

Capítulo 3

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL DISIPADOR

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analiza el comportamiento experimental de un nuevo disipador de energía basado en la deformación del acero por esfuerzo cortante. Se describen los ensayos realizados para determinar sus características mecánicas y los resultados obtenidos.

El capítulo se estructura en 5 apartados. En el segundo (apartado 3.2) se describen propiamente los ensayos: los elementos objeto de ensayo, los equipos e instrumentación empleada y el procedimiento seguido en ellos.

En el apartado 3.3 se hace referencia a las condiciones iniciales, previo inicio de los ensayos, y a las mediciones obtenidas en cada uno de ellos.

En los restantes apartados se procesa la información experimental obtenida. En el apartado 3.4 a un nivel global, cuantificándose los parámetros que caracterizan el comportamiento de los especímenes ensayados (rigidez, fuerza de inicio de plastificación, energía disipada bajo comportamiento histerético etc.) En el apartado 3.5 se analiza de forma local, a partir de las mediciones efectuadas a través de galgas extensométricas, la distribución de la deformación en los disipadores.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA Y DEL PROCESO DE ENSAYO

3.2.1. Descripción de los disipadores

El disipador desarrollado dispone de una sección en doble T rigidizada (figuras 3.1 y 3.2). El cuerpo principal se ha construido a partir de perfil rectangular laminado en caliente, tronzado y posteriormente fresado. La fijación del disipador a los cabezales de la máquina de ensayos se ha materializado a través de uniones atornilladas a través de dos pletinas soldadas al cuerpo principal del disipador.

La función de disipación de energía se desempeña mediante deformación plástica por esfuerzo cortante del alma de la sección en doble T. La deformación se produce a partir del desplazamiento paralelo entre ambas pletinas de anclaje cuando

éste se produce en el plano del disipador. Durante la deformación no debe abollar el alma, hecho que comporta la disminución de la capacidad disipativa (Kasai y Popov, 1986; Rai y Wallace, 1998).

Se han construido y ensayado dos modelos geoméricamente distintos. El primero de ellos, designado como modelo 'A', dispone de una configuración fuertemente rigidizada, tal como indica la figura 3.1. Ha sido dimensionado para soportar ensayos histeréticos sin inestabilización del alma, con el fin de analizar la capacidad disipativa del modelo. El segundo de los modelos (figura 3.2), designado como 'B', ha sido dimensionado, construido y ensayado para validar modelos predictivos en relación a la abolladura.

Del disipador 'A' se construyeron cuatro variantes. Los valores correspondientes a sus dimensiones particulares se recogen en la tabla 3.1. Los cuatro dispositivos se diferencian entre sí por la presencia o ausencia de radio entre las zonas con cambio de espesor, por el espesor del alma o por el espesor de los rigidizadores.

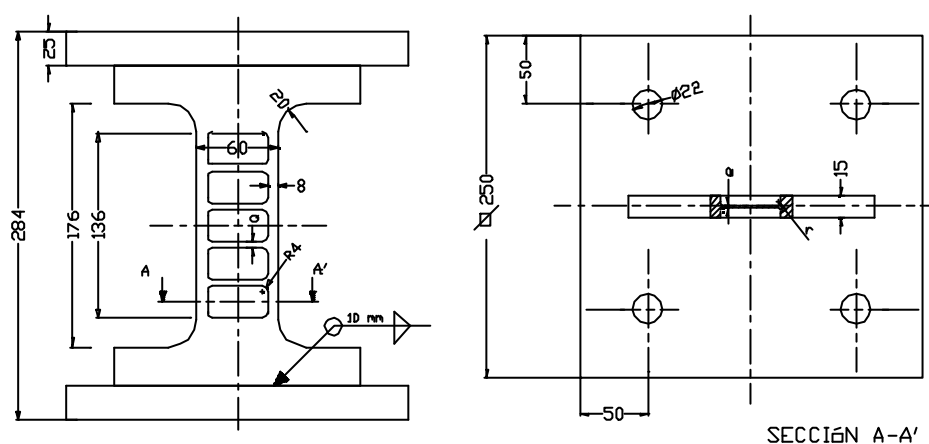


Figura 3.1. Geometría y dimensiones en el disipador tipo 'A'

Tabla 3.1. Variantes dimensionales del disipador 'A'

Disipador	a (mm)	e (mm)	r (mm)
A1	5	2	0
A2	5	2	2
A3	5	1.5	2
A4	2.5	2	2

a: ancho del rigidizador

e: espesor del alma

r: valor del radio en las zonas de cambio de espesor (entre rigidizadores/alas y alma)

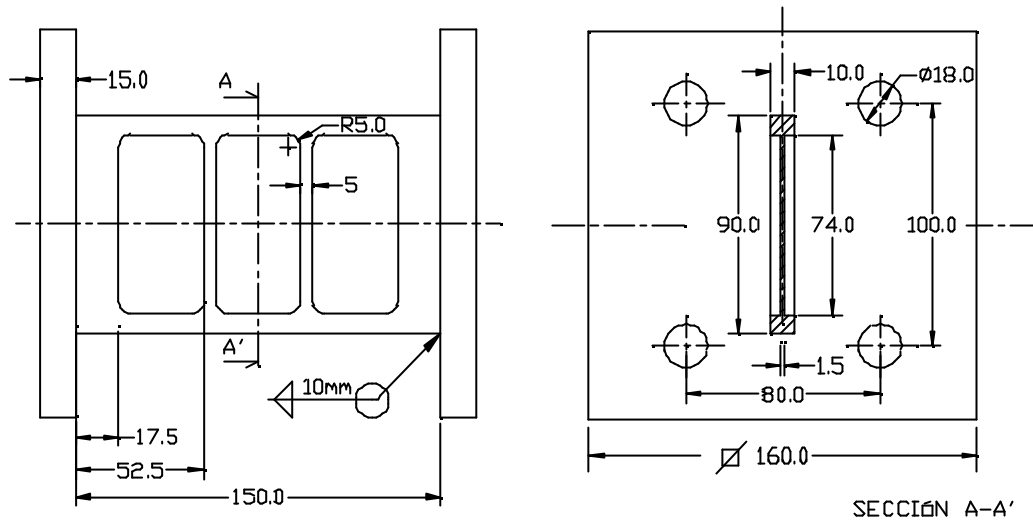


Figura 3.2. Geometría y dimensiones en el disipador tipo 'B'

3.2.2. Material

Previa descripción de las propiedades del material, se recuerda el significado de los valores convencionales y reales (o naturales), aplicable a los resultados obtenidos a partir del ensayo a tracción. En la curva tensión – deformación convencional, sus variables se definen como:

$$s = \frac{P}{A_0} \quad [3.1]$$

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [3.2]$$

Donde σ = tensión convencional, P = carga axial aplicada, A_0 = sección transversal inicial, ϵ = deformación unitaria convencional, l = distancia entre puntos de referencia del extensómetro con la probeta bajo carga P y l_0 = distancia inicial entre puntos de referencia del extensómetro.

Los valores reales para la tensión y la deformación unitaria pueden ser determinados a partir de las siguientes expresiones:

$$s_r = \frac{P}{A} \quad [3.3]$$

$$e_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln(1 + e) \quad [3.4]$$

donde A es la sección real de la probeta en estado de carga.

Para el cálculo de la tensión real a partir de su valor convencional (siempre antes de producirse estricción en la probeta) se puede suponer que la probeta no manifiesta cambio de volumen durante la fase de deformación plástica, es decir:

$$A l = A_0 l_0 \quad [3.5]$$

A partir de las expresiones 3.1, 3.2, y 3.5 se obtiene (Nadai, 1950):

$$s_r = \frac{P}{A_0(1-e)} = \frac{s}{(1-e)} \quad [3.6]$$

En la tabla 3.2 se pueden observar las características mecánicas de los aceros empleados para la construcción de los disipadores, obtenidas mediante ensayo a tracción simple según norma EN 10002. El alargamiento correspondiente al valor máximo de la tensión convencional se ha estimado, tras rotura, midiendo la distancia entre marcas sobre la probeta (equidistantes a 5 mm, previo inicio del ensayo) en zona sin estricción, desestimando la recuperación de la deformación elástica. Durante el ensayo del material empleado en los disipadores tipo 'A' se utilizó un extensómetro mecánico apto para pequeño rango de deformaciones, lo cual limitó el registro de la curva tensión - deformación al rango elástico y de deformación plástica en fluencia. El material empleado para el segundo modelo (disipador B) se caracterizó instrumentando la probeta con una galga extensométrica especial para grandes deformaciones, según se observa en la figura 3.3. En la figura 3.4. se representa la evolución de la tensión convencional (o ingenieril) y la tensión real en relación con la deformación unitaria convencional y real, respectivamente.

Tabla 3.2. Características mecánicas de los aceros empleados (valores convencionales)

Especímenes	Acero ⁽¹⁾	E (MPa)	σ_f (MPa)	ϵ_{ff} (%)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
A1, A2, A3, A4	A37b	$2.06 \cdot 10^5$	339.1	1.7	512.0	24
B1	A42b	$2.06 \cdot 10^5$	263	2.25	423	24.3

⁽¹⁾ Denominación del tipo de acero atendiendo a la norma NBE - EA 95

E: módulo de Young,

σ_f : tensión de fluencia

ϵ_{ff} : Alargamiento porcentual al final del escalón de fluencia

σ_u : tensión obtenida para la carga máxima

ϵ_u : Alargamiento convencional correspondiente a la carga máxima

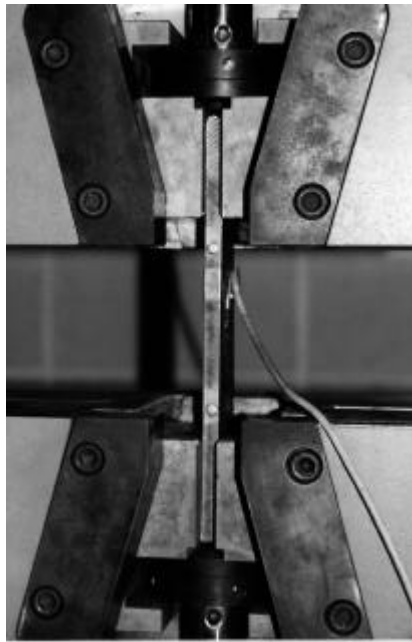


Figura 3.3. Ensayo de caracterización del material

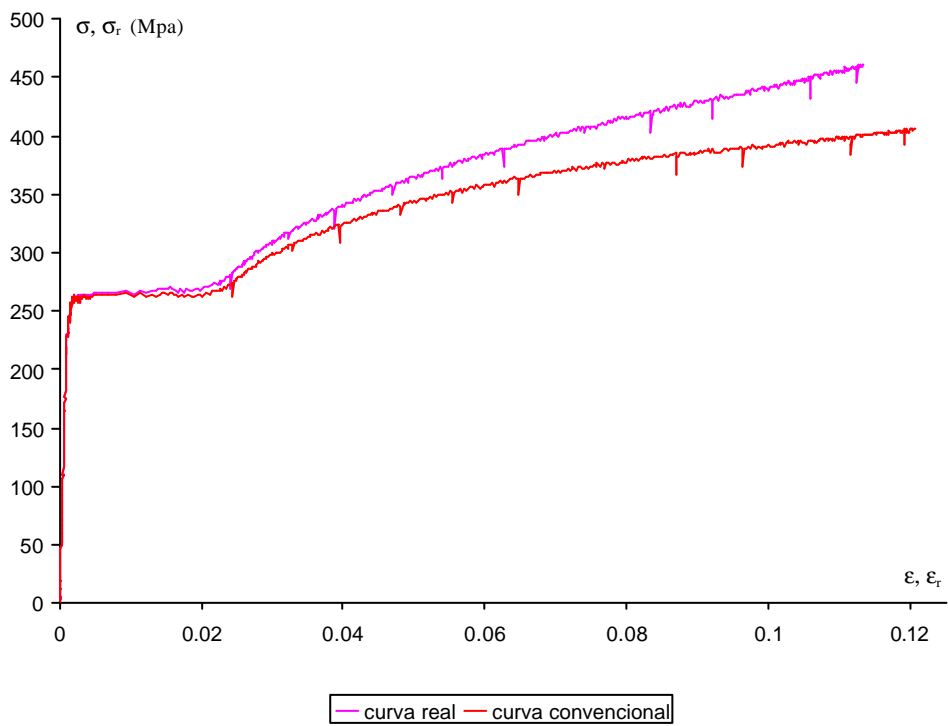


Figura 3.4 Curva tensión - deformación (convencional y real) del acero empleado en la construcción del disipador tipo B.

3.2.3. Equipos y procedimiento de ensayo

Los procedimientos y equipos utilizados en los ensayos de ambos modelos de disipador fueron distintos. El disipador tipo 'A' se construyó y ensayó, en todas sus variantes, en los laboratorios de ISMES spa (Bérgamo, Italia). El disipador tipo 'B' se ensayó en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Girona.

Equipos y procedimiento de ensayo utilizados en las variantes de disipador 'A'

Todos los ensayos de caracterización de las variantes del disipador tipo 'A' se realizaron en la máquina de ensayos SISTEM (figura 3.5). El equipo consta de una bancada que soporta: i) un cabezal con movimiento horizontal servocontrolado, accionado por dos pistones de 240 KN cada uno, equipados con sus correspondientes células de carga; ii) un cabezal desplazable verticalmente bajo la acción de un pistón hidráulico, iii) un sistema de alimentación y control de los actuadores en bucle cerrado. Se trata de un sistema apto para caracterizar disipadores de energía y aisladores de base. Los dispositivos a ensayar se acoplan, mediante uniones atornilladas, a ambas bancadas. Se solicitan en modo cuasiestático, bajo control de fuerza o desplazamiento, ante ciclos histeréticos o bajo régimen monotónico.

Los disipadores, según se observa en la figura 3.6, se fijaron a los cabezales móviles de la máquina con tornillos de alta resistencia, aplicando una precarga del 80% de su límite elástico para evitar el deslizamiento entre pletinas y cabezales. Debido a la propia constitución de la máquina, las bancadas de los cabezales se mantienen siempre paralelas. Durante los ensayos se mantuvo los planos de los cabezales equidistantes. Se programó un desplazamiento alterno en diente de sierra, con velocidad constante (0.36 mm/s) e incrementos de la amplitud de la función de 1 mm por ciclo. En el último de los dispositivos ensayados (especimen 'A3'), para determinar de forma precisa el desplazamiento y la carga de inicio de plastificación, se redujo la velocidad y se aumentó la amplitud en desplazamiento del primer ciclo hasta valores totales de 0.05 mm/s y 2 mm respectivamente (figura 3.7).

Equipos y procedimiento de ensayo utilizados en el disipador tipo 'B'

Para los ensayos del disipador tipo 'B' se utilizó la máquina universal SERVOSIS MUE-60 (figura 3.8), con módulo electrónico de control y medida MIC 2000. Su capacidad en carga axial es de 600 KN.

La prensa hidráulica está preparada para ejercer acciones axiales. Para la caracterización del disipador fue necesario el desarrollo de utillaje especial, el cual se puede observar en la figura 3.9. Se aprecia que los elementos de fijación construidos sitúan la sección transversal del disipador con momento flector nulo (en caso de carga) centrada con respecto al eje vertical de la prensa. Los disipadores se fijaron a los utillajes de los puentes fijo y móvil con tornillos TR 16 8.8, aplicando una precarga estimada del 80 % del límite elástico usando una llave dinamométrica.

3.7 Capítulo 3

La sollicitación del disipador se efectuó aplicando una rampa de desplazamiento con velocidad de 0.165 mm/min. bajo comportamiento elástico, y de 2 mm/min. en zona de comportamiento plástico (figura 3.10).

