

DESARROLLO DE DISIPADORES DE FLUENCIA DE METALES Y SU APLICACIÓN A SISTEMAS PASIVOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Francisco Zabala (*)

José Luis Bustos (*)

Alberto R. Masanet (*)

Jorge R. Santalucía (*)

(*) Instituto de Investigaciones Antisísmicas.
Universidad Nacional de San Juan.
Avenida Libertador General San Martín 1290 (o)
C.P.5400 - San Juan - Argentina.
Tel-Fax: 54-0264-4228123
e-mail: idia@unsj.edu.ar

RESUMEN:

En este trabajo se describen los ensayos de comportamiento realizados en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Investigaciones Antisísmicas de la Universidad Nacional de San Juan sobre un disipador de fluencia de metales tipo ADAS y las posibilidades de su aplicación como sistema pasivo de protección a edificios de hormigón armado. Muchos de los edificios construidos en la zona sísmica argentina, que se encuentran actualmente en servicio, se han proyectado y construido con normas en las que los niveles de sollicitación sísmica y detallado exigidos en su momento fueron substancialmente menores que los que requieren las normas actuales. Para estas estructuras se exploran las posibilidades de uso de los sistemas de disipación con el objetivo de aumentar su seguridad y mejorar su comportamiento bajo sismos destructivos

DESARROLLO DE DISIPADORES DE FLUENCIA DE METALES Y SU APLICACIÓN A SISTEMAS PASIVOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

1.- INTRODUCCIÓN.

Los terremotos imponen movimientos en la base de las estructuras que se traducen en fuerzas restauradoras en sus elementos resistentes. En el diseño de edificios se admite que estos alcancen estados de tensión-deformación elastoplásticos, bajo la condición de que los daños no provoquen víctimas, ni colapso de la estructura. Es posible actualmente establecer objetivos de desempeño de estas estructuras, bajo la acción de diferentes niveles de amenaza sísmica, mediante la comparación de desplazamientos, distorsiones de piso o rotaciones de rótulas plásticas, con valores de referencia que indican el grado de daño [Fema 356, 2000].

Este enfoque, que implica admitir mayor o menor daño estructural ante terremotos destructivos sin pérdidas de vidas ni colapso, puede cambiarse o combinarse con un esfuerzo dirigido a proteger a la estructura, de manera de reducir el daño o anularlo. En este sentido se han desarrollado diferentes sistemas de protección sísmica de estructuras que pueden clasificarse en tres grandes grupos: sistemas de aislación sísmica, sistemas de disipación pasiva de energía y sistemas de control activo o semiactivo. Los sistemas de disipación pasiva de energía tienen como función principal disipar parte de la energía introducida a la estructura principal por el terremoto y por consiguiente disminuir el daño.

En este trabajo se propone el desarrollo local de sistemas de protección pasiva basados en amortiguadores de fluencia de acero tipo ADAS [Aiken I.D, et al, 1993], el ensayo de los componentes del sistema para obtener sus características de comportamiento y la exploración de las posibilidades de aplicación en la zona sísmica argentina a la rehabilitación de estructuras.

2.- CONSTRUCCIÓN DE UN AMORTIGUADOR DE FLUENCIA DE METALES.

Los amortiguadores de fluencia de acero constituyen una tecnología de bajo costo aplicable tanto al diseño de edificios nuevos como a la rehabilitación de edificios existentes. Por sus características de disipación de energía proveen de amortiguamiento de tipo histéretico que no depende de la velocidad de aplicación de las cargas.

El amortiguador metálico de fluencia tipo ADAS que se muestra en la Figura 1 se compone de una serie de chapas de acero con forma de X [Aiken I.D, et al, 1993] o de reloj de arena. Estas chapas, que se toman en su parte inferior y superior con otras piezas de acero de manera de fabricar un paquete, se someten a flexión por el desplazamiento diferencial sin rotación de sus extremos. La forma en X sigue aproximadamente la variación del momento flector de una viga doblemente empotrada y permite la fluencia de todo el volumen de material sin la concentración de deformaciones plásticas en el empotramiento. El disipador que se construyó tiene 7 chapas de espesor de $\frac{1}{4}$ " de acero común. En la Figura 1 y en las Fotografías 1 y 2 se muestran las piezas que constituyen el modelo y su armado.

