



**DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**COMPORTAMIENTO SISMICO DE LOS AMORTIGUADORES ADAS
Y COMPARACION CON UN SISTEMA CONTRAVENTEADO**

RODOLFO ERNESTO VALLES MATTOX

T R A B A J O

**PRESENTADO A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA**

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(ESTRUCTURAS)**

CIUDAD UNIVERSITARIA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y ENSEÑANZA

DE INGENIERIA



COMITÉ DE INVESTIGACIONES Y ENSEÑANZA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

DR. ERNESTO VALDES MATEOS



DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

PRESENTE A LA COMISION DE INVESTIGACIONES Y ENSEÑANZA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

VALAJ



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

INDICE

G(2)- 502256

INDICE

I.-	INTRODUCCION.....	1
II.-	DISPARADORES DE ENERGIA ADAS	
II.1	Los disipadores "ADAS".....	7
II.2	Propiedades mecánicas de una placa "X" ideal	9
II.3	Criterios de diseño.....	18
III.-	COMPARACION DE RESULTADOS EN UN MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD	
III.1	Rigidez de un contraventeo tradicional y un contraventeo con amortiguadores.....	23
III.2	Comparación en elementos mecánicos y desplazamientos.....	29
III.3	Comparación de comportamientos dinámicos.....	38
III.4	Influencia de la relación de rigideces del contraventeo y de la estructura original en la respuesta del sistema con disipadores.....	49
III.5	Influencia de la ductilidad en el sistema con disipadores.....	62
III.6	Rango de mayor eficiencia de los amortiguadores "ADAS".....	68

IV.- COMPARACION DE RESULTADOS EN UN MODELO DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD	
IV.1 Modelo de 16 niveles.....	74
IV.2 Datos del análisis para diseñar el refuerzo.....	79
IV.3 Refuerzo con amortiguadores.....	84
IV.4 Refuerzo con contraventeo tradicional.....	92
IV.5 Comparación de respuestas.....	93
IV.6 Costo de reparaciones.....	98
V.- COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.....	110
BIBLIOGRAFIA.....	115

CAPITULO I

INTRODUCCION

El gran desarrollo tecnológico ha permitido a la humanidad estudiar y comprender mejor los fenómenos de la naturaleza. Sin duda alguna, el estudio de los movimientos telúricos, su origen, su propagación y su efecto sobre las estructuras, se ha visto beneficiado grandemente por este desarrollo.

Por otra parte, la tendencia actual de hacer edificios cada vez más altos, de secciones más esbeltas y óptimos, obliga a que el análisis de las estructuras, ante solicitaciones sísmicas, sea más refinado y realista. Tratando de satisfacer esta necesidad, los reglamentos de construcción han evolucionado conforme la ingeniería sísmica se ha desarrollado.

Un problema serio se ha presentado en estructuras, diseñadas utilizando solicitaciones indicadas en reglamentos antiguos, las cuales se han tenido que incrementar por ser muy bajas. Es claro que estas estructuras deben ser reforzadas para cumplir con las nuevas solicitaciones que marca el reglamento.

El criterio de diseño de estructuras sujetas a solicitaciones sísmicas usado comunmente consiste en proporcionarle suficiente resistencia para que sea capaz de soportar adecuadamente las

fuerzas que los sismos puedan inducirle, por muy grandes que éstas puedan llegar a ser.

Recientemente, un criterio de diseño activo se ha estudiado mucho y ha empezado a tener importancia. Este criterio busca reducir la fuerzas transmitidas por el sismo a las estructuras, mediante aislamiento de base o adición de amortiguamiento externo.

El aislamiento de base busca filtrar las ondas sísmicas que se transmiten del suelo a la estructura, esto lo logra alargando el periodo fundamental de vibración de la estructura y amortiguando el movimiento. Este tipo de dispositivos han probado ser muy eficientes en suelos donde los sismos tienen una frecuencia dominante de oscilación alta y en estructuras de bajo periodo natural. Sin embargo, este tipo de dispositivos no pueden ser usados en zonas donde el periodo dominante del suelo y de la estructura son largos, como el caso de la zona del lago en la Ciudad de México.