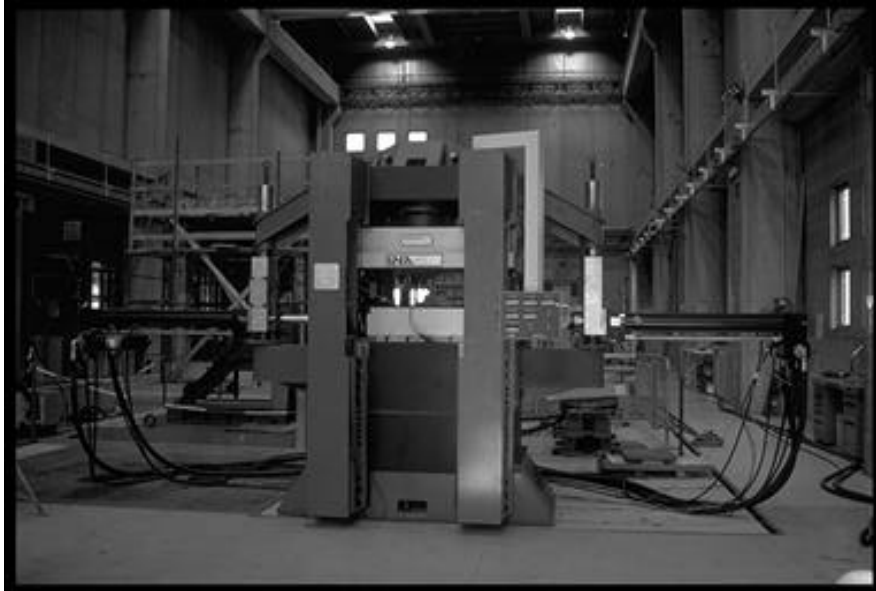


Figura 3.5 Máquina utilizada para la caracterización de los disipadores tipo 'A'.

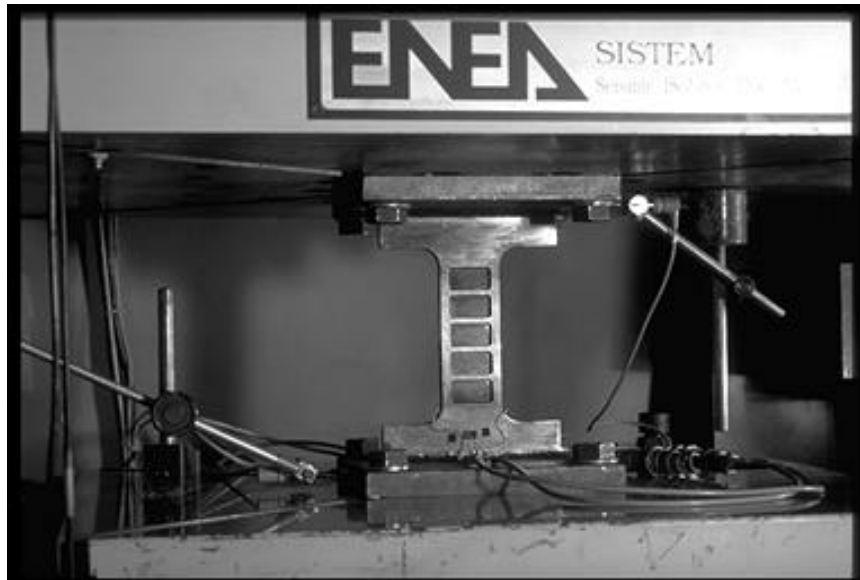


Figura 3.6 Detalle de la conexión del disipador a los cabezales de la máquina.

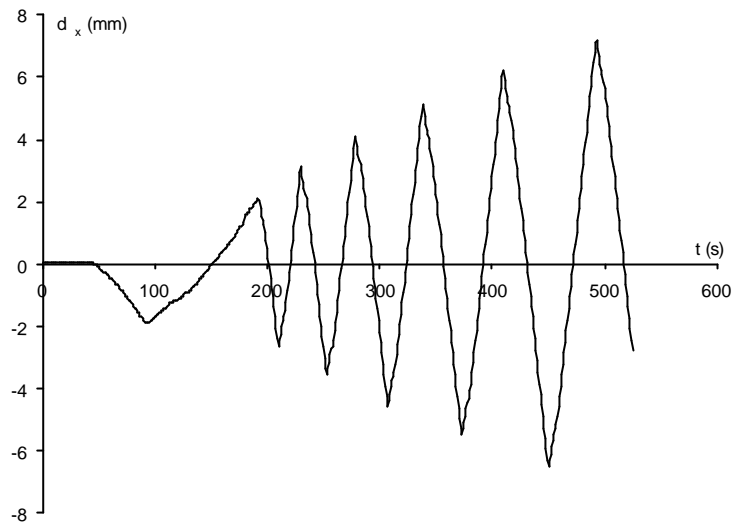


Figura 3.7 Evolución temporal del desplazamiento horizontal en el disipador 'A3'.



Figura 3.8 Máquina utilizada para la caracterización del disipador tipo 'B'

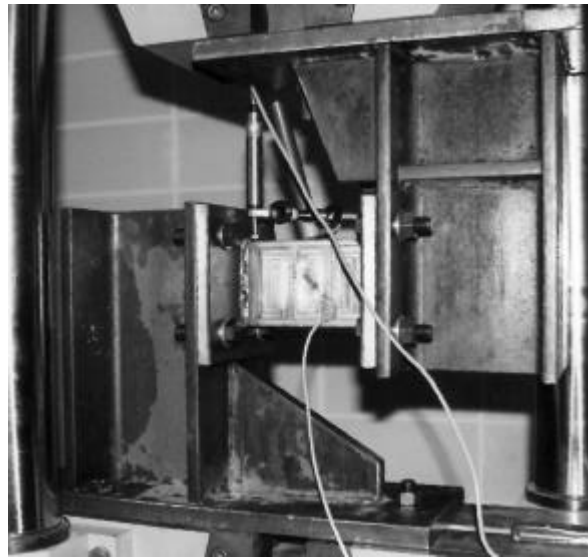


Figura 3.9 Detalle de la conexión del disipador a los cabezales de la máquina.

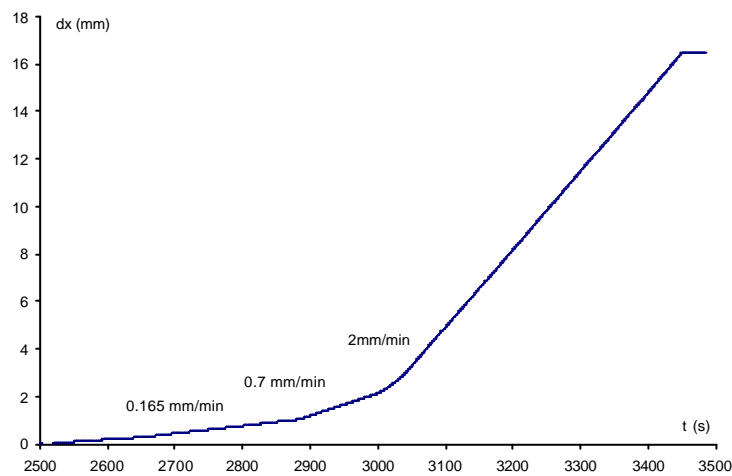


Figura 3.10 Evolución temporal del desplazamiento horizontal en el disipador 'B1'.

3.2.4. Instrumentación

Instrumentación empleada en los disipadores tipo 'A'

En la figura 3.11 se representa de forma esquemática la situación de los transductores con que se instrumentaron los ensayos (a excepción de las galgas extensométricas situadas en los propios disipadores).

La fuerza horizontal aplicada a los dispositivos se midió a partir de dos células de carga, situadas en sendos actuadores horizontales. El desplazamiento del cabezal inferior se mantuvo servocontrolado a partir de las mediciones del transductor de desplazamientos de la máquina de ensayos y mediante su módulo electrónico de medida y control. La deformación del dissipador se midió a partir del desplazamiento entre cabezales, captado mediante un transductor de desplazamiento de rango de desplazamiento acorde al aplicado a los dissipadores. Para la detección de un posible desplazamiento entre las pletinas de unión y los cabezales inferior y superior se introdujeron dos transductores de desplazamiento inductivos de bajo rango de desplazamiento (figura 3.11, elemento 10), acoplados a los cabezales con soporte magnético. El objetivo de control dirigido al desplazamiento vertical consistía en mantenerlo estable, y su evolución se registró a partir del transductor de desplazamiento vertical. La componente vertical de la fuerza sobre el dissipador permitía ser obtenido de forma indirecta a partir de la presión en el actuador.

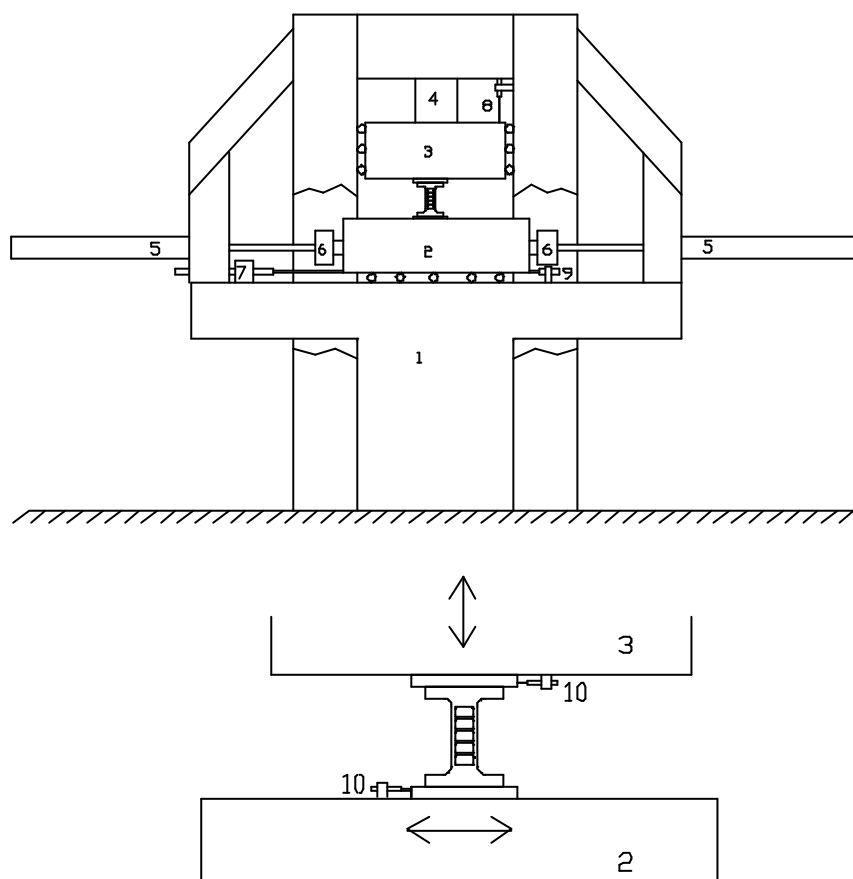


Figura 3.11 Esquema de la máquina de ensayos y instrumentación: 1: bancada, 2: cabezal móvil inferior, 3: cabezal móvil superior, 4: pistón hidráulico del cabezal superior, 5: pistón hidráulico del cabezal inferior, 6: célula de carga, 7: transductor para control y medida del desplazamiento del cabezal inferior; 8: transductor para control y medida del desplazamiento del cabezal superior, 9: transductor para medición del desplazamiento del cabezal inferior, 10: transductor de desplazamiento para la medición de posibles deslizamientos entre el dissipador y cabezales.

Los distintos disipadores se instrumentaron mediante galgas extensométricas autocompensadas. La configuración del puente de Wheatstone escogida fue en $\frac{1}{4}$ de puente a dos hilos, completado 'in situ' con tres resistencias de alta estabilidad. Las galgas extensométricas se orientaron a 45° , en la zona del alma del disipador, y en las alas de forma longitudinal. Los cuatro disipadores se instrumentaron de forma distinta, tal como se describe a continuación.

El espécimen A1 (figura 3.12) se instrumentó con cinco galgas en la zona del alma, otra en la pletina inferior, paralela y centrada respecto a la unión con el cuerpo del disipador y a 15 mm de ésta, y finalmente dos más en las alas en las fibras que se estimaron a priori como las más solicitadas. El espécimen A2 (figura 3.13), se instrumentó con dos galgas en las alas en su zona de momento flector nulo, orientadas longitudinalmente con respecto a éstas. El disipador A3 (figura 3.14), se instrumentó con 6 galgas en la zona del alma, distribuidas en su zona central y periferia a partes iguales y en caras opuestas. El disipador A4 se instrumentó con 2 galgas en la zona central del alma, con la misma dirección y situación pero en caras opuestas.

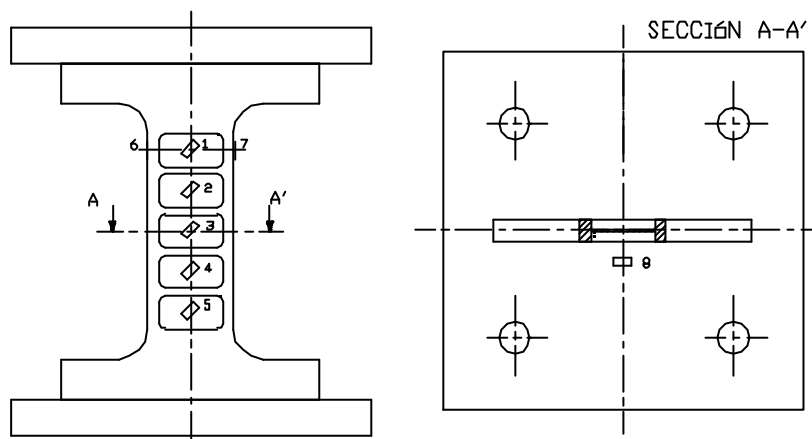


Figura 3.12 Instrumentación del disipador 'A1'

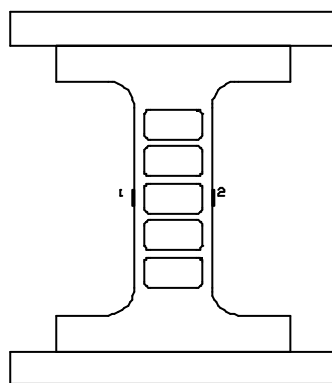


Figura 3.13 Instrumentación del disipador 'A2'

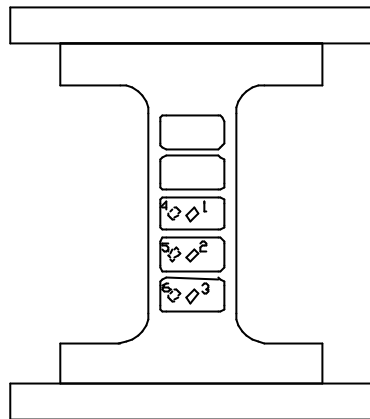


Figura 3.14 Instrumentación del disipador 'A3'

Instrumentación empleada en el disipador tipo 'B'

La evolución del esfuerzo cortante en el disipador se midió mediante la célula de carga de la prensa hidráulica. El desplazamiento relativo entre los extremos del disipador lo proporcionó un transductor de desplazamiento acoplado mediante soporte magnético a una de las pletinas de acoplamiento (figura 3.9). Se dispuso una galga extensométrica apta para grandes deformaciones en el alma del disipador, en la intersección de sus ejes de simetría, orientada a 45° respecto a los mismos. Las señales de los transductores se obtuvieron mediante un "datalogger" CAMPBELL CR10X, a una frecuencia de 5 segundos por canal (con lecturas prácticamente simultáneas en un mismo barrido) y fueron transferidas a un PC mediante protocolo RS232.