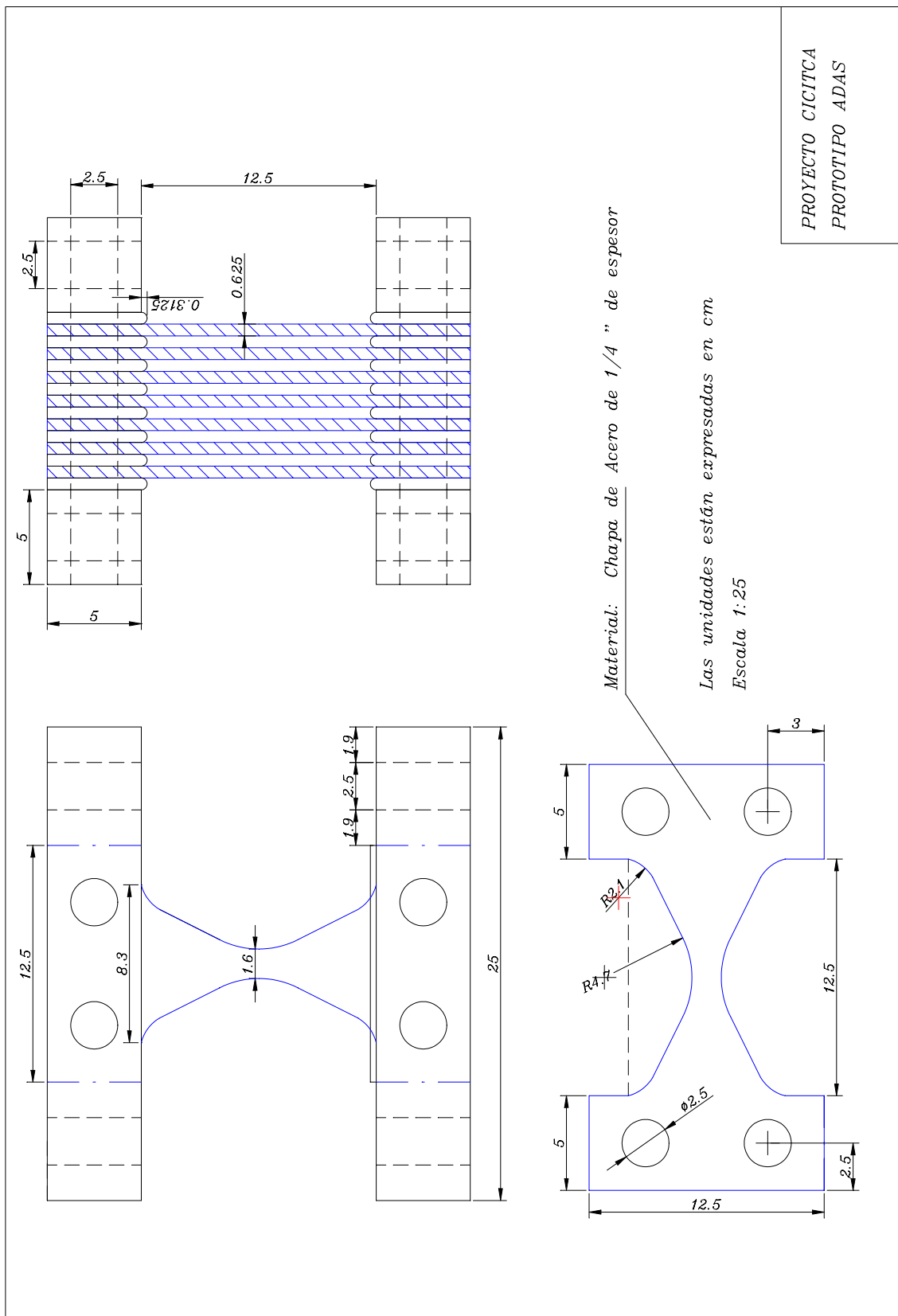


Figura 1.



Fotografía 1.



Fotografía 2.

3.- ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO DEL DISIPADOR.

En la Figura 2 se muestra el esquema de ensayo del amortiguador en la losa de carga y muro reactivo del Laboratorio del Instituto de Investigaciones Antisísmicas de la Universidad Nacional de San Juan. La Fotografía 3 muestra una vista de conjunto del banco de ensayo con el amortiguador colocado y listo para ser ensayado. El actuador servohidráulico, anclado en el muro reactivo, desplaza en forma horizontal una viga a la que se vincula el dispositivo. Este a su vez está anclado a la losa de carga. El desplazamiento del actuador se controla mediante una computadora que además adquiere los datos de carga de la celda de carga y de desplazamiento del sensor de desplazamientos (LVDT).

En la Fotografía 4 se muestra un detalle del desplazamiento del dispositivo durante el ensayo y el sensor de desplazamientos (LVDT) aplicado.