Las formas principales de adición de amortiguamiento a las estructuras, han sido mediante sistemas amortiguadores hidrodinámicos, materiales viscoelásticos, y amortiguadores histeréticos. Los sistemas con amortiguamiento hidrodinámico, reducen la

respuesta dinámica de una estructura, añadiendo en su parte superior un sistema de un grado de libertad, con características determinadas de masa, rigidez y amortiguamiento. Este, al interactuar con la estructura, amortigua su respuesta durante un sismo.

Los amortiguadores de materiales viscoelásticos pueden desarrollar una fuerza cortante alta, proporcional a la velocidad y al desplazamiento, para disipar la energía. Aunque este tipo de dispositivos se ha usado con mucho éxito para reducir vibraciones originadas por el viento, se ha probado que durante un sismo intenso, las características del material pueden degradarse.

Finalmente, los amortiguadores histeréticos basan su disipación de energía mediante un comportamiento no lineal, en puntos bien localizados de una estructura. De este tipo, se ha desarrollado un dispositivo que trabaja por fricción y otros mas que trabajan por fluencia de acero.

Recientemente, en la Ciudad de México se han efectuado análisis para reforzar varios edificios dañados por el sismo de 1985, mediante la adición de unos amortiguadores histeréticos patentados que disipan energía por la fluencia de placas de acero. De éstos, la reparación de uno de ellos se ha iniciado ya, esperando

que los trabajos estén terminados para principios de 1991. En esta tesina se estudiarán los dispositivos A.D.A.S. (Added Damping And Stiffness elements), usados en el reforzamiento de estas estructuras.

En principio, la idea de reforzar a una estructura agregando amortiguamiento, resulta ideal. Sin embargo por tratarse, en este caso, de dispositivos de patente extranjera, las ventajas económicas que pueden existir sobre un reforzamiento a base de un contraventeo tradicional no son tan claras. El objetivo de esta tesina es hacer un estudio de los parámetros y características de los amortiguadores, hacer una comparación de respuestas con un contraventeo tradicional y dar algunos parámetros económicos para determinar las bondades de uno respecto al otro.

En el segundo capítulo de este trabajo se presenta una descripción de los disipadores ADAS, la forma en que trabajan y sus propiedades mecánicas más importantes. En el capítulo III se hacen comparaciones de la respuesta para un modelo de un grado de libertad, con los dos tipos de reforzamiento propuesto. Se describe el efecto que tienen los parámetros de un amortiguador en el comportamiento de la estructura y con base en los resultados del modelo de un grado de libertad, se busca establecer los límites en los que un reforzamiento con estos

dispositivos puede ser más económico en un edificio real.

El capítulo IV presenta una estructura ideal de 16 niveles reforzada con ambos sistemas, para el caso en que los amortiguadores presentan un comportamiento mas adecuado. Se presenta una comparación de respuestas de ambos sistemas y se da un orden de precios, necesario en cada uno de ellos, para llevar a cabo la reparación. Se pretende encontrar, en las condiciones mas desfavorables, cuánto más económico puede resultar un reforzamiento con disipadores.

En el capítulo V se dan algunos comentarios y conclusiones de los estudios realizados y se resumen los parámetros más importantes del sistema amortiguador usado. En este capítulo se hacen también algunos comentarios de los trabajos realizados para la reparación con amortiguadores de algunos edificios en la Ciudad de México.

CAPITULO II

DISIPADORES DE ENERGIA ADAS

II.1 LOS DISIPADORES ADAS.

Los disipadores de energía ADAS son unos dispositivos recientemente presentados por CounterQuake Corporation (CQC) y Bechtel Power corporation (BPC) para reducir las sollicitaciones sísmicas en las estructuras. Estos, en un principio se diseñaron para soportar tuberías en plantas nucleares, pero después de una gran cantidad de pruebas y estudios, se ha determinado que su aplicación en edificios nuevos y existentes es también benéfica.