3.3. INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

3.3.1 Mediciones previas al proceso de carga

Incidencia del montaje de los disipadores en su estado de deformación

Efectuada la precarga de la unión inferior de los disipadores y con anterioridad a lo propio en la unión superior, se dispusieron a cero ("reset") la totalidad de los canales. Los valores medios y la desviación estándar de las medidas obtenidas a través de los distintos canales en cada dispositivo, tras montaje y previo inicio de la acción horizontal, se pueden observar en la tabla 3.3. En ésta se disponen los distintos canales por columnas de forma correlativa. El número de canales, como se ve en la tabla, no es una constante en los distintos ensayos. Las variables registradas se definen a continuación:

Tabla 3.3 Mediciones previo inicio del ensayo

Especimen A1

canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
variable	F _x	d _x	E1	E2	E3	dx	Fy	dy	E4	E5
(unidad)	(kN)	(mm)	(με)	(με)	(με)	(mm)	(mm)	(mm)	(με)	(με)
media	-0.43	0.05	435	1545	1667	-	34	0.47	561	384
Desv.est.	0.19	0.0074	29.4	25.1	26.8	-	4.6	0.02	27	28.4
canal	11	12	13	14	15					
variable	E6	E7	E8	s ₁	s ₂					
(unidad)	(με)	(με)	(με)	(mm)	(mm)					
media	527	360	25	0.00	0.01					
Desv.est.	40.4	38.3	2	2E-0	3E-04					

Especimen A2

canal	1	2	3	4	6	7	8	9
variable	F _x	S _x	E1	E2	Fy	dy	s ₁	s ₂
(unidad)	(kN)	(mm)	(με)	(με)	(kN)	(mm)	(mm)	(mm)
media	0.074	0.0432	130	104	10.47	1.1676	0.005	0.003
Desv.est.	0.085	0.0156	73	71	6.539	0.0282	3E-04	2E-04

Especimen A3

canal	1	2	3	4	5	7	8	9
variable	F _x	d _x	S ₁	S ₂	E1	Fy	dy	E2
(unidad)	(kN)	(mm)	(mm)	(mm)	(με)	(kN)	(mm)	(με)
media	-0.184	0.0466	-5E-04	-0.001	-62	7.161	-2.087	-124
Desv.est.	0.189	0.0146	1E-04	7E-05	19.5	1.13	0.012	20.4
canal	10	11	12	13				
variable	E3	E4	E5	E6				
(unidad)	(με)	(με)	(με)	(με)				
media	-127	-116	-136	-79.9				
Desv.est.	22.2	21.6	21.43	20.7				

Especimen A4

canal	1	2	3	4	5	7	8	9
variable	F _x	d _x	E1	E2	S ₁	Fy	dy	S ₂
(unidad)	(kN)	(mm)	(με)	(με)	(mm)	(kN)	(mm)	(mm)
media	-1.966	-0.348	-317	-329	-0.007	12.47	0.685	-0.003
Desv.est.	0.623	0.0242	25.46	25.24	0.0007	7.657	0.071	0.0004

Especimen B1

canal	1	2	3	4
variable	F _x	d _x	E1	d _x
(unidad)	(kN)	(mm)	(με)	(mm)
media	0.0466	-0.004	110	0.0062
Desv.est.	0.0145	0.006	0.0	0.0052

- F_x = Fuerza horizontal sobre el dispositivo ensayado
 d_x = Desplazamiento entre cabezales fijo y móvil con transductor de 50 mm de rango.
 E_n = Deformación medida por galga extensométrica. El sufijo 'n' corresponde al valor asignado a la galga en las figuras 3.12, 3.13 o 3.14 según corresponda al disipador A1, A2 o A3 respectivamente
 s_x = Desplazamiento entre cabezales fijo y móvil medido por el transductor de la máquina de ensayos.
 F_y = Reacción vertical del cabezal superior
 d_y = Desplazamiento vertical relativo entre cabezales
 s_1 = Desplazamiento relativo entre cabezal y pletina de unión inferiores
 s_2 = Desplazamiento relativo entre cabezal y pletina de unión superiores

Los valores de las deformaciones medidas por las galgas extensométricas son elevadas en el dispositivo A1, con un valor medio de las galgas situadas en el alma de $916 \mu\epsilon$, y un valor máximo en la galga central de $1667 \mu\epsilon$ (que representa un 101% de la deformación de límite elástico del material a tracción simple, y por tanto la plastificación del material). En el dispositivo A3, el valor medio de las galgas es de $-107 \mu\epsilon$, con un valor máximo de $-136 \mu\epsilon$, un 8.2% del valor de límite elástico del material a tracción simple. El dispositivo A4 ofrece un valor medio de deformación de $-323 \mu\epsilon$, y el dispositivo B de $110 \mu\epsilon$.

3.3.2 Mediciones efectuadas durante el proceso de carga

La adquisición de datos se realizó a una velocidad de 1 muestra/segundo/canal en los especímenes 'A'. Observando atentamente la evolución temporal de las mediciones (figuras 3.15a, 3.15b, 3.16, 3.17 y 3.18) y atendiendo a los valores medios y diferencias máximas constatadas en algunas de las variables (tabla 3.4) se pueden constatar unas determinadas características en el comportamiento de los disipadores:

1. La simetría impuesta en la evolución temporal del desplazamiento horizontal (d_x) entre extremos de disipador comporta una evolución simétrica de la fuerza horizontal (F_x) sobre el disipador, anterior y posteriormente al inicio de la degradación del alma.
2. La degradación del alma se ve acompañada de una disminución en la reacción horizontal del disipador (F_x).
3. La degradación del alma conlleva un aumento del valor de la reacción vertical.

4. El control de desplazamiento vertical en la máquina de ensayos no resulta efectivo hasta transcurrido un tiempo desde el inicio del ensayo. Transcurrido este periodo de estabilización, la fuerza vertical evoluciona simétricamente.

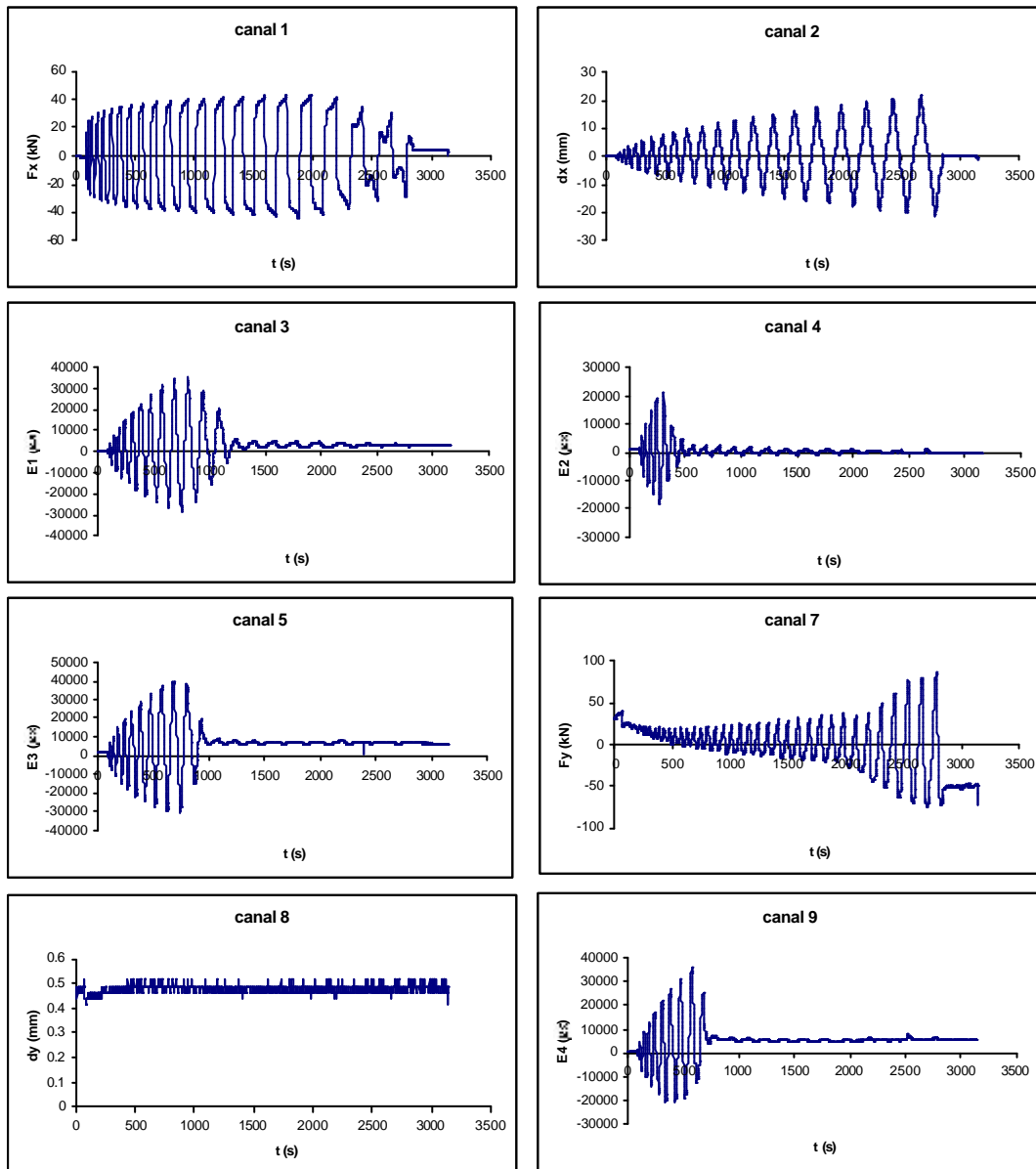


Figura 3.15a Evolución temporal de los parámetros registrados en el disipador A1

5. El comportamiento de las uniones ha sido correcto: se han constatado deslizamientos máximos en las uniones del 0.8 % con relación al desplazamiento máximo horizontal previo inicio del deterioro del disipador.

6. En las galgas 1 y 2 del espécimen 'A2' (figura 3.13) se empiezan a constatar deformaciones de carácter plástico cuando se inicia la degradación del alma. Por lo contrario, las galgas 6 y 7 del espécimen 'A1' (figura 3.12), detectan comportamiento plástico ya desde los primeros ciclos. Los resultados indican como las alas en sus zonas extremas sufren deformaciones muy elevadas previa degradación del alma, y que con el inicio de la degradación la deformación plástica se extiende a la totalidad de éstas.

7. Representando conjuntamente la evolución de la reacción vertical y el desplazamiento horizontal del disipador (figura 3.20) se puede ver como desplazamientos máximos (en valor absoluto) y las reacciones máximas (positivas) coinciden en el tiempo, consecuencia del alargamiento impuesto al disipador al impedir desplazarse verticalmente sus extremos.