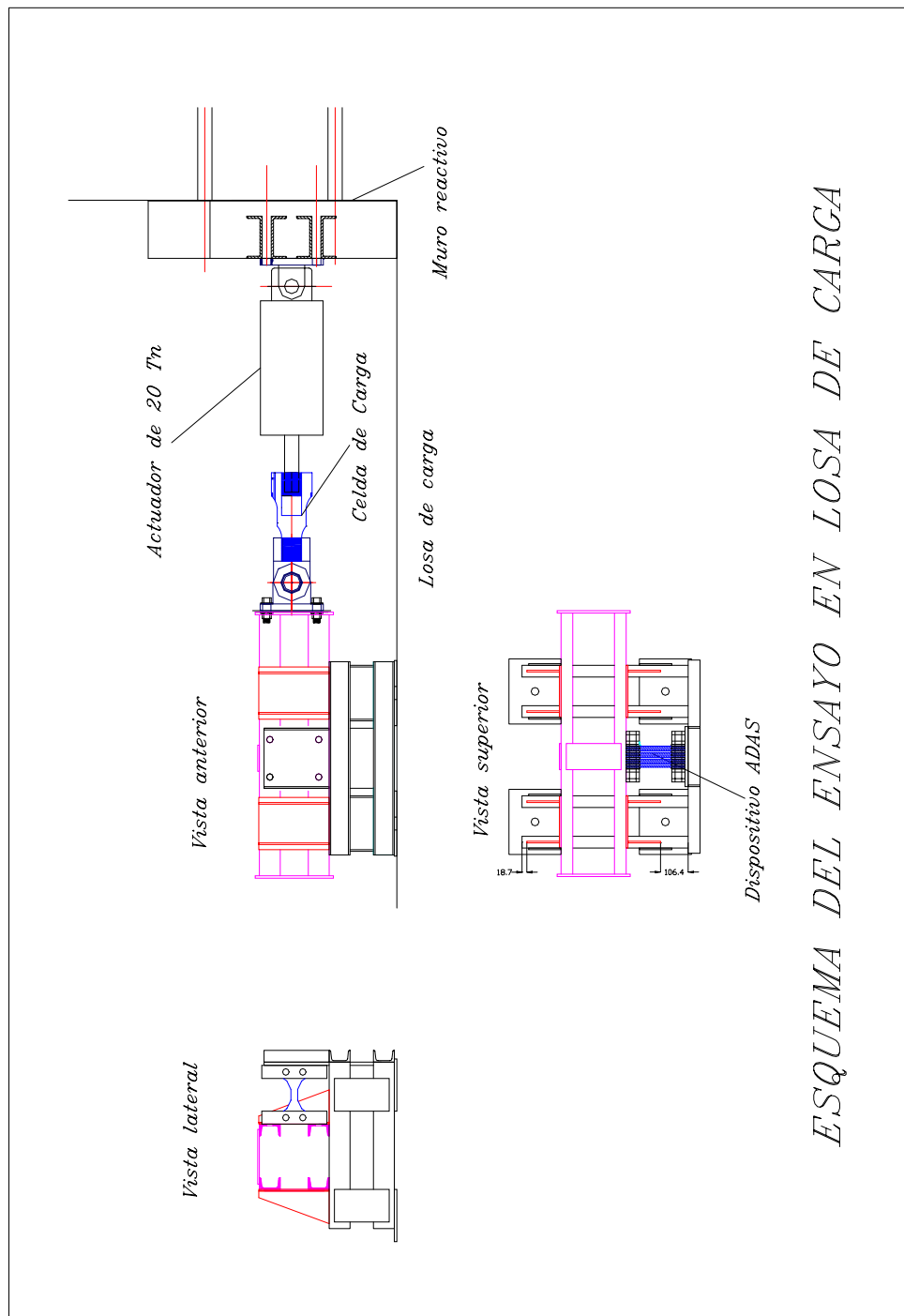
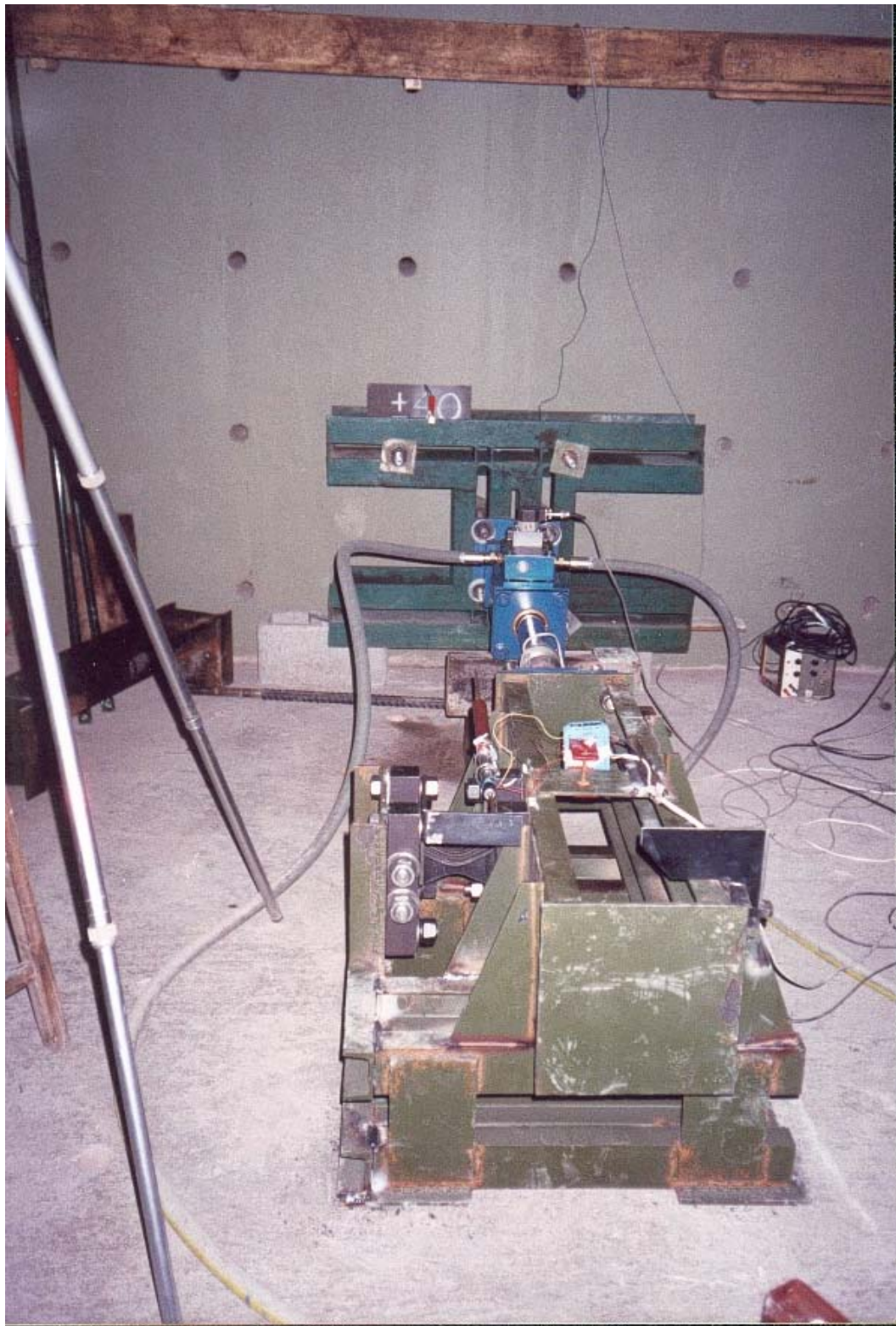
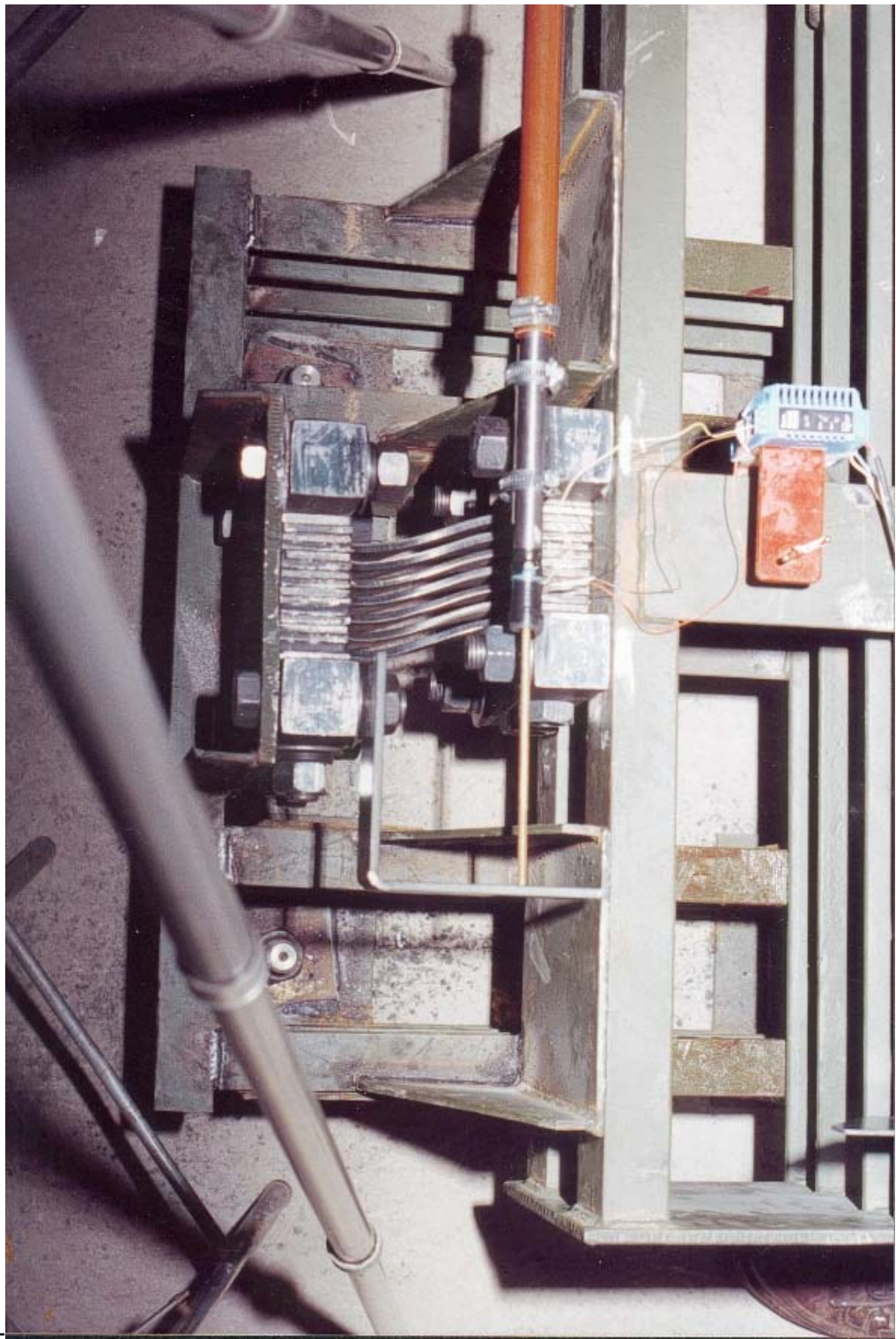