Para verificar el comportamiento de los disipadores, se han realizado ensayos de los propios dispositivos y, además, se han probado modelos a escala de estructuras de 2 y 3 niveles en las mesas vibratorias de las universidades de Michigan y Berkeley, respectivamente.

Los elementos amortiguadores, auxiliados de un sistema de contraventeo, conectan dos niveles consecutivos de una estructura (fig. II.1) y trabajan cuando ocurre un desplazamiento relativo entre ambos niveles.

Los ADAS disipan energía mediante comportamiento inelástico

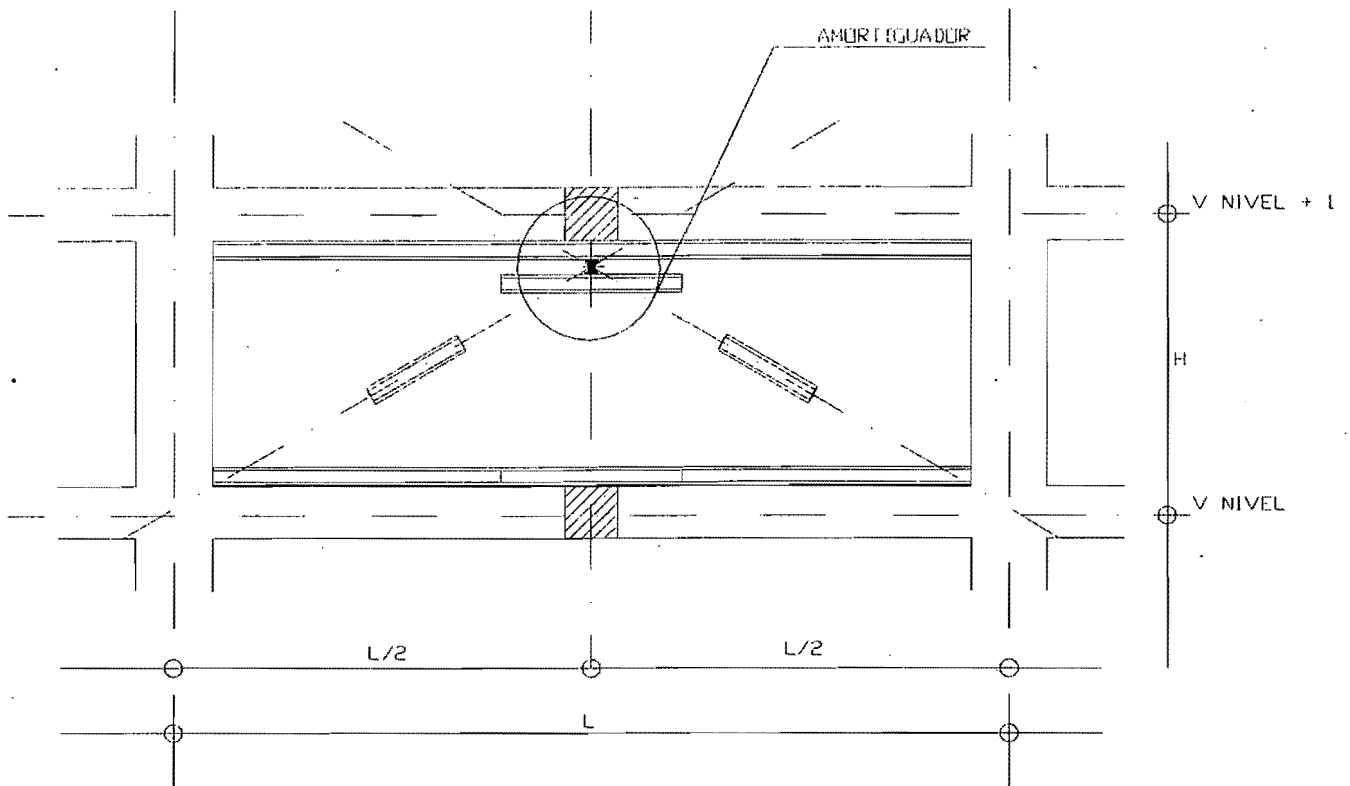


Fig. II.1a Contraventeo para soportar un amortiguador.