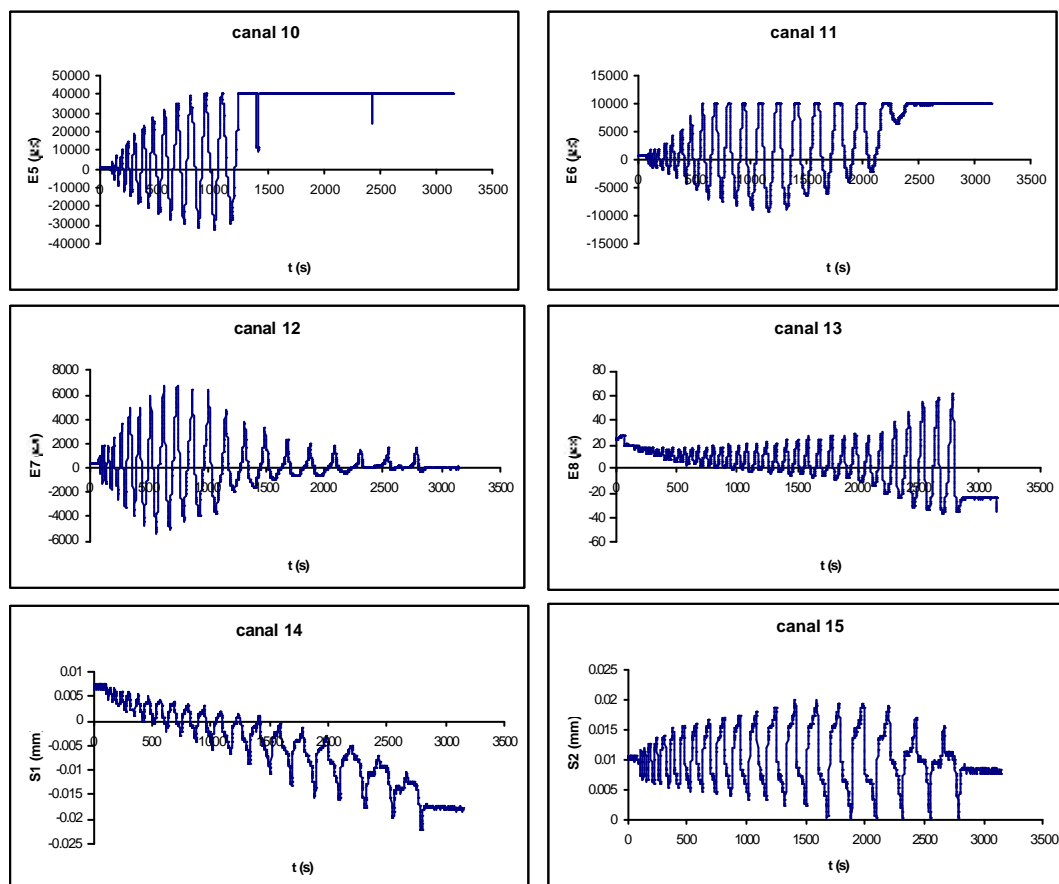


Figura 3.15b Evolución temporal de los parámetros registrados en el disipador A1

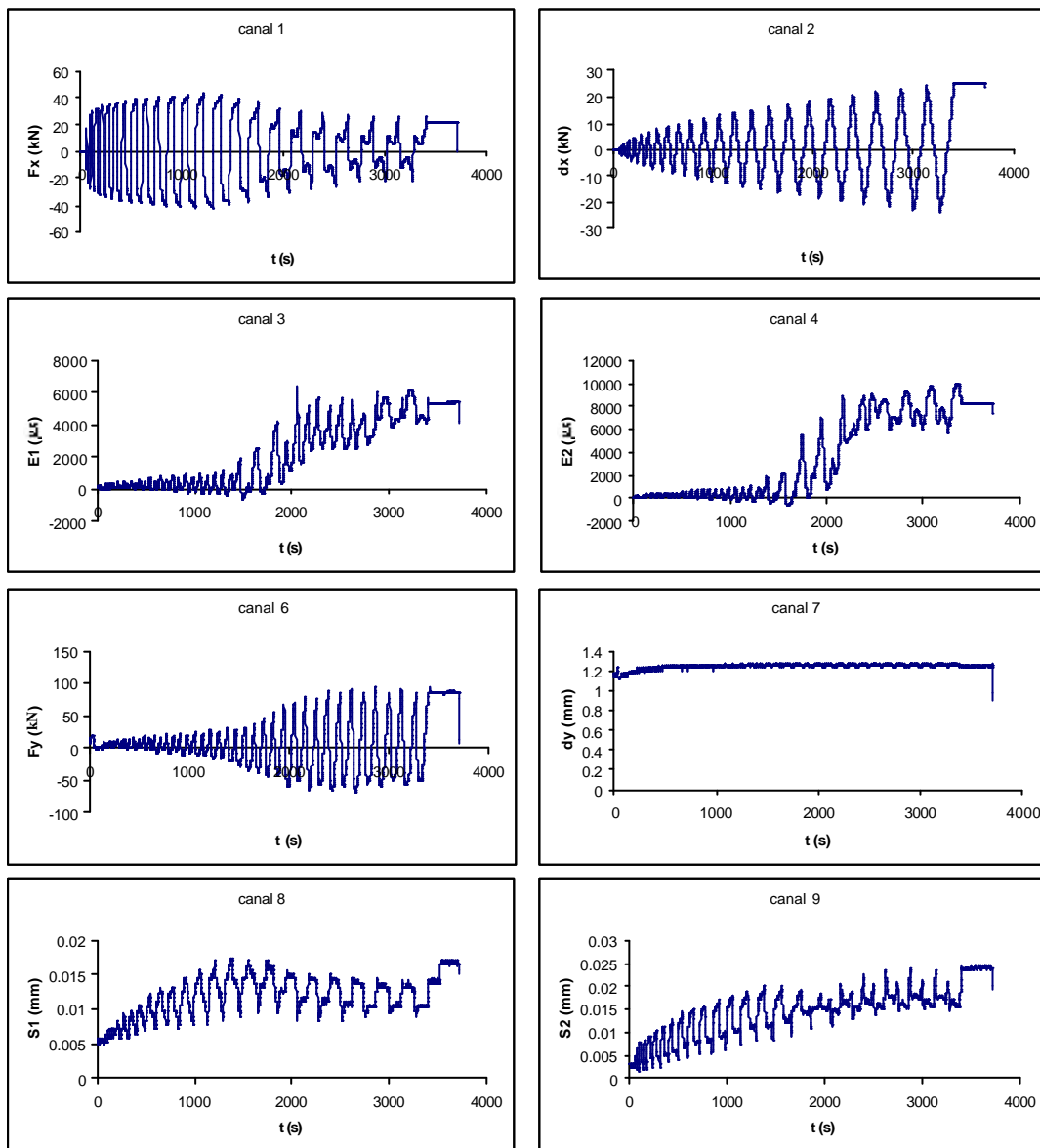


Figura 3.16 Evolución temporal de los parámetros registrados en el disipador A2

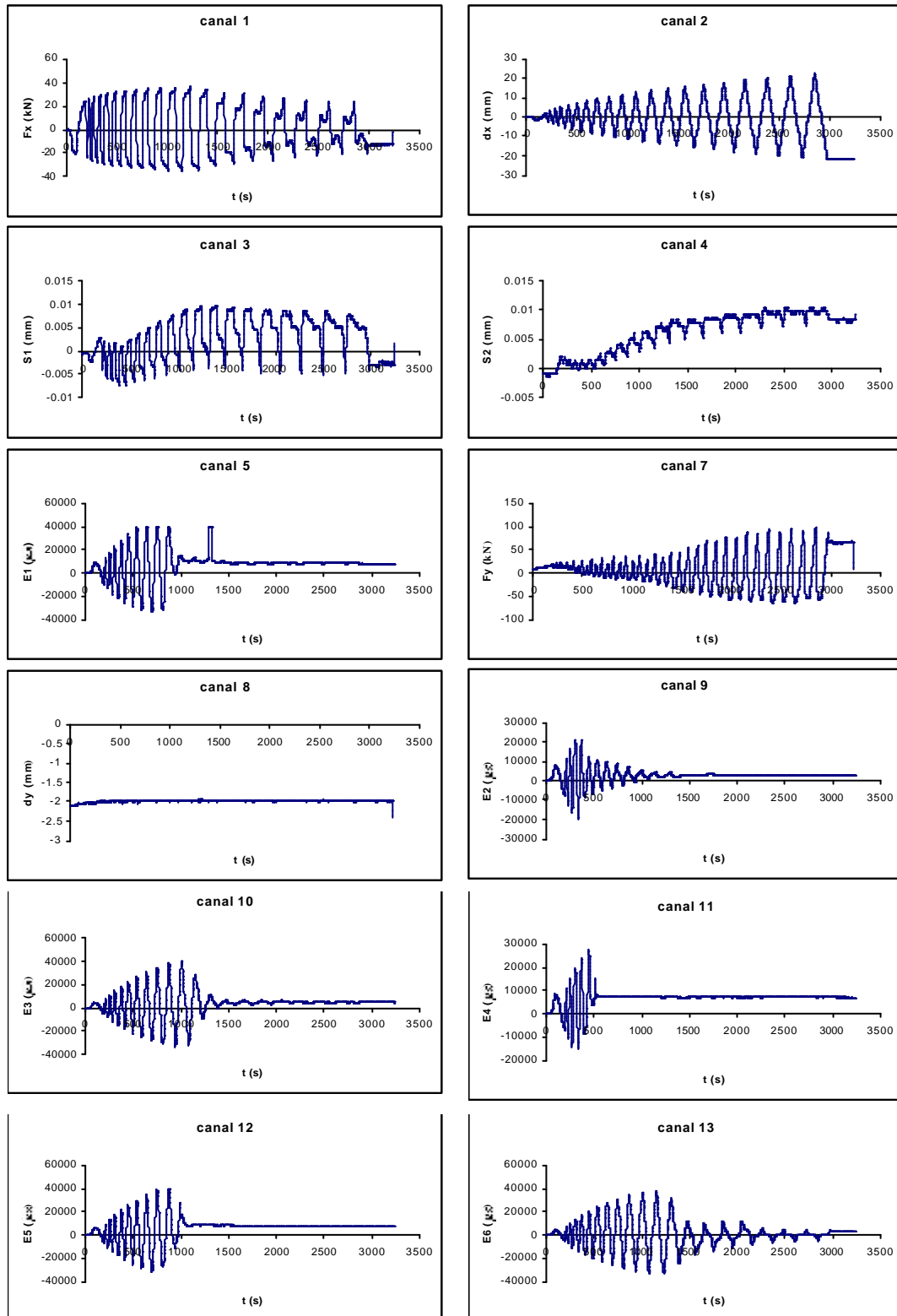


Figura 3.17 Evolución temporal de los parámetros registrados en el disipador A3

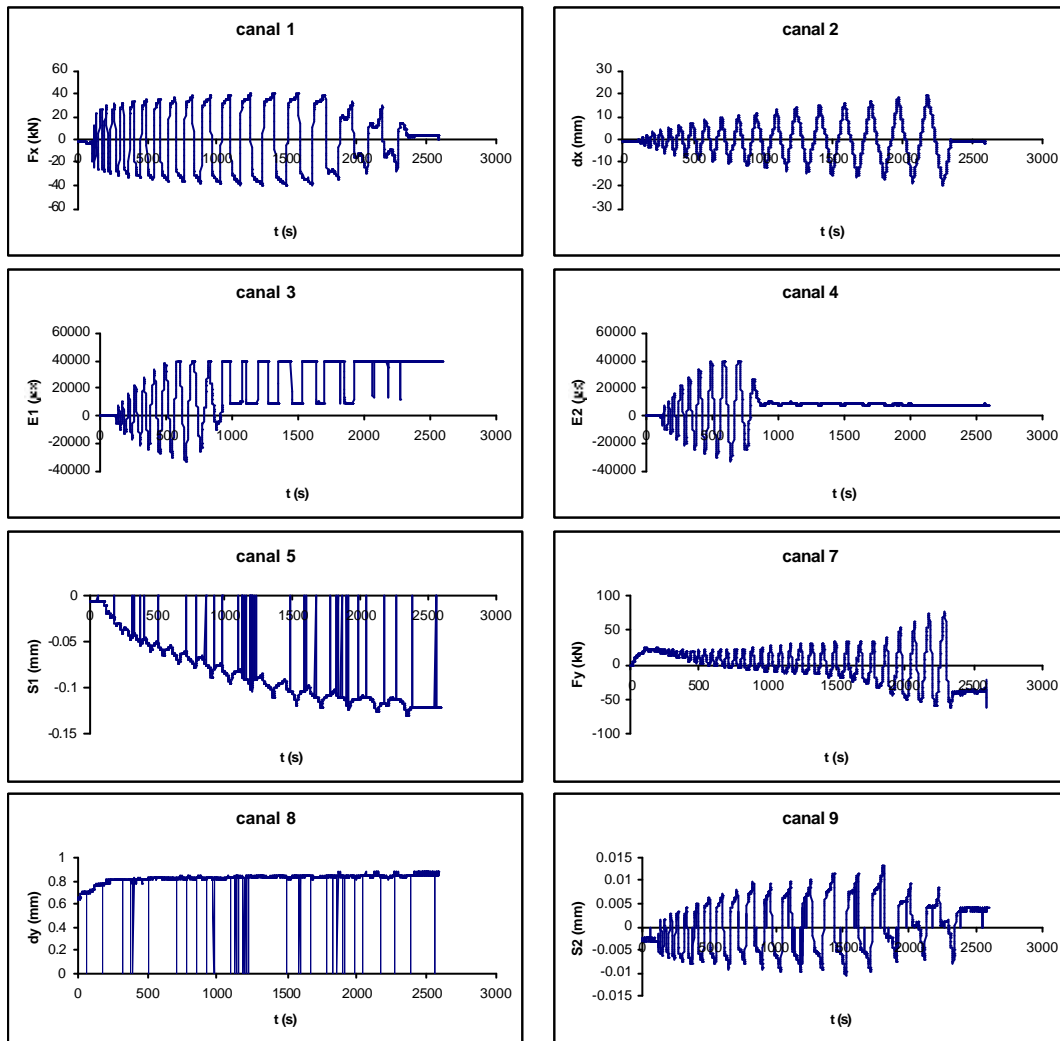


Figura 3.18 Evolución temporal de los parámetros registrados en el dissipador A4

Tabla 3.4 Valores medios y diferencias máximas de algunas de las variables medidas tras ensayo.

		F_x (kN)	d_x (mm)	F_y (kN)	d_y (mm)
A	μ	-0.143	0.4259	3.370	0.48
	max-min	86.91	39.502	125.68	0.0977
B	μ	-0.180	0.0964	0.049	1.237
	max-min	84.67	47.46	163.48	0.146
C	μ	0.076	0.359	0.505	-2.00
	max-min	71.77	43.65	162.89	0.146
D	μ	-0.327	-0.0399	4.1696	0.806
	max-min	80.57	38.086	134.18	0.879

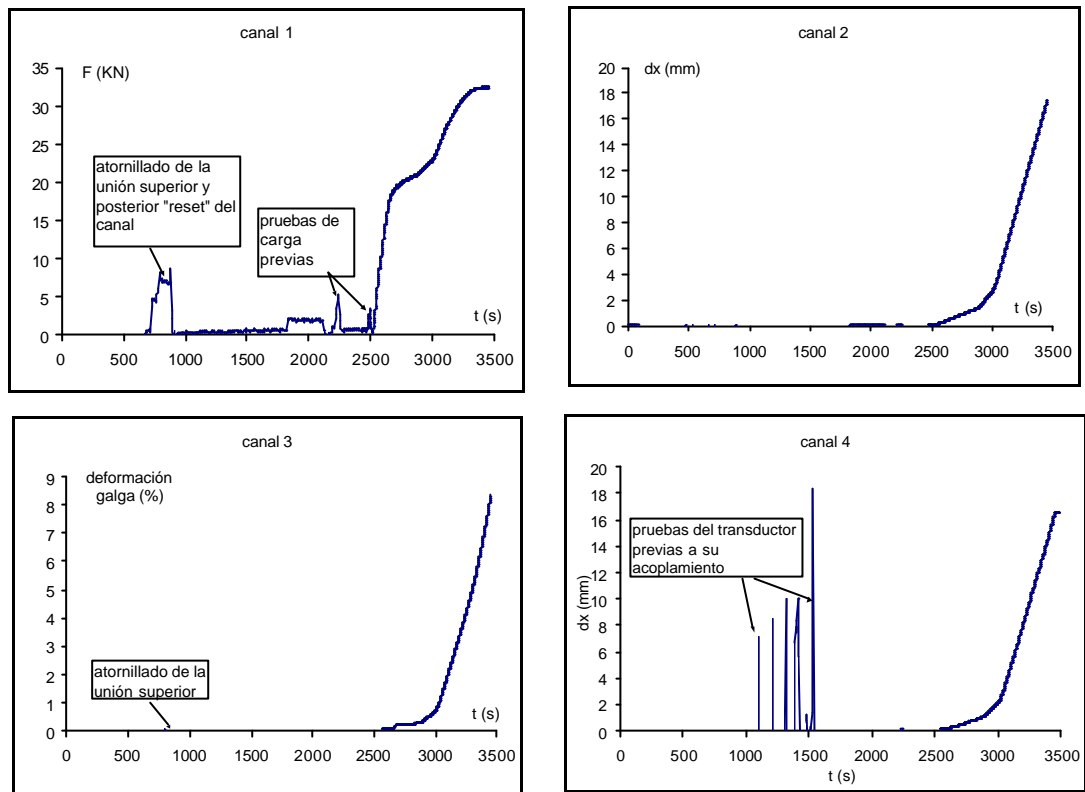


Figura 3.19 Evolución temporal de los parámetros registrados en el espécimen B1

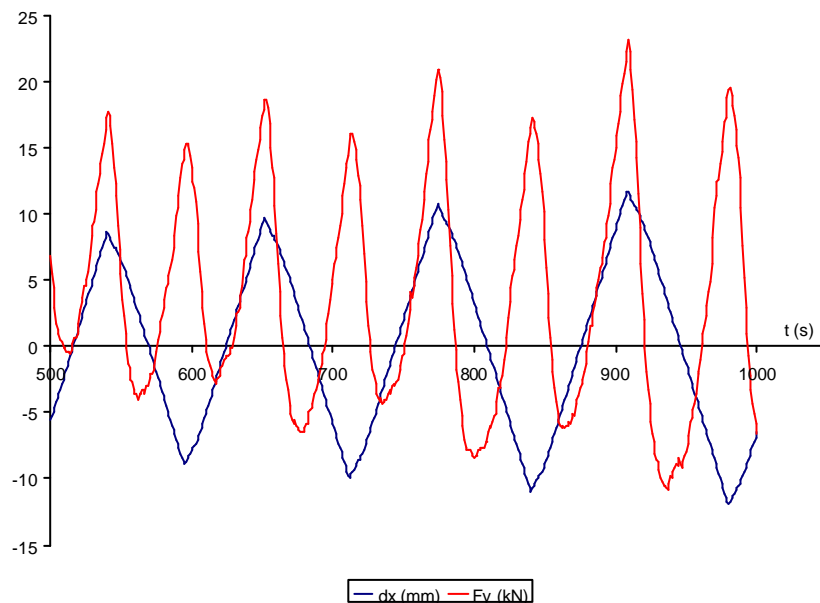


Figura 3.20 Evolución temporal del desplazamiento horizontal y la fuerza vertical en el disipador B

3.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL GLOBAL DEL DISIPADOR

3.4.1 Fuerza y desplazamiento correspondientes al inicio de la plastificación.

La determinación de la fuerza (y su correspondiente desplazamiento horizontal), con la que se inicia la deformación plástica del disipador, se establece a partir de la pérdida de linealidad en su relación fuerza - desplazamiento.

En los tres primeros especímenes ensayados (A1, A2 y A4) la configuración del test en su primer ciclo (baja frecuencia de muestreo acompañada de una amplitud en el desplazamiento insuficiente para que la plastificación se desarrollara de forma generalizada) resultó poco adecuada para la determinación exacta de los valores de inicio de plastificación.

En el disipador 'A3' se mejoró la configuración del ensayo en relación a los ensayos anteriores, con algunas reservas: i) la resolución del transductor de desplazamiento (0.05 mm) resultó poco generosa (su valor es del orden del 10% del valor del desplazamiento de inicio de plastificación) y ii) la situación del transductor de desplazamiento resulta inadecuada, puesto que precisa de una elevada rigidez de la bancada y de la ausencia de desplazamientos en las uniones atornilladas. Los resultados se deben analizar con prudencia de acuerdo con estas limitaciones.

En el ensayo del disipador 'B1', se aumentó la resolución del transductor a 0.005 mm. Además, se fijó el cuerpo del transductor a una de las placas de anclaje mediante soporte magnético, de forma que fuera posible medir desplazamientos relativos entre extremos del disipador (según se aprecia en la figura 3.9) sin influencia de la rigidez de la máquina de ensayos ni de los deslizamientos (pequeños pero posibles) en las uniones atornilladas.

Previo inicio del proceso de ensayo y tras pretensado de la fijación del dispositivo a la máquina de ensayos, las galgas pegadas al alma del dispositivo 'A3' ofrecían una deformación media de $-107\mu\epsilon$, lo cual representa un 6.5 % del valor correspondiente al límite elástico del material. En la misma situación, el dispositivo 'B1' presentaba en su única galga extensométrica una deformación de $110\mu\epsilon$, un 8.61 % de la deformación correspondiente al límite elástico del material. Cabe tener en cuenta que ambas deformaciones de montaje podrían influir ligeramente en la determinación de la fuerza y desplazamiento de inicio de plastificación.