Figura 2.



Fotografia 3.



Fotografia 4 .

4.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS:

Los ensayos realizados consistieron en la aplicación de ciclos de desplazamiento con diferentes amplitudes que se incrementaron en forma sucesiva hasta llegar a 30 mm. Durante la aplicación de cada ciclo se controla el desplazamiento del dispositivo y se mide la carga alcanzada. En la Figura 3 se puede observar un gráfico carga-desplazamiento para desplazamiento máximo de 14mm, y para el que se midió una carga máxima de 2,25 tn.

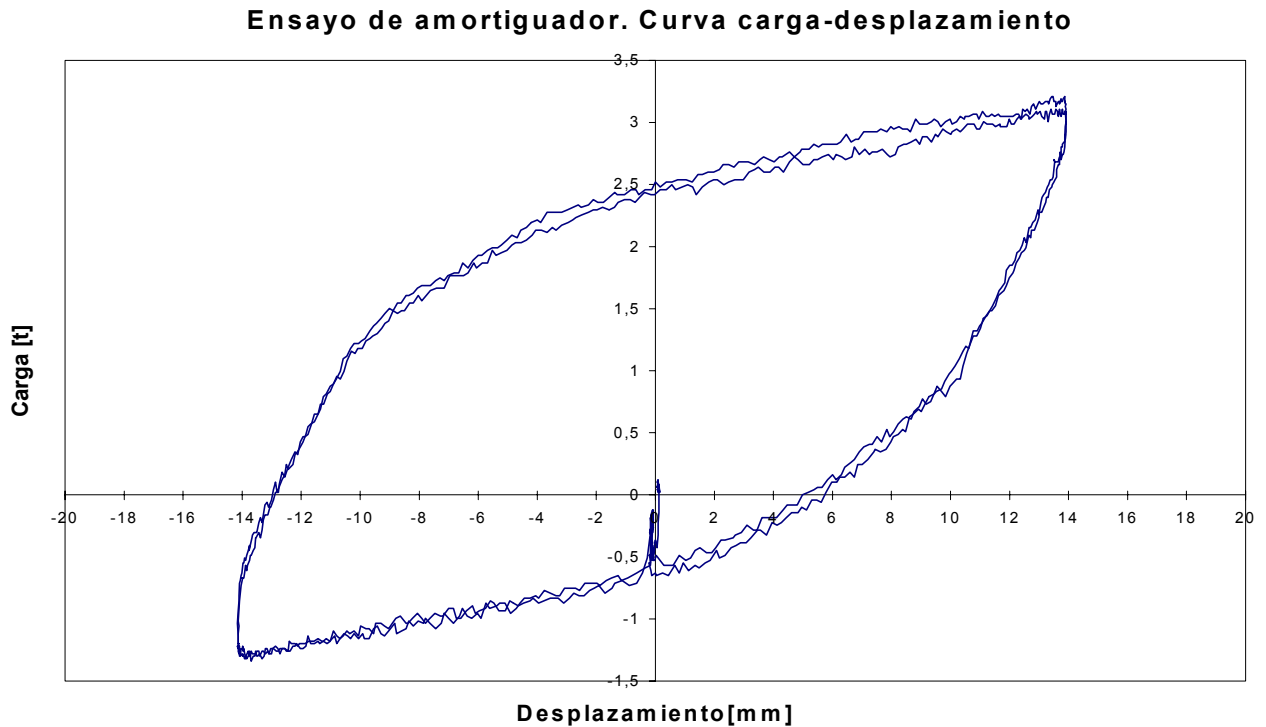


Figura 3.

En la Figura 4 se grafican todas las curvas carga deformación del ensayo, hasta el desplazamiento de 30mm, para el cual se midió un valor máximo de carga de 3.5 tn. En este gráfico se puede observar detalladamente la gran capacidad de disipación de energía del ADAS, como así también la similitud de las curvas de este ensayo con las presentadas en [Aiken I.D, et al, 1993], de un dispositivo similar al ensayado en esta ocasión.

Los ensayos muestran que el amortiguador tiene gran capacidad de disipación de energía y estabilidad de su resistencia para valores de desplazamiento varias veces mayores que el de fluencia. Estos ensayos no implicaron la destrucción del disipador y a la vista no se observaron daños, grietas o marcas en las chapas.