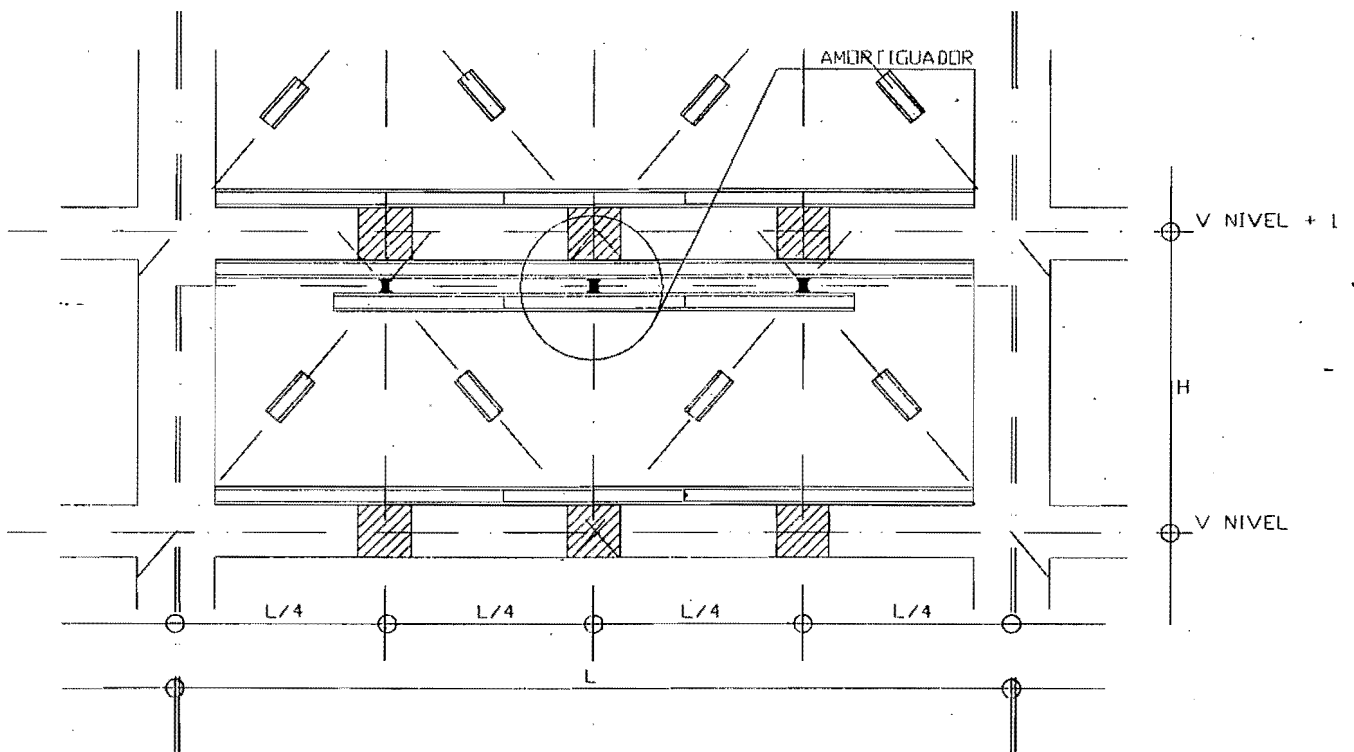


Fig. II.1b Contraventeo para soportar 2 ó 3 amortiguadores.

de placas de acero en forma de "X" que se flexionan en doble curvatura alrededor de su eje menor por el desplazamiento relativo del extremo superior respecto al inferior (ver figuras II.2 a II.4). La forma de las placas sigue el diagrama de momentos buscando que la placa alcance la fluencia en toda su altura al mismo tiempo, evitando así que la fluencia se localice sólo en algunos puntos.