En la figura 3.21 se puede apreciar la evolución de la fuerza con relación al desplazamiento en el dispositivo 'A3', en su etapa de deformación monótona creciente. En la figura 3.22 se observa la curva correspondiente al espécimen 'B1'. Se ha ajustado una recta de regresión a la zona lineal de ambas relaciones, de cuya pendiente se determina la rigidez de los dos disipadores, y la cual permite delimitar, de forma clara, el final de su comportamiento lineal y los valores de fuerza y desplazamiento precursores de la etapa plástica.

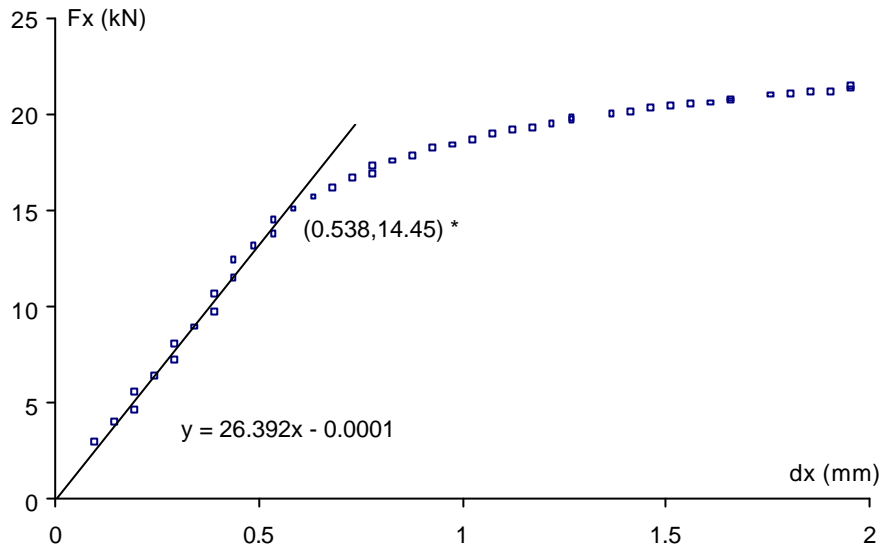


Figura 3.21 Relación fuerza – desplazamiento horizontal en el disipador 'A3'

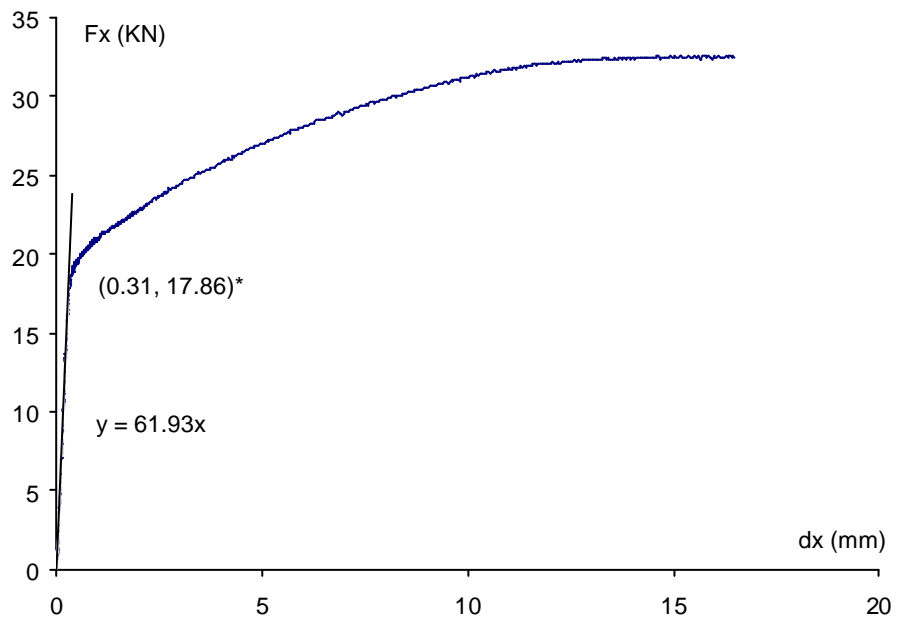


Figura 3.22 Relación fuerza – desplazamiento horizontal en el disipador 'B1'

3.4.2 Comportamiento histerético. Energía de deformación.

La figura 3.23 ilustra esquemáticamente la sollicitación bajo ensayo de los disipadores tipo 'A'. Se ha representado la acción horizontal sobre el disipador (F_x) en función de su desplazamiento (d_x), obteniendo así la respuesta histerética de cada dispositivo. Las curvas histeréticas para los cuatro dispositivos, según se observa en las figuras 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27, son muy similares, presentando un comportamiento estable previo inicio de la degradación del alma y sin presencia de abolladura. Se aprecia en los ciclos de gran amplitud que la reacción horizontal (F_x) para desplazamiento nulo es inferior al valor ante desplazamiento máximo de ciclo, acusando el efecto no lineal provocado por la coacción del desplazamiento vertical en ambos extremos del disipador.

En las figuras 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31 se representa la evolución temporal de la energía disipada en cada uno de los dispositivos. En ellas se indica los valores correspondientes a la fuerza horizontal máxima alcanzada (indicados con el superíndice ⁽¹⁾), y los que coinciden con su pérdida de capacidad disipativa (indicados con el superíndice ⁽²⁾). La diferencia en energía acumulada entre ambos valores puede variar significativamente, en función de la amplitud a la cual se produce el deterioro y la rapidez de su evolución.

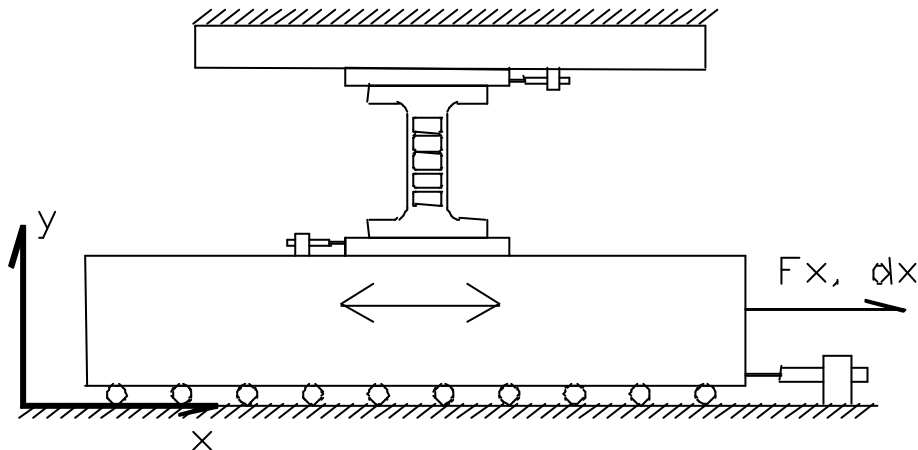


Figura 3.23 Esquema del proceso de caracterización de los disipadores

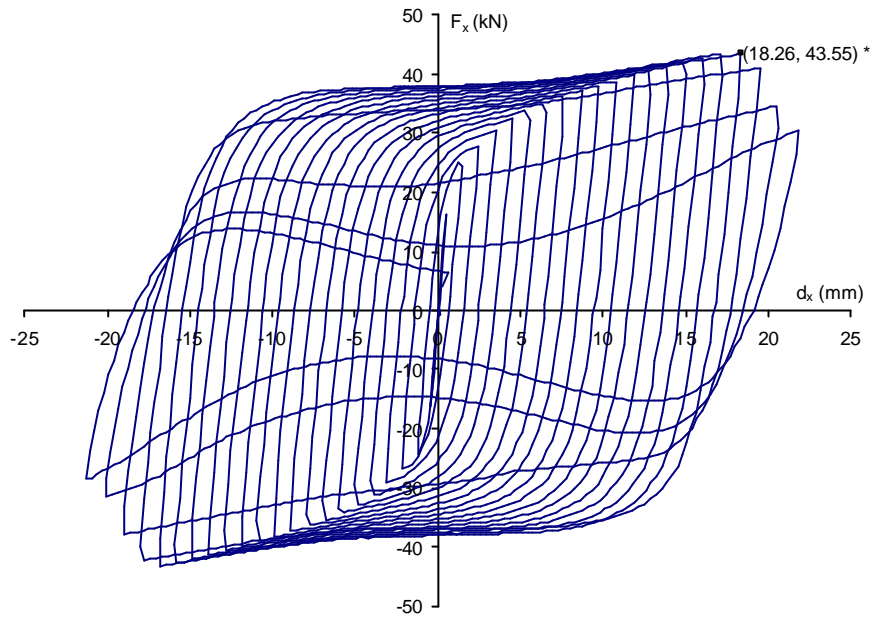


Figura 3.24 Curva histerética de respuesta del disipador 'A1'

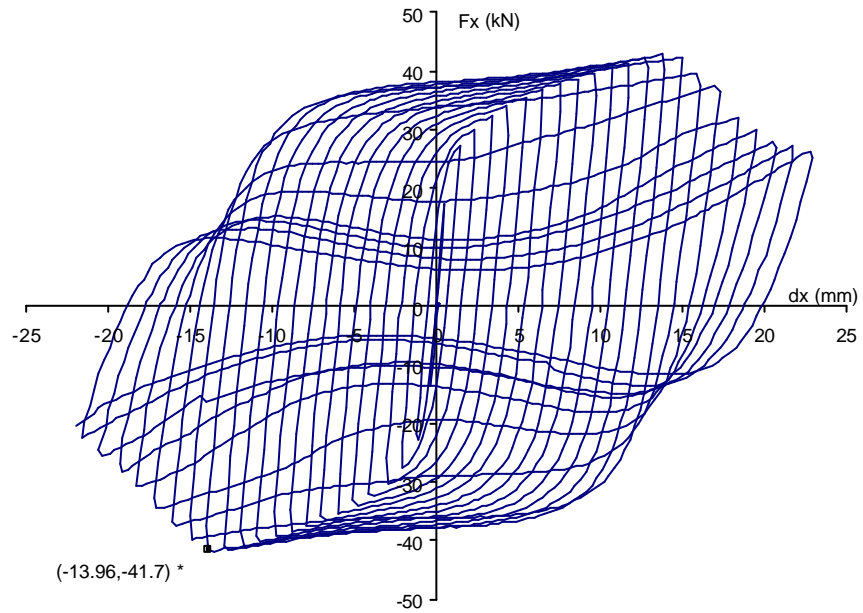


Figura 3.25 Curva histerética de respuesta del disipador 'A2'

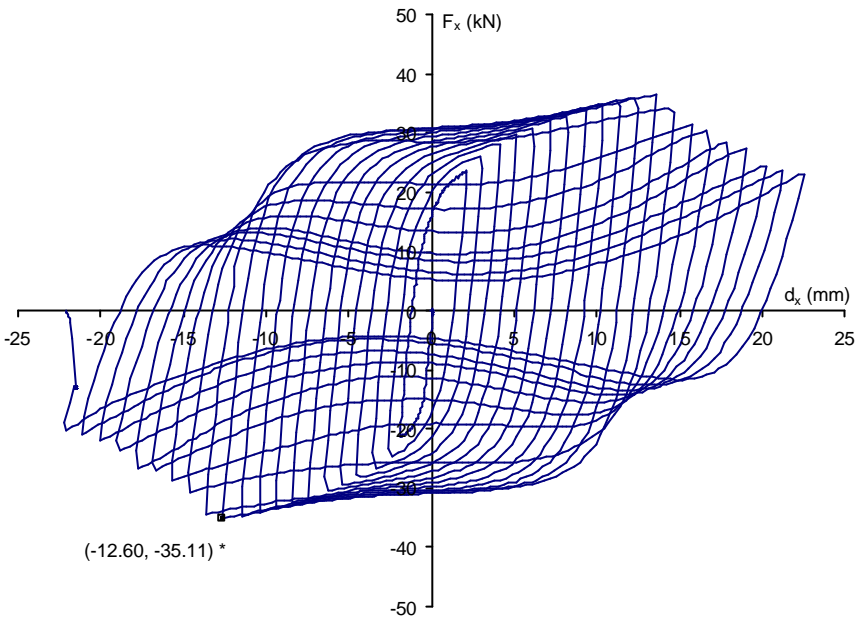


Figura 3.26 Curva histerética de respuesta del dissipador 'A3'

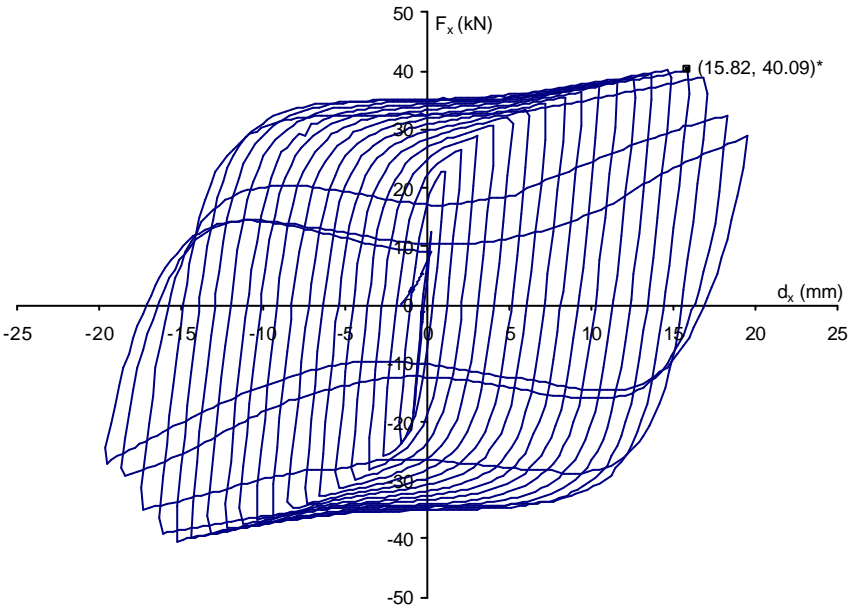


Figura 3.27 Curva histerética de respuesta del dissipador 'A4'

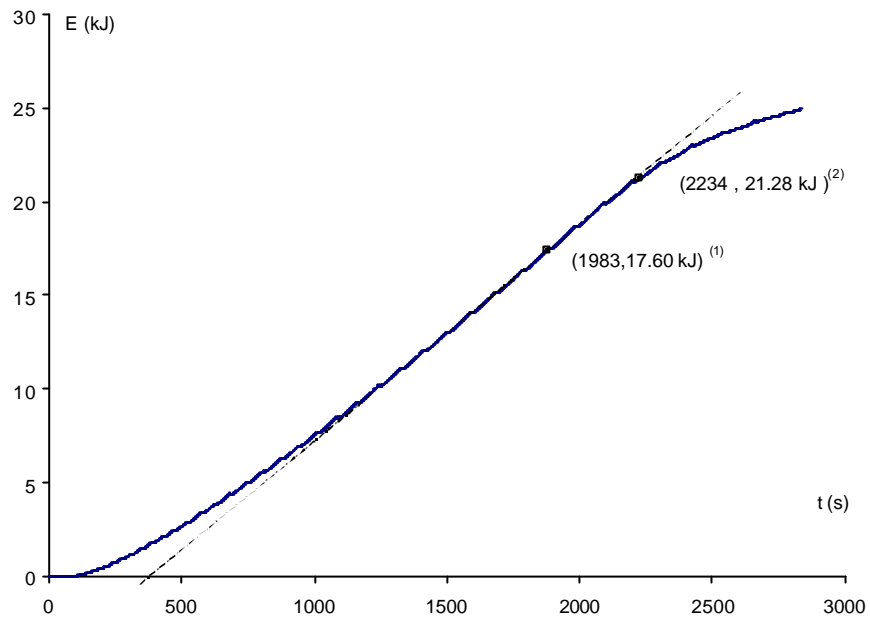


Figura 3.28 Evolución temporal de la energía total disipada por el dispositivo 'A1'

