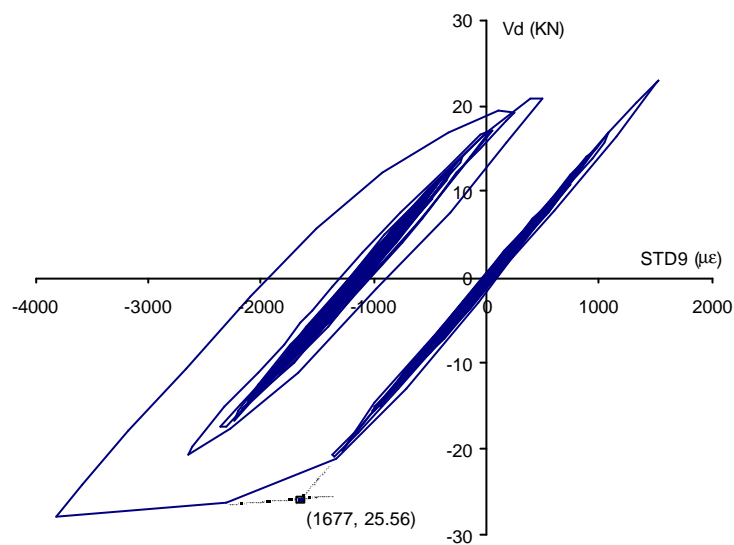


Figura 5.197 Evolución de la deformación observada por la galga central en función del cortante del disipador, durante el transcurso del segundo test