La forma precisa de una "X", es imposible de lograr, por lo que en su parte central el angostamiento se ha redondeado. Ya que la placa transmitirá también una fuerza cortante, existe un valor mínimo del angostamiento para que esta fuerza se pueda transmitir de manera segura.

Las placas con forma de "X" se separan por unas placas de menor espesor y tamaño para que sea posible que las primeras se flexionen en doble curvatura. Un par de tornillos atraviesan a las placas en los extremos superior e inferior, manteniéndolas en su posición entre 2 bloques de acero, de los cuales es posible conectar el dispositivo a la estructura.

II.2 PROPIEDADES MECANICAS DE UNA PLACA "X" IDEAL

Considerando que las placas tienen exactamente la forma "X", el momento en los extremos de la sección al fluir el acero es:

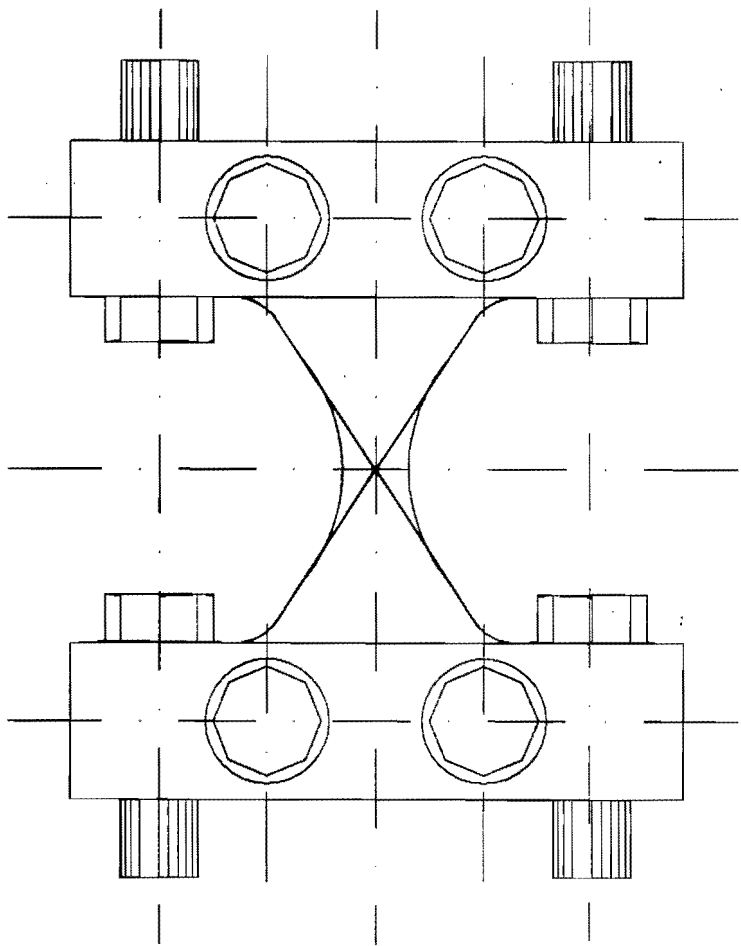


Fig. II.2 Vista frontal del amortiguador.