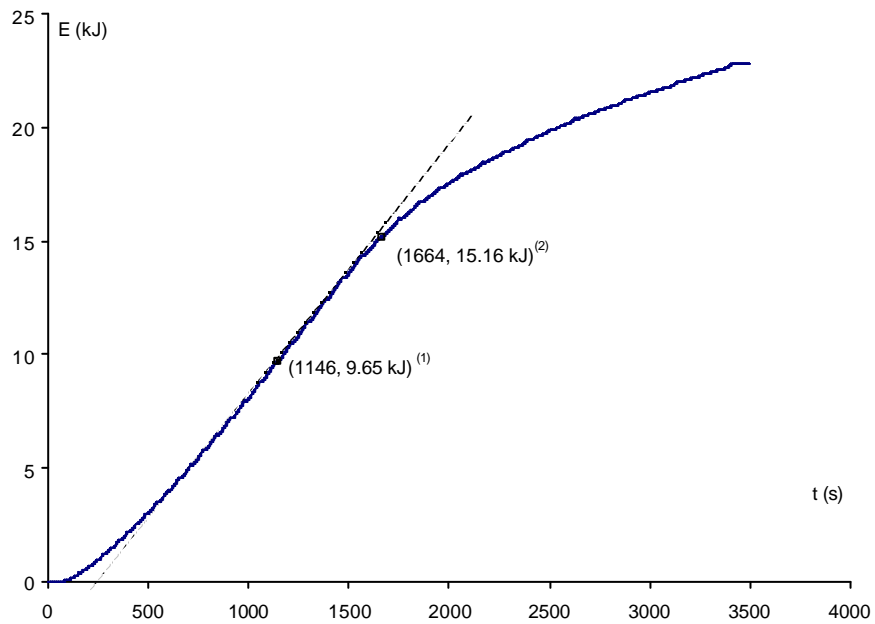


Figura 3.29 Evolución temporal de la energía total disipada por el dispositivo 'A2'

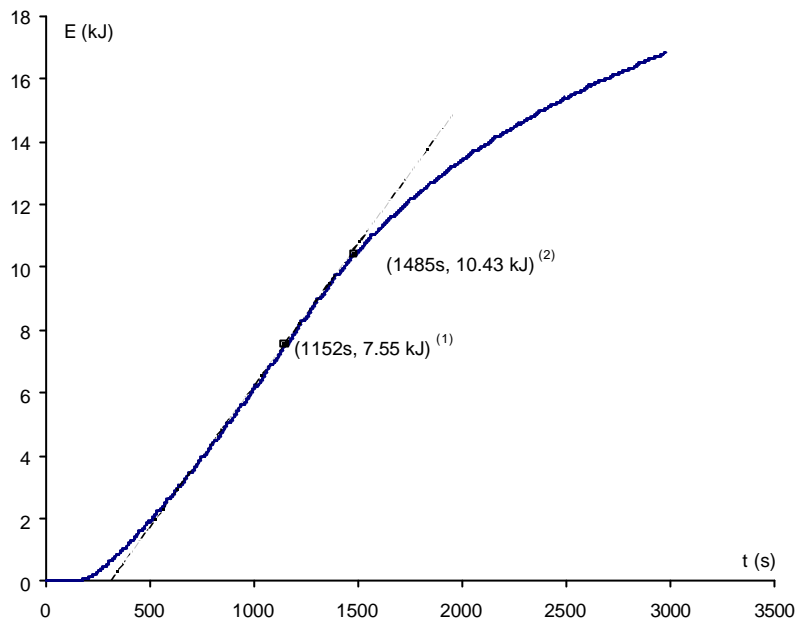


Figura 3.30 Evolución temporal de la energía total disipada por el dispositivo 'A3'

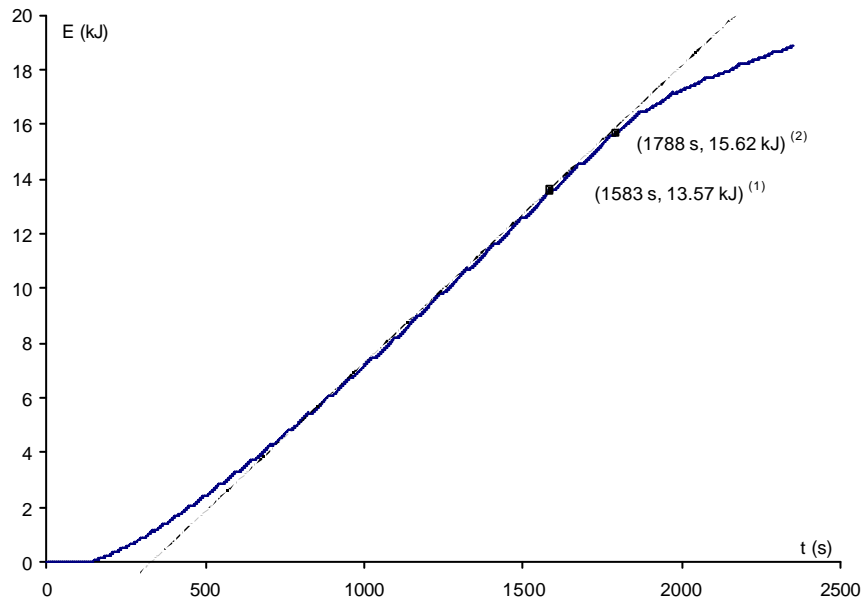


Figura 3.31 Evolución temporal de la energía total disipada por el dispositivo 'A4'

En la tabla 3.5 se incluyen parámetros que caracterizan el comportamiento de los disipadores ensayados: $F_{x,y}$ = fuerza de inicio de plastificación, $d_{x,y}$ = desplazamiento de inicio de plastificación, F_m = fuerza máxima en valor absoluto, $F_{m,0}$ = fuerza máxima desarrollada por el disipador en su paso por su posición inicial, E = energía total disipada, previo inicio de degradación del alma y d_T = desplazamiento total acumulado en valor absoluto. Algunos parámetros se han normalizado tal como se indica seguidamente:

$$\phi_{m,0} = F_{m,0}/F_{y,t} \quad [3.7]$$

$$\phi = E / (F_{m,0} \cdot d_T) \quad [3.8]$$

$$\gamma_T = d_T/H \quad [3.9]$$

donde $F_{y,t}$ = fuerza teórica de inicio de plastificación del disipador (obtenida según expresiones propuestas en el capítulo posterior, ecuaciones [4.2], [4.3], [4.4] y [4.5]), H = altura del alma con espesor mínimo y constante medida sobre el eje longitudinal del disipador.

El parámetro $f_{m,0}$ relaciona la fuerza máxima del disipador a su paso por su posición inicial ($d_x=0$) con la fuerza de inicio de plastificación teórica. Los distintos disipadores ofrecen para este parámetro una media de 1.9375, siendo el disipador 'A4' el que más se aleja de este valor con una diferencia de 0.12. Este disipador es el que presenta rigidizadores con menor espesor (2.5 mm en comparación con los 5 mm de los restantes)

El parámetro ϕ tiene un sentido de eficiencia, dado que compara la energía disipada por uno de los dispositivos con la que resultaría, en caso de comportarse de forma idealmente rígido-plástica. El valor medio obtenido a partir de los cuatro dispositivos es de 0.78 con una diferencia máxima de 0.013 respecto a la media.

Tabla 3.5 Parámetros característicos obtenidos, directa e indirectamente, a partir de los registros de las medidas de fuerza y desplazamiento horizontal

	$F_{x,y}$ (kN)	$d_{x,y}$ (mm)	F_m (kN)	$F_{m,0}$ (kN)	E (kJ)	d_T (m)	$\phi_{m,0}$	ϕ	γ_T
A	-	-	43.46	37.95	21.28	0.731	1.965	0.768	5.375
B	-	-	42.35	37.94	15.16	0.517	1.964	0.767	3.801
C	14.45	0.538	35.88	30.83	10.43	0.426	2.01	0.791	3.132
D	-	-	40.28	34.98	15.62	0.563	1.811	0.793	4.140

El parámetro γ_T representa la deformación angular media acumulada en valor absoluto. El dispositivo 'A1' ofrece el valor más elevado, indicando que la presencia de radio de transición en zonas de cambio de espesor puede empeorar el comportamiento del disipador. Una posible causa es que la presencia de este radio de transición reduce la zona del alma de espesor mínimo y constante donde la disipación de energía tiene lugar. Esta observación parece tanto más lógica cuanto más elevada es la relación radio/ancho alma, sin embargo se debería realizar un programa extensivo de ensayos para corroborar esta hipótesis.

3.4.3. Incidencia del inicio del proceso de degradación sobre valor de la reacción vertical.

En la figura 3.32 se representa la amplitud de la fuerza máxima vertical (F_y) en función del desplazamiento horizontal máximo de ciclo. Se puede apreciar:

1. Previo inicio del proceso de degradación, las pendientes son similares en todos los disipadores. Si se supone una reacción vertical nula para desplazamiento cero, los valores medios de las pendientes se encuentran entre 1.60 y 1.80 kN/mm en los disipadores A1, A2 y A4 (con 2 mm de espesor del alma) y de 2.2 en el disipador A3 (con espesor del alma de 1.5 mm).

2. Tras iniciarse la degradación del alma, la pendiente se eleva hasta valores de 10 kN en el disipador A3 y de 14 kN/mm en el disipador A1.

3. Tras la total degradación total del alma, la pendiente se reduce progresivamente, hasta valores prácticamente nulos.

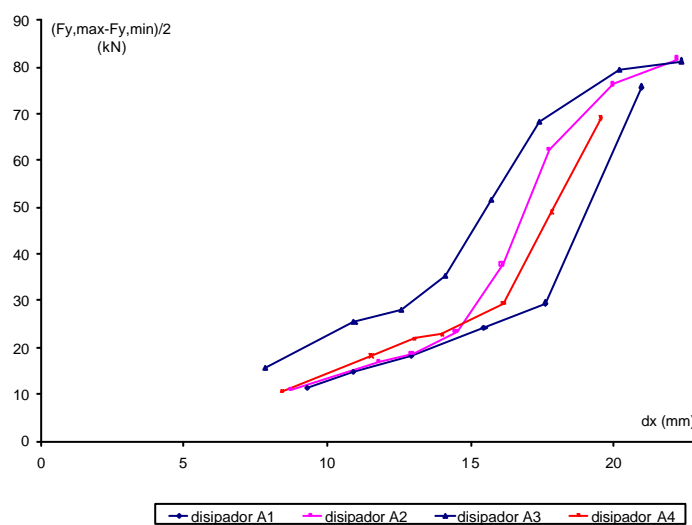


Figura 3.32 Relación entre la amplitud de la fuerza vertical y el desplazamiento máximo horizontal

3.4.4 Descripción i análisis (cualitativo) del proceso de degradación.

Se advierte un comportamiento distinto antes y después del deterioro del alma. Antes del deterioro del alma se producen deformaciones normales muy elevadas en los extremos de los dissipadores, especialmente en las alas, compatibles con la deformada que adquiere el dissipador (figura 3.33, izquierda). Esta apreciación es coherente con los resultados obtenidos por las galgas 6 y 7 del dissipador A (véase el punto 6 del apartado 3.3.2). Debido a la pérdida de ortogonalidad del alma bajo los efectos del cortante, se observan importantes deformaciones en las uniones entre rigidizadores y alas. Con la degradación del dissipador (figura 3.3.2, derecha), se observa una deformación por flexión muy pronunciada en los rigidizadores y las alas, inapreciable en el estadio anterior.

Se ha comprobado que la degradación del alma, además de comportar una disminución de la capacidad resistente horizontal (y de una consecuente disminución del trabajo de deformación) provoca un cambio en la evolución de las fuerzas verticales, en caso de desplazamiento vertical coartado, aumentando éstas de forma notable a partir de ese instante (tal como se ha comentado en el apartado 3.4.3)

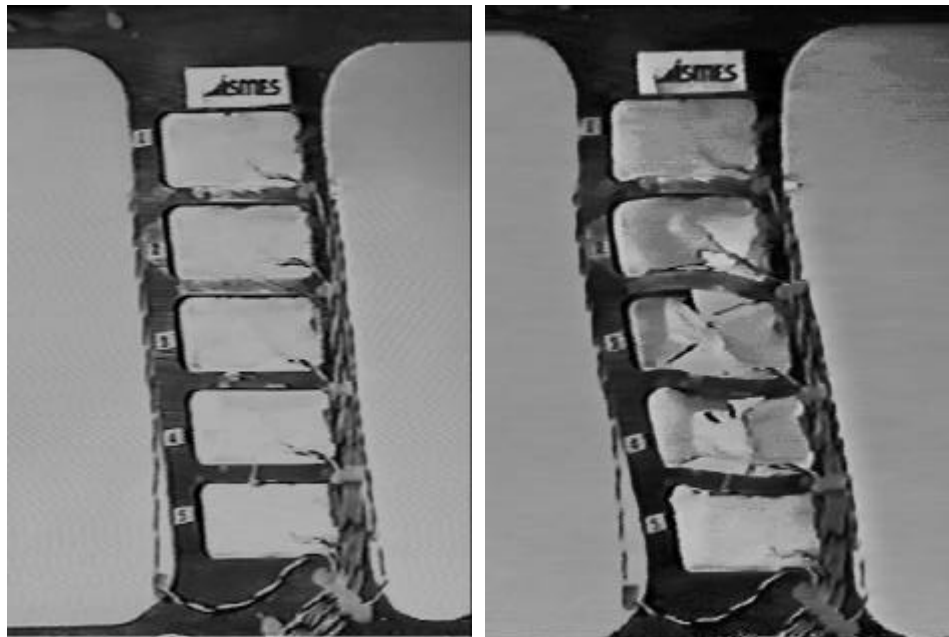


Figura 3.33 Dissipador antes y después del deterioro del alma

En los cuatro dispositivos ensayados se ha iniciado el proceso de degradación en el alma del dissipador. En ningún momento se ha observado degradación en los rigidizadores y en las alas hasta completado el proceso de degradación del alma. El alma comprendida en los recuadros extremos del dissipador, pese a sufrir

deformaciones visualmente equiparables al resto del alma, no ha sufrido degradación en ninguna de las pruebas. En el apartado siguiente se confirma que el nivel de deformación en esta zona es inferior, entre un 25 y 40%, al de la zona central. Según se observa en las figuras 3.34, 3.35 y 3.36, el deterioro se inicia en zonas próximas a los rigidizadores, con fisuras que se desarrollan inicialmente de forma vertical. Sin embargo, la evolución de las fisuras es distinta en el disipador A1 que en el resto de los disipadores. En el disipador A1, el cual se distingue del resto de los disipadores por la ausencia de radio de transición entre rigidizadores y alma, la fisura se desarrolla (tal como se observa en la figura 3.34) en un solo recuadro del alma, inicialmente en forma vertical, pero evolucionando posteriormente de forma transversal siguiendo el borde del rigidizador. La degradación se desarrolla de forma muy rápida en apenas un ciclo histeréticos.

En los disipadores A2 y A3 el proceso de degradación evoluciona distintamente (véanse las figuras 3.35 y 3.36). Las fisuras son de carácter vertical y se distribuyen en zonas del alma separadas por rigidizadores. La degradación total del alma con la aparición final de fisuras transversales se produce tras dos o tres ciclos histerético.