Ensayo de amortiguador. Curvas carga-desplazamiento

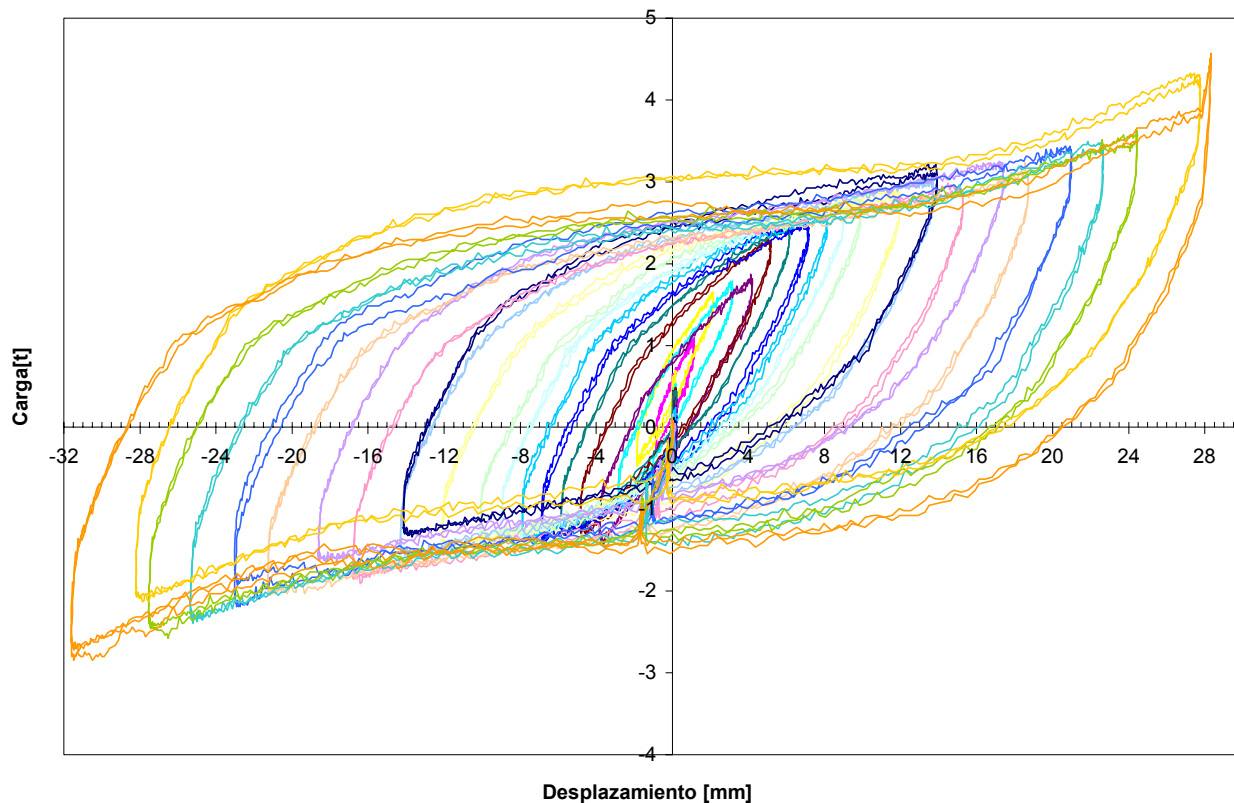


Figura 4

Si se asume un modelo bilineal para representar el comportamiento mecánico del disipador pueden estimarse los valores de carga y desplazamiento de fluencia mediante las siguientes expresiones que corresponden a una viga en forma de X doblemente empotrada [Y. Y. Lin, et al,2003].

$$\delta_y = \frac{3 \sigma_y h^2}{4 t E} \qquad F_y = \frac{N \cdot \sigma_y b t^2}{2h} \quad (1)$$

$\sigma_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$: Tensión nominal de fluencia del acero.

E: módulo de elasticidad del acero.

N=7: número de chapas

t: espesor de la chapa.

h: altura de la X.

b: ancho equivalente de la X (h/2)

De estas expresiones se obtiene para la geometría del amortiguador:

$\delta_y = 0.2 \text{ cm}$: Desplazamiento de fluencia.

$F_y = 1.7 \text{ t}$: Carga de fluencia.

En la Figura 5 se muestran ensayos cíclicos para desplazamientos crecientes entre 16 y 28 mm y la curva bilineal carga-deformación obtenida a partir de los valores de desplazamiento y

carga de fluencia calculados con las expresiones (1). El endurecimiento que se observa puede representarse con un porcentaje α de la rigidez inicial. En este caso se obtiene:

$\alpha=0.05$:Tasa de endurecimiento

La carga alcanzada en primera fluencia se corresponde bastante bien con la teórica. Las expresiones (1) de carga y desplazamiento de fluencia permiten diseñar un dispositivo para cada caso de aplicación. El desplazamiento de fluencia puede modificarse variando la altura y espesor de las chapas o la calidad del acero y la carga de fluencia puede controlarse con el número y espesor de las placas y la calidad del acero.

Ensayo de amortiguador. Comparación con valores teóricos

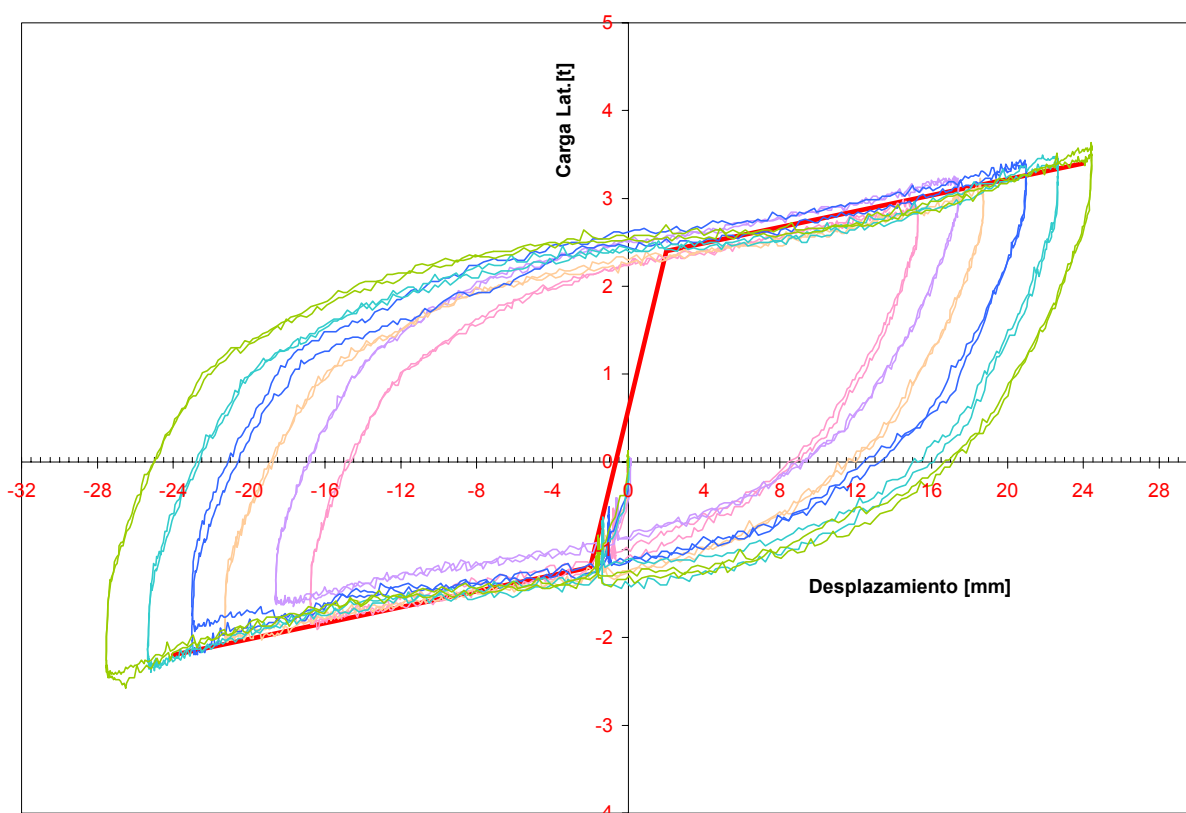


Figura 5.