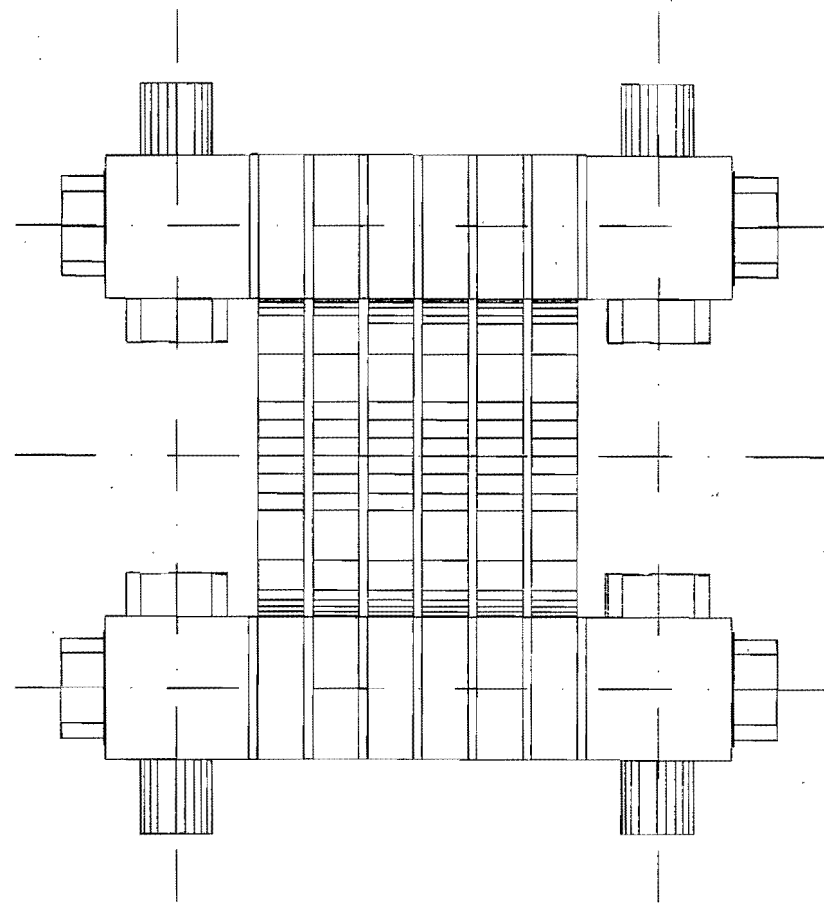


Fig. II.3 Vista lateral del amortiguador.