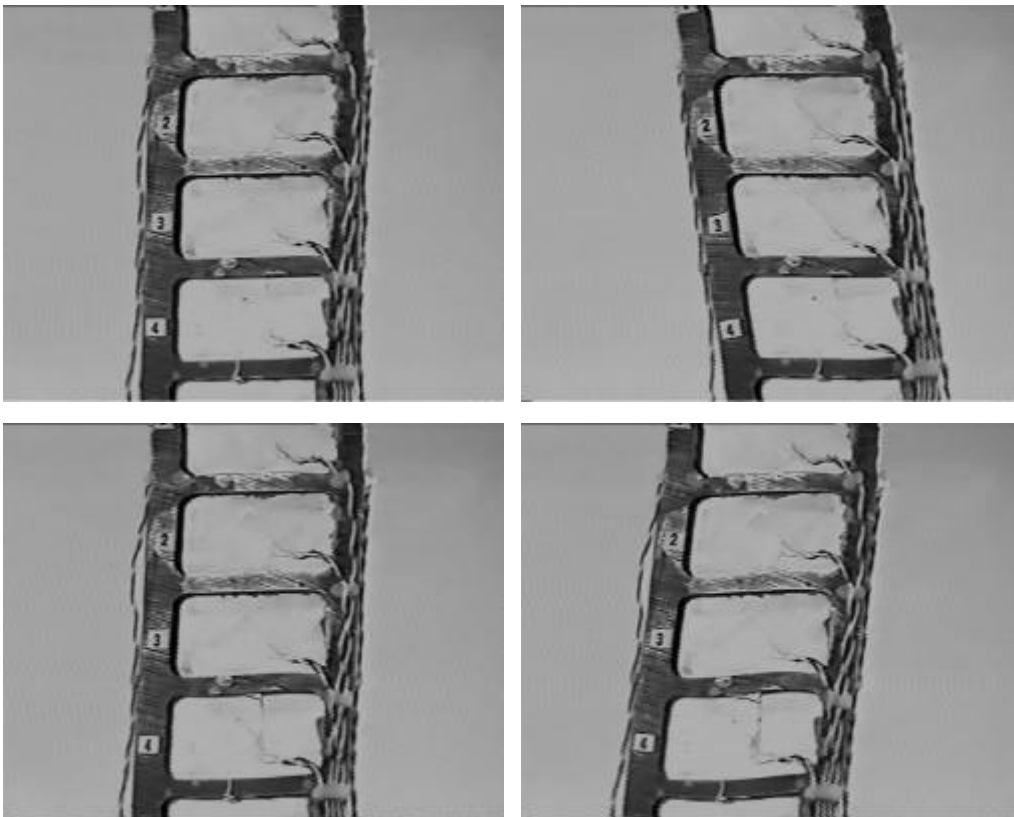


Figura 3.34 Evolución de la degradación del alma en el dispositivo A1

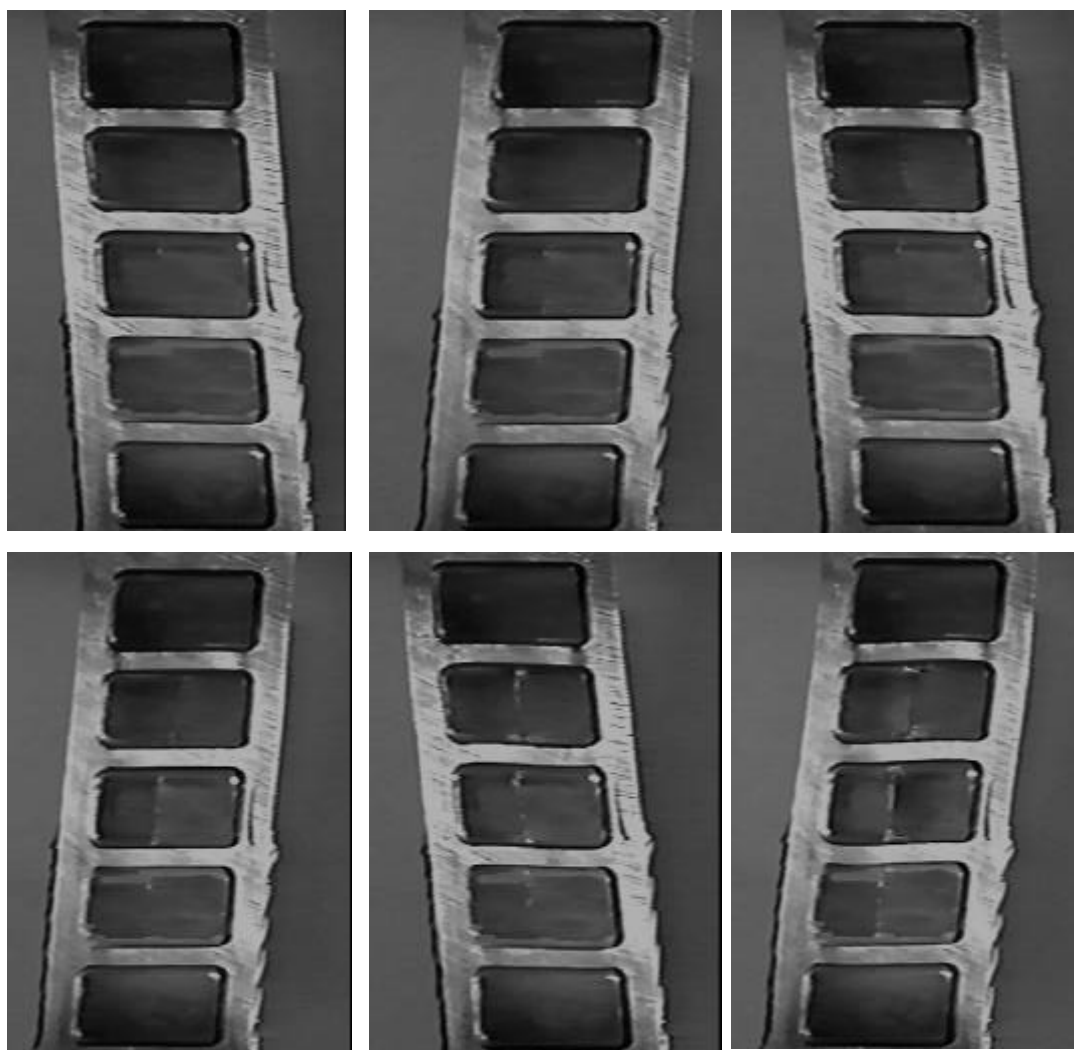


Figura 3.35 Evolución de la degradación del alma en el dispositivo A2

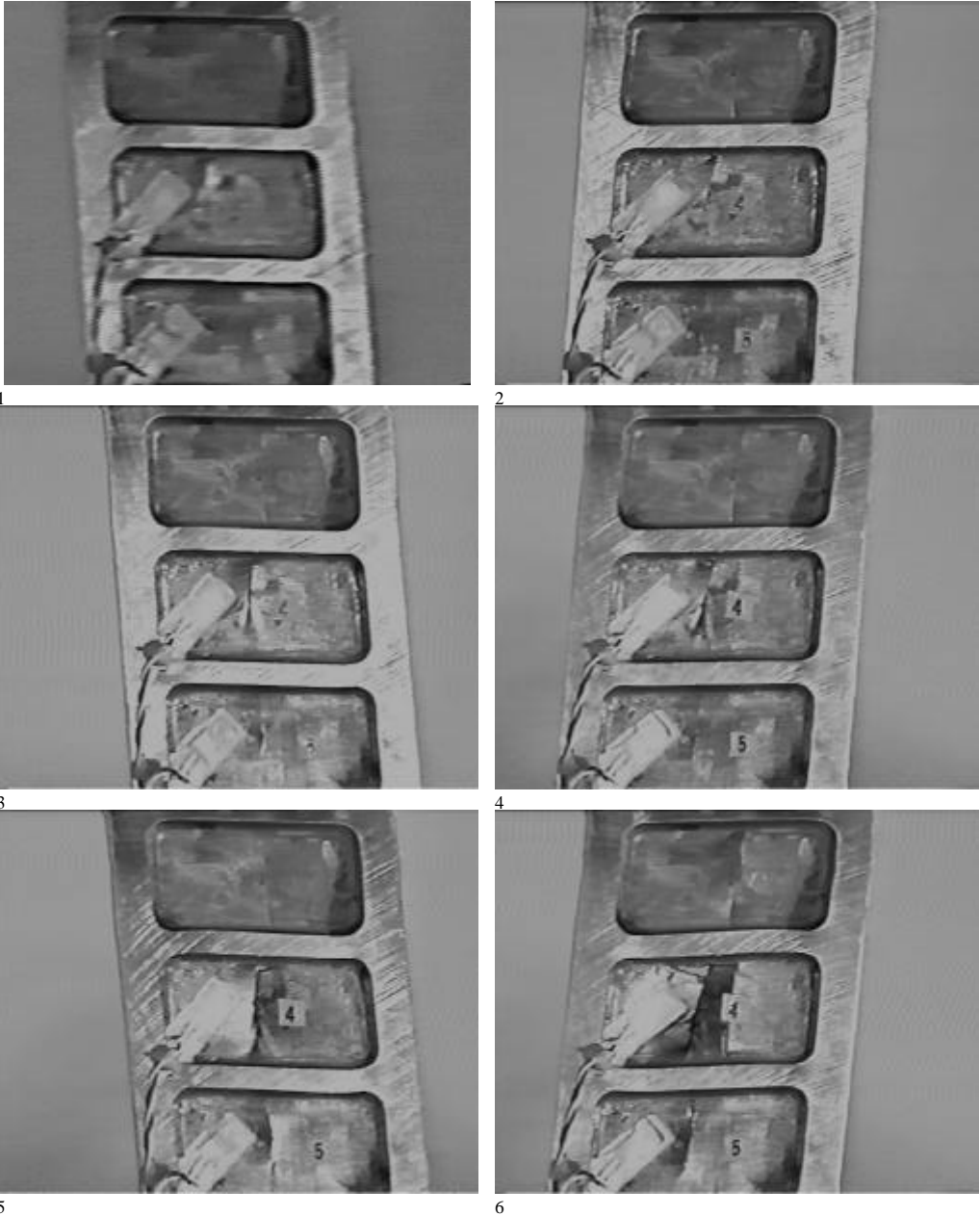


Figura 3.36 Evolución de la degradación del alma en el dispositivo A3

3.5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES EN EL DISIPADOR

3.5.1. Ángulo de deformación. Distorsión angular.

En elementos disipadores de energía con sección en doble T y plastificación por cortante, la deformación se produce claramente en el alma, en los paralelogramos bordeados por alas y rigidizadores (figura 3.37). El ángulo de deformación de estos paralelogramos es un parámetro adoptado frecuentemente para cuantificar resultados o establecer modelos de comportamiento. Para su cálculo se propone la siguiente expresión:

$$\gamma = d_x / H' \quad [3.10]$$

donde γ = deformación angular, d_x = desplazamiento relativo entre ambos extremos de disipador, $H' = H - n t_s$, n = número de rigidizadores y t_s = espesor de los rigidizadores.

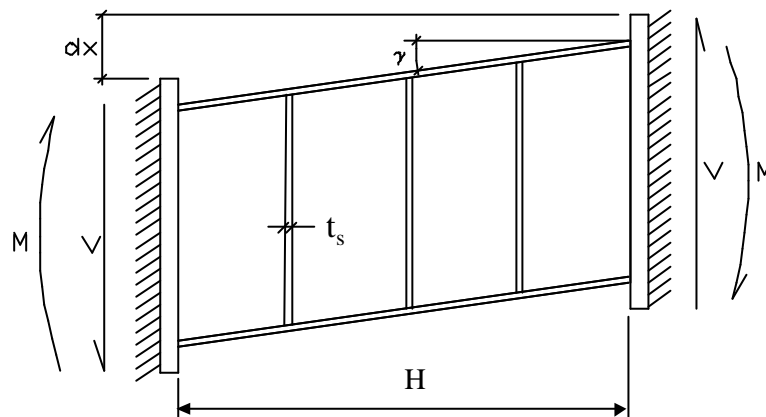


Figura 3.37 Disipador en doble T con rigidizadores, deformado principalmente por el esfuerzo cortante

La distorsión angular en una zona del alma, γ' , se puede obtener experimentalmente a partir de la medición de una sola galga extensométrica. Un elemento en el plano del alma y orientado conforme a su eje longitudinal, según se indica en la figura 3.38, manifiesta tensiones normales muy inferiores a las tangenciales, y se puede considerar bajo un estado de deformación cortante puro, con una deformación angular γ' . Aceptando la anterior suposición y, basándose en la teoría de la elasticidad, a partir de las mediciones observadas por una galga extensométrica orientada a 45° con respecto al eje longitudinal del disipador, se puede determinar el valor de la distorsión angular bajo cortante puro:

$$\gamma' = 2 \cdot \epsilon_{45} \quad [3.11]$$

Donde γ' = deformación angular y ϵ_{45} = deformación medida por la galga.

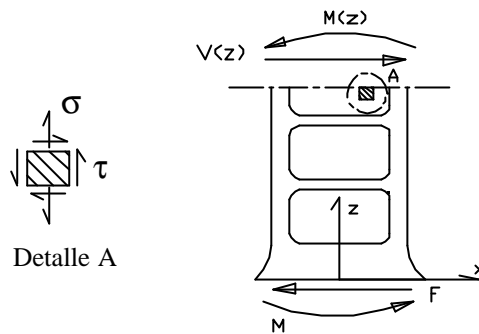


Figura 3.38 Distribución de tensiones en la zona del alma del dissipador

En un dissipador por cortante ideal, la distorsión angular sería uniforme en el alma e igual al ángulo de deformación obtenido según [3.10]. Para el dissipador tipo 'B1' se ha representado el ángulo de deformación y la distorsión angular medida por su galga central en relación con el desplazamiento relativo entre extremos de dissipador (figura 3.39). El valor de la distorsión angular aumenta prácticamente de forma lineal, excepto en la zona en que se inicia la plastificación. En la zona lineal y elástica, los valores de ambas variables son prácticamente los mismos. En la zona de comportamiento plástico se aprecia una diferencia entre ambas variables constante, manteniéndose el ángulo de deformación superior a la distorsión angular. Para un desplazamiento de 10 mm, la diferencia entre ambas variables es inferior al 17 %. La medida efectuada por la galga extensométrica abandona su linealidad al iniciarse la abolladura del alma (obsérvese en la figura 3.40 que la galga se encuentra sobre una zona abollada).

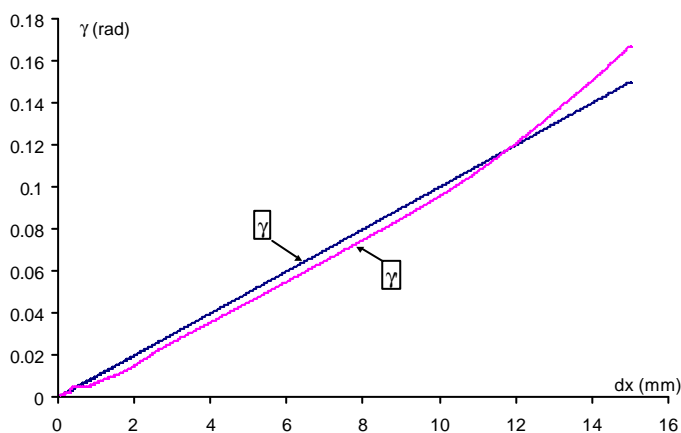


Figura 3.39 Evolución relativa al desplazamiento del dissipador entre la deformación angular y la distorsión angular medida por la galga central en el dispositivo 'B1'.

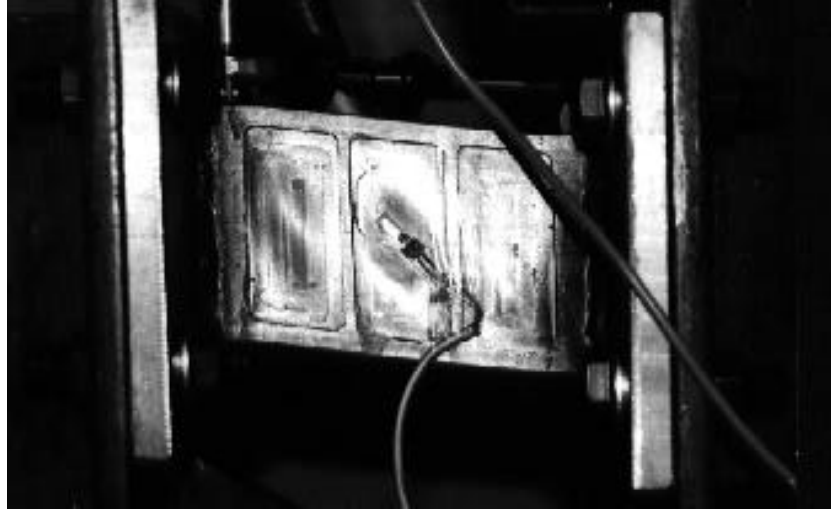


Figura 3.40 Dispositivo B1 en estado de abolladura

3.5.2 Distribución de la deformación en el alma

En el dispositivo A4 se situaron dos galgas con la misma posición y dirección, pero en caras opuestas del alma. La diferencia de medidas resultó inferior al 4 %. En el resto de los dispositivos se instrumentó en una sola cara bajo la suposición que la deformación se mantiene constante en todo su espesor.