5.-REHABILITACIÓN O CONSOLIDACIÓN DE ESTRUCTURAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SISTEMAS PASIVOS DE PROTECCIÓN.

En este apartado se explora la posibilidad de aplicación del sistema de protección a estructuras de la zona sísmica argentina que hayan sido diseñadas con las normas argentinas Concar 70 y NAA 80 . Para esto se ha utilizado como caso de estudio una estructura aporticada de seis niveles con columnas de 0.50x0.50 m y vigas de 0.30 x 0.50 m (Figura 6). Se ha considerado una aceleración de fluencia de 0.13g para las primeras rótulas. Esta aceleración se puede determinar partir de los coeficientes sísmicos prescritos en esas normas y las tensiones que se consideraban admisibles para cargas sísmicas en el caso de la Concar 70.

Como objetivo de rehabilitación o mejora de la capacidad sísmica de la estructura se ha supuesto que, para el espectro de la Norma Inpres – Cirsoc 103 de la zona 4 y con un suelo

tipo II, se debe cumplir el objetivo de “seguridad de vida” [Fema 356, 2000]. El periodo fundamental, que se obtiene del análisis modal considerando una carga de 0.7 t/m², secciones agrietadas y un área de influencia con un ancho de 5 m, es de 1.2 seg..

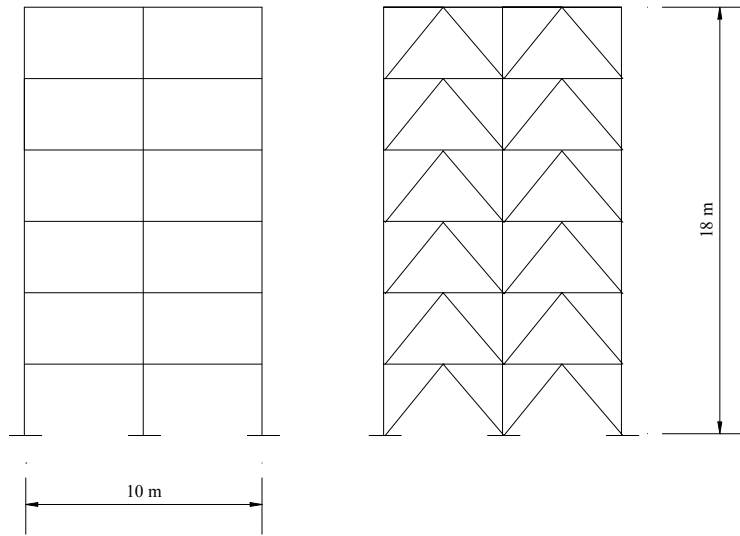


Figura 6.

Para estudiar el desempeño de la estructura con y sin el sistema de protección sísmica se utiliza el concepto de estructura substituta. Es decir que la estructura se considera como un vibrador elastoplástico de un grado de libertad con un patrón de desplazamientos igual al del primer modo de vibración. Las siguientes expresiones permiten calcular la masa y el desplazamiento equivalentes de la estructura en función de las amplitudes del primer modo de vibración.

$$M_{eq} = \frac{(\sum m_i \phi_i)^2}{\sum m_i \phi_i^2} : \text{masa equivalente}$$

$$h_N = \frac{\sum m_i h_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i} : \text{altura equivalente}$$

$$\Delta_{ueq} = \frac{h_N}{H} \Delta_u : \text{desplazamiento equivalente}$$

$$k = \frac{4\pi^2 M_{eq}}{T_0^2} : \text{rigidez inicial}$$

m_i : masa de cada piso.

ϕ_i : amplitud del modo para el piso.

H : altura total.

T_0 : periodo del primer modo.

En el caso aproximado de una distribución lineal para el primer modo de vibración se tiene:

$$\Delta_{ueq} \approx 0.72 \Delta_u$$

De forma simplificada se considera que un desplazamiento del orden del 1% de la altura asegura la condición de “Ocupación inmediata” y del orden del 2% la condición de “Seguridad de vida” [Fema 356, 2000] .

El desplazamiento equivalente de fluencia para las hipótesis adoptadas es el siguiente:

$$\Delta_{yeq} = \frac{M_{eq} \cdot a_y}{k} = 0.05m$$

a_y : aceleración de fluencia = 0.13 g

En primer lugar se analiza la estructura sin la aplicación del sistema de disipación con el objetivo de estimar su desempeño para una demanda consistente con el espectro de la Norma Inpres Cirsoc-103. Se utiliza el Método del Espectro de Capacidad (Capacity Spectrum Method). En la Figura 7 se trazan los espectros de pseudoaceleraciones de la Norma IC-103 en función del desplazamiento del vibrador, en lugar del período, para diferentes amortiguamientos. En esta Figura se ha supuesto que la variación de la ordenada espectral en función del amortiguamiento sigue la expresión (2) utilizada por el Eurocode 8 y también se ha seguido la recomendación de desplazamiento constante para periodos mayores de 3 segundos. Se debe tener en cuenta que por la forma de especificación del espectro de diseño IC-103 el desplazamiento resultante crece indefinidamente con el periodo y es por eso que se adopta el criterio del Eurocode 8.

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \quad (2)$$

η : factor sobre la ordenada espectral del 5% de amortiguación.

ξ : cantidad de amortiguamiento.

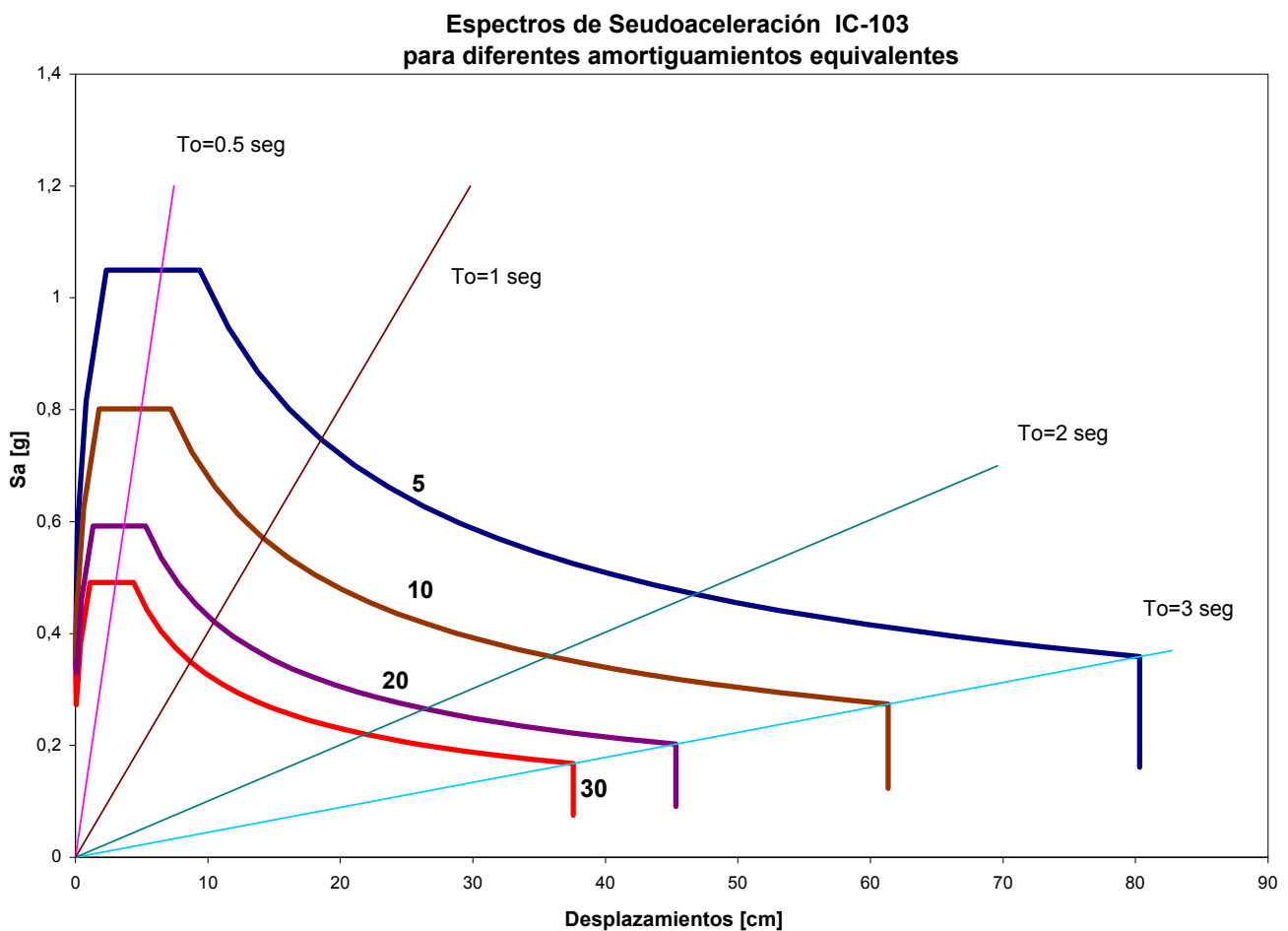


Figura 7.

En la Figura 8 se representa a la estructura como un vibrador elastoplástico con un nivel de aceleración de fluencia de 0.13 g y un período propio de 1.2 seg, es decir sin el sistema de protección. El amortiguamiento equivalente se estima con la siguiente expresión que corresponde al modelo de Takeda.

$$\xi_h = \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1-\alpha}{\mu} - \alpha \right) \quad (3)$$

α : tasa de endurecimiento de la estructura.
 μ : ductilidad demandada.