Si se representan las mediciones de las galgas correspondientes al disipador tipo 'A3' en su fase de desplazamiento monótonico creciente (figura 3.41), se observa que la plastificación se produce de forma generalizada en el alma, pero a distinto nivel. Se aprecia una mayor deformación en los dos tercios centrales del alma del disipador. La figura 3.42 presenta la evolución de las mediciones de las galgas en comportamiento histerético. Cualitativamente se puede apreciar que la deformación resulta más homogénea a medida que aumenta la deformación angular del disipador, manteniéndose una deformación superior en su zona central. Para cuantificar estas apreciaciones cualitativas se definen dos parámetros:

Δ_{23} : en la zona del alma correspondiente a los dos tercios centrales del disipador, diferencia máxima entre deformaciones y el valor medio de las deformaciones.

Δ_{total} : cociente entre la diferencia máxima entre deformaciones medidas y su media.

La tabla 3.6 muestra la evolución de ambos parámetros en ciclos consecutivos. Las apreciaciones relativas a la distribución de la deformación en el dispositivo 'A3' se hacen extensibles al dispositivo 'A1'. El gráfico 3.43, acompañado de la tabla 3.7, reafirma que el aumento de la deformación angular del disipador (bajo régimen plástico) conlleva una distribución más uniforme de la deformación en el alma.

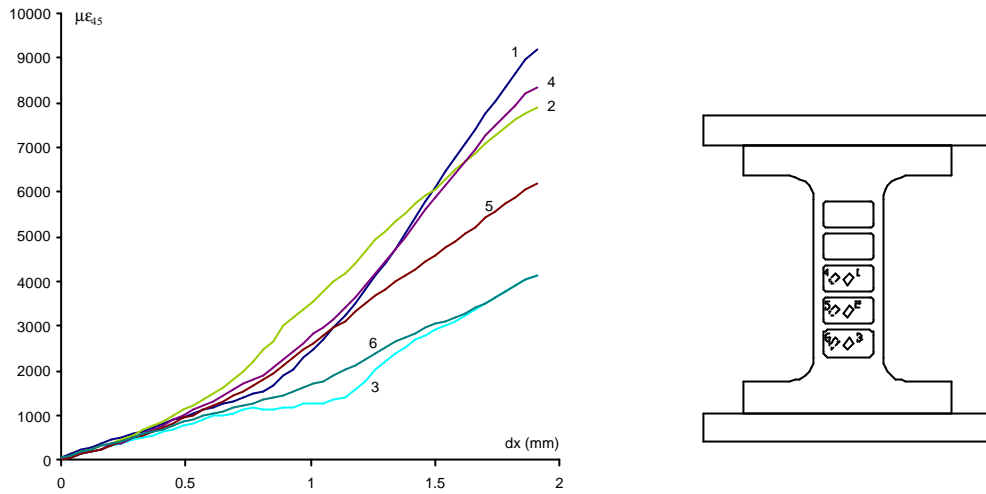


Figura 3.41 Evolución de las mediciones de las galgas en el dissipador 'A3' en su fase de deformación monotónica.

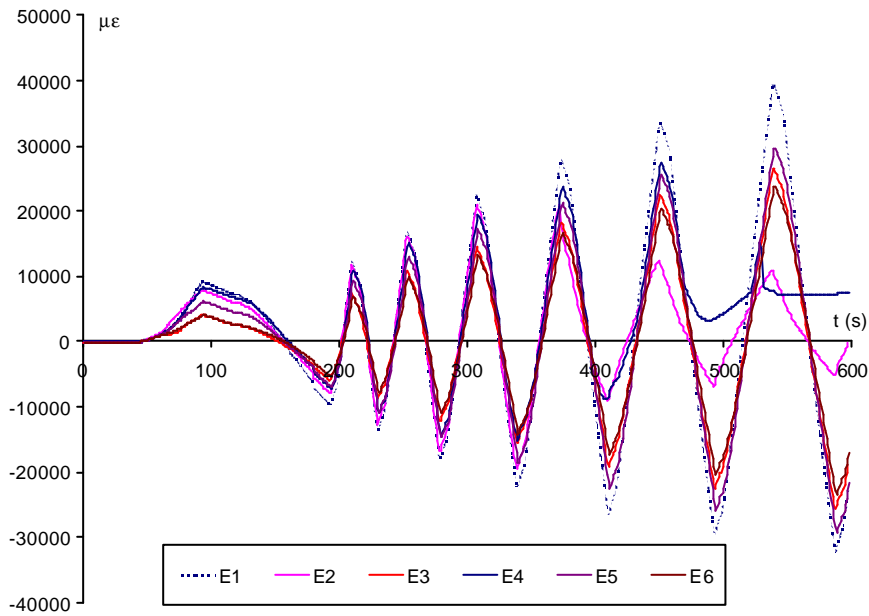


Figura 3.42 Evolución temporal de las medidas de las galgas del alma en el dispositivo 'A3'

Tabla 3.6 Distribución de la deformación en el dissipador 'A3'

γ	-0.0164	0.0181	-0.0307	0.0353	-0.0396
Δ_{total}	71%	-49%	41%	-37%	41%
$\Delta_{2/3}$	38%	-36%	24%	-22%	25%

Tabla 3.7. Distribución de la deformación en el disipador 'A1'

γ	0.0122	0.0202	0.0299	0.0383	0.0476
Δ_{total}	-54%	-56%	-22%	-25%	-25%

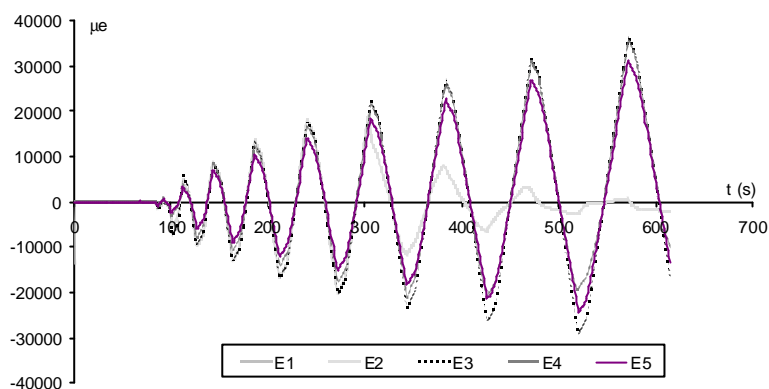


Figura 3.43 Evolución temporal de las medidas de las galgas del alma en el dispositivo 'A1'

3.5.3 Distribución de la deformación en las alas

En la figura 3.12 se apreciaba la situación de las galgas en el dispositivo 'A1'. Fue instrumentado con dos galgas en sus alas, en una zona próxima a una de sus uniones atornilladas. Sus medidas se mantienen bajo valores prácticamente iguales pero de signo opuesto (figura 3.44). La semisuma de ambas medidas, correspondiente a desplazamientos máximos de ciclo (figura 3.45), resulta menor al 14% de su semidiferencia. Ello indica un predominio de la deformación normal producida bajo efecto de la curvatura de las alas sobre el alargamiento normal debido a la restricción de desplazamiento en ambos extremos del disipador.

El dispositivo A2 también se instrumentó en las alas de forma similar al dispositivo A1, pero en la sección central del disipador (figura 3.13). En la figura 3.46 se puede observar la evolución de la semisuma y semidiferencia de ambas medidas. La semidiferencia (la cual representa la deformación producida por la curvatura de las alas) se mantiene inferior al 10% de la deformación de límite elástico. Su semisuma presenta una función con amplitud creciente. Si se representan los valores máximos de la semisuma y la semidiferencia de medidas, se obtiene la representación de la figura 3.47. La semisuma alcanza máximos al unísono que el desplazamiento del disipador, y mantiene una relación prácticamente lineal con este hasta un valor próximo a los 12 mm, a partir del cual la relación es no lineal y creciente. En el gráfico fuerza - desplazamiento de la figura 3.25, se puede apreciar

que a partir de este desplazamiento empezó a degradar el dispositivo, con manifiesta pérdida de capacidad de carga horizontal.

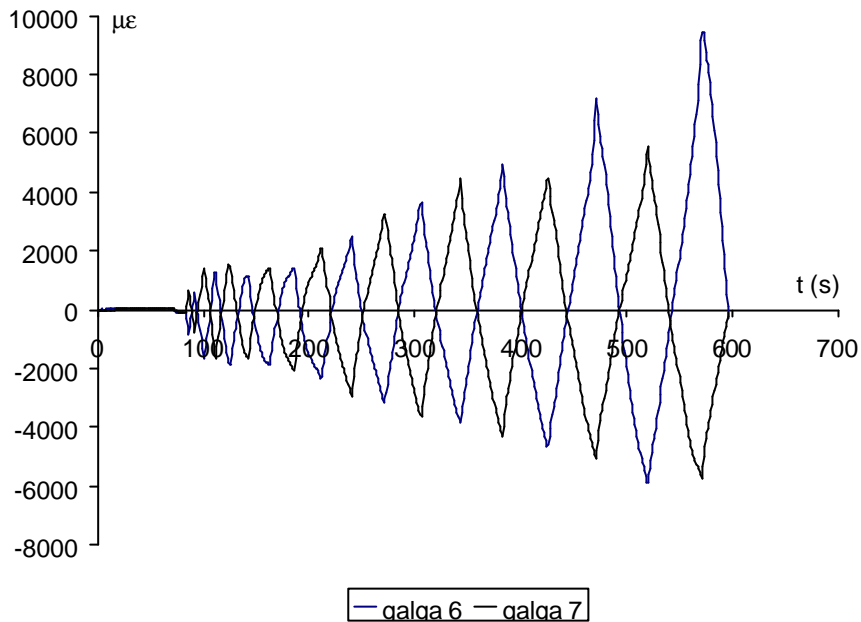


Figura 3.44 Evolución temporal de las deformaciones medidas por las galgas 6 y 7 en el disipador 'A1'.

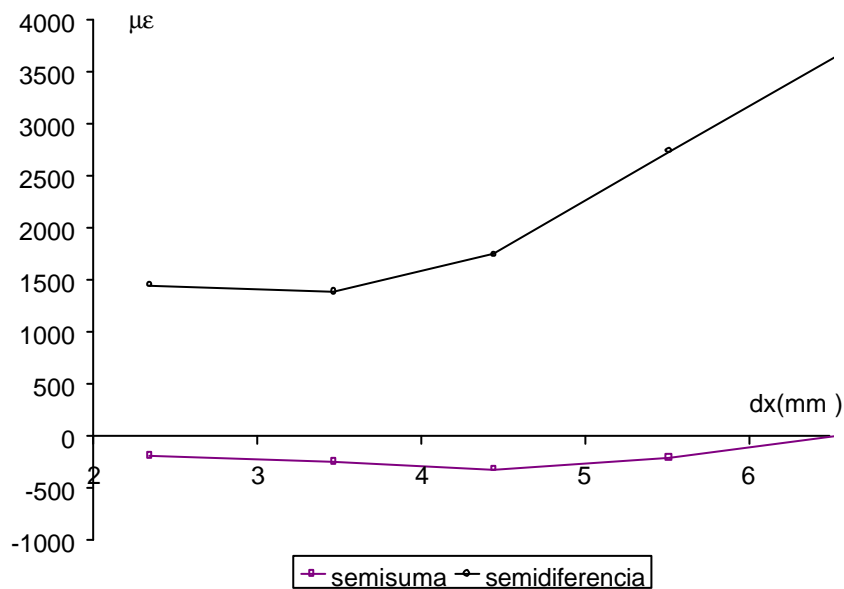


Figura 3.45. Semisuma y semidiferencia de las deformaciones medidas por las galgas 6 y 7, correspondientes a desplazamientos máximos de ciclo del disipador 'A1'

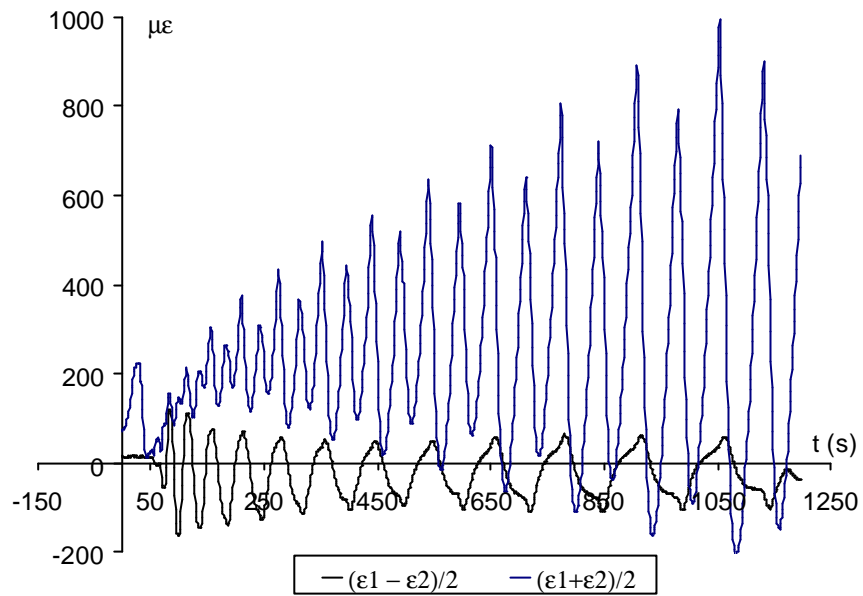


Figura 3.46 Evolución temporal de la semisuma y semidiferencia de deformaciones medidas por las galgas 1 y 2 en el dissipador 'A2'.

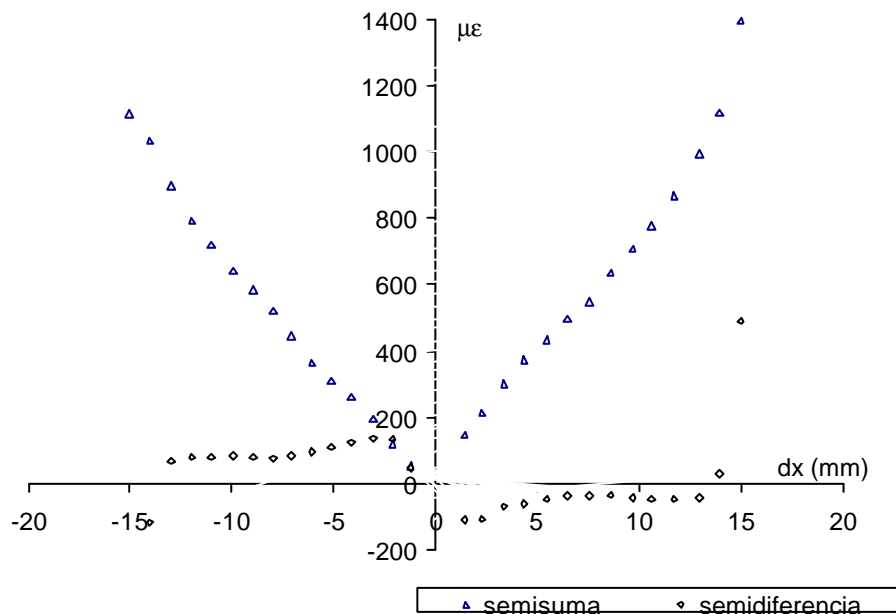


Figura 3.47 Semisuma y semidiferencia de las deformaciones medidas por las galgas 1 y 2, correspondientes a desplazamientos máximos de ciclo del dissipador 'A2'