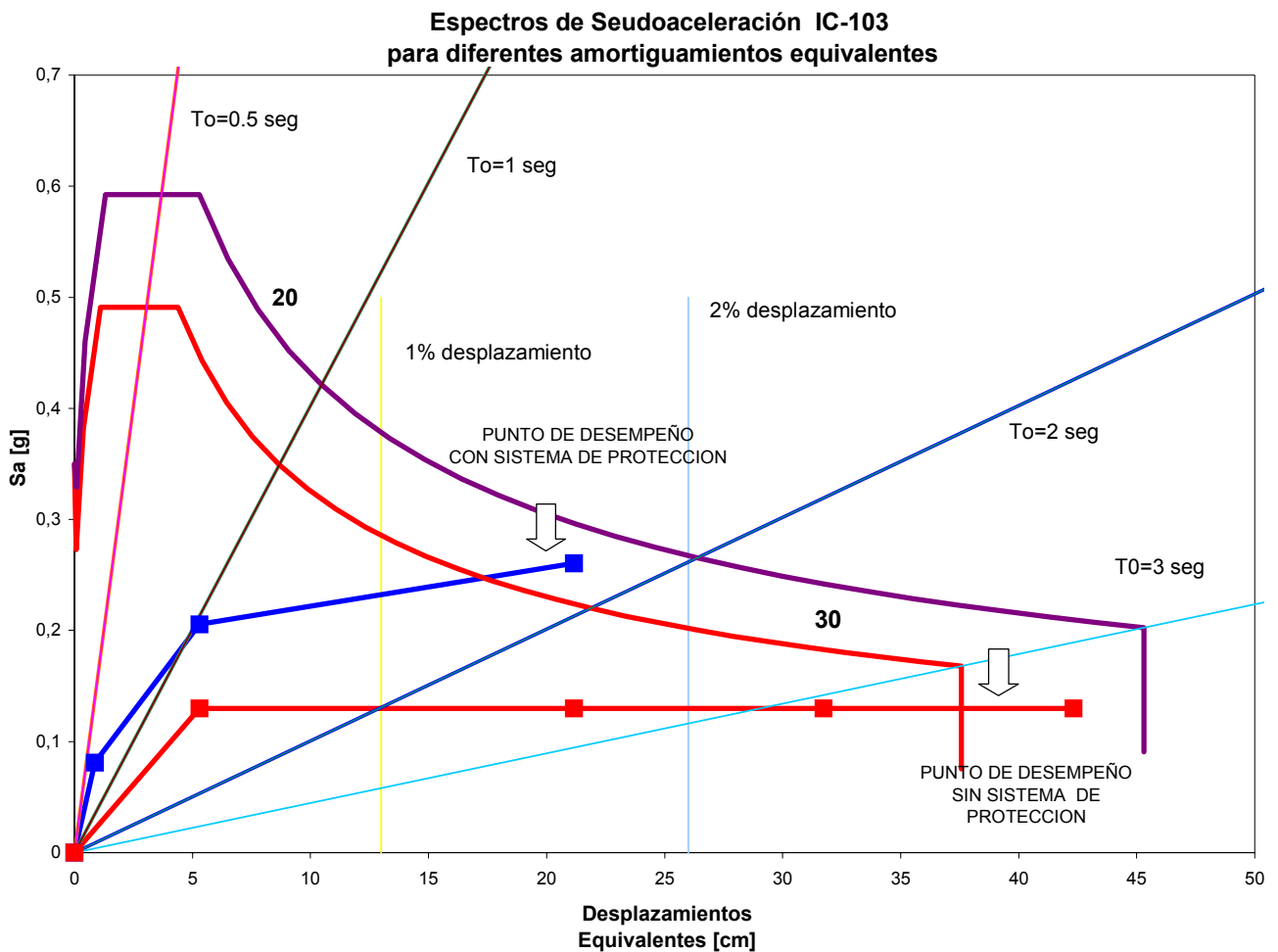


Figura 8.

En los espectros de la Figura 8 se obtiene el punto que representa el desempeño de la estructura en forma iterativa. Se calcula para una demanda de ductilidad determinada el valor del amortiguamiento equivalente con la expresión (3), luego en el espectro correspondiente a ese amortiguamiento se obtiene el desplazamiento máximo y así se verifica la ductilidad utilizada. En la Tabla 1 se han calculado en función de la demanda de ductilidad los desplazamientos máximos equivalentes, los desplazamientos máximos del techo y el amortiguamiento de la estructura. Como se observa en la Figura 9 el desplazamiento

demandado a la estructura supera ampliamente el 2% que se ha considerado como objetivo de “seguridad de vida”.

Tabla 1: Desplazamientos y amortiguamientos en función de la ductilidad de la estructura.

μ	Δu_{eq} (m)	Δu_{techo} (m)	ξ_h	u_o (m)	ξ_D	ξ_{total}	μ_{adas}
2	0.11	0.15	0.16	0.025	0.039	0.20	12.5
4	0.21	0.29	0.24	0.035	0.026	0.27	17.5
6	0.32	0.44	0.26	0.053	0.023	0.28	26.5

μ : ductilidad de la estructura.

Δu_{eq} : desplazamiento máximo equivalente

Δu_{techo} : desplazamiento máximo en el techo.

ξ_h : amortiguamiento de la estructura.

u_o : Desplazamiento relativo entre disipador y estructura.

ξ_D : Amortiguamiento equivalente del sistema de protección.

ξ_{total} : Amortiguamiento equivalente total.

μ_{adas} : Ductilidad del sistema de protección.

Se analiza a continuación el efecto de aplicar a la estructura el sistema de protección sísmica. El amortiguador se considera aplicado mediante arriostramientos tipo K que se muestran en esquema en la Figura 6. El amortiguamiento equivalente se obtiene de la siguiente expresión:

$$\zeta_D = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_1^N F_y u_{oi} (1 - \alpha_i) (1 - \frac{1}{\mu_i})}{\sum_1^N F_i u_i} \quad (4)$$

ζ_D : amortiguamiento equivalente del sistema de protección.

F_y : Carga de fluencia del disipador.

u_{oi} : Desplazamiento relativo entre disipador y estructura.

F_i : Fuerza del piso.

u_i : desplazamiento del piso.

N : número de pisos.

μ_i : ductilidad del sistema de disipación.

α_i : tasa de endurecimiento del sistema de disipación.

Se puede demostrar que

$$\sum_1^N F_i \cdot u_i = \Delta_{ueq} \cdot a_y \cdot Meq$$

a_y : aceleración de fluencia

En la Tabla 1 se presentan los amortiguamientos calculados para cada ductilidad con la expresión (4), el amortiguamiento total y la ductilidad para el sistema de disipación. De la misma forma que para la estructura sin el sistema de disipación puede obtenerse el punto de desempeño utilizando los espectros de la Figura 8. El desplazamiento de fluencia del

amortiguador se ha considerado de 0.2 cm y su resistencia de fluencia 1.7 t. Por lo tanto la aceleración de fluencia del conjunto sería aproximadamente:

$$a_y \approx 0.13g + \frac{(1.7 \times 6)[1 + (\mu - 1) \cdot \alpha]}{Meq \cdot g} g = [0.13 + 0.06 + 0.06(\mu - 1) \cdot \alpha] g$$

$$\alpha = 0.05$$

En la Figura 9 se observa que el desplazamiento último estimado por este procedimiento es del orden del desplazamiento considerado como objetivo “seguridad de vida”. Con la aplicación del sistema de protección se ha aumentado la aceleración de fluencia de la estructura y el amortiguamiento equivalente y se ha conseguido disminuir la demanda de desplazamiento.

6.- CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.

Se ha comprobado que es posible construir y ensayar amortiguadores de fluencia de metales para ser aplicados a estructuras de edificios en la zona sísmica argentina.

El amortiguador que se ha ensayado es de diseño flexible en el sentido que puede controlarse su resistencia y desplazamiento de fluencia para adecuarlo a cada caso. Las expresiones teóricas de desplazamiento y carga de fluencia representan adecuadamente el comportamiento observado.

En el diseño de una aplicación para la rehabilitación de edificios es útil el denominado Espectro de Capacidad. Este permite comparar las características de la estructura original con la rehabilitada y estimar, mediante el método simplificado de la estructura substituta, el desempeño para una acción definida por un espectro de pseudoaceleraciones.

Las aplicaciones prácticas deberían incluir el diseño detallado del amortiguador, del sistema de arriostamiento y de los anclajes de este a la estructura principal, usando los conceptos de diseño por capacidad. Además se considera necesario el ensayo de los amortiguadores que se construyan en un rango del orden del doble del desplazamiento esperado para la estructura. Estos ensayos deben comprobar las características mecánicas adoptadas en el diseño y la integridad del amortiguador.

REFERENCIAS:

Aiken I.D., Nims D.K., Whittaker A. S., Kelly J.M.. Testing of Passive Energy Dissipation Systems. *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, August (1993).

Federal Emergency Agency. Fema 356: Prestandard and commentary for seismic rehabilitation of buildings. November 2000.

Y. Y. Lin, M. H. Tsai, J. S. Hwang and K. C. Chang. Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems, *Engineering Structures*, Volume 25, Issue 1, January 2003, Pages 25-37

Tehranizadeh M.. Passive energy dissipation device for typical steel frame building in Iran. *Engineering Structures*. Volume 26, Issue 6, June 2001, Pages 643-655