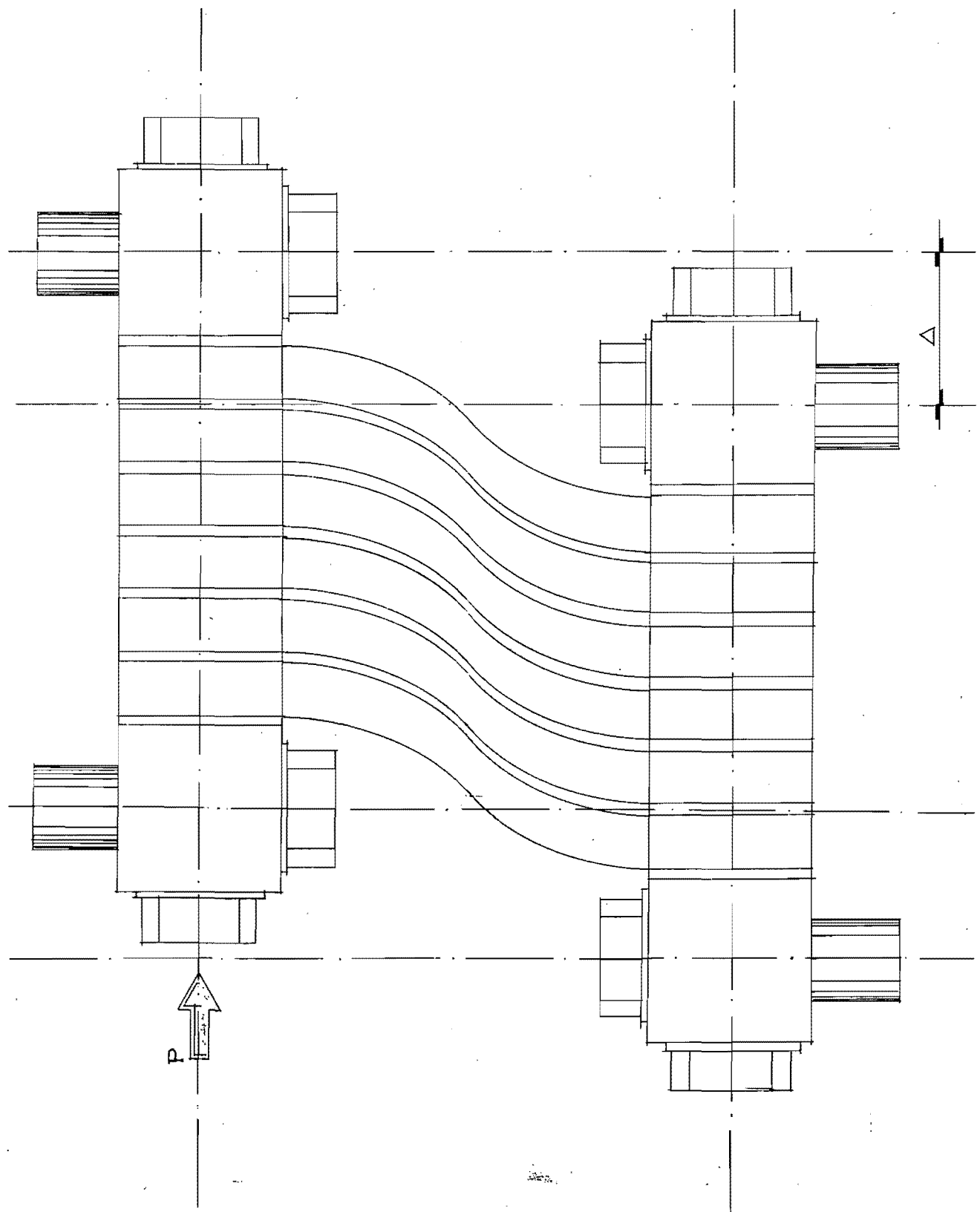


Fig. II.4 Vista lateral mostrando la deformación del amortiguador.

$$M_y = \sigma_y * I * 2 / t = \sigma_y * S_y$$

como sabemos que la flexión de las placas es fuera de su plano, y su módulo de sección es:

$$S_y = a * t^2 / 6$$

donde : a : ancho máximo de la placa, igual a la mitad del peralte.

t : espesor de la placa.

el momento en los extremos será entonces:

$$M_y = \sigma_y * a * t^2 / 6$$

y la fuerza lateral en el dispositivo que origina estos momentos es:

$$P_y = 2 * M_y / (2 * a) = \sigma_y * t^2 / 6 \quad \dots (1)$$

Esta fórmula nos indica la fuerza teórica que hay que aplicar a una placa de forma "X" para lograr que el acero empiece a fluir. En caso que el amortiguador este formado por "n" placas la ec. (1) se transforma en:

$$P_y = \sigma_y * t^2 * n / 6 \quad \dots (2)$$

Para que el material en el dispositivo trabaje en el rango inelástico es claro que se le aplicará una fuerza máxima superior a P_y , la cual es importante conocer. Esta fuerza se presentará cuando toda la sección se plastifique, es decir, cuando el módulo de sección sea el plástico. Siguiendo un desarrollo similar al presentado para P_y :

$$P_p = \sigma_y * t^2 * n / 4 \quad \dots (3)$$

Otro de los parámetros que caracterizan a un amortiguador es el desplazamiento (δy) que se tiene cuando se presenta la carga de fluencia. Debido a que a lo largo de toda la placa sus fibras extremas tienen una deformación ϵ_y , la curvatura será:

$$\varphi_y = \epsilon_y * 2 / t$$

Integrando una vez la ecuación anterior respecto a la altura, obtenemos el giro de la sección, considerando el origen al centro de la placa y trabajando sólo con la mitad de la placa:

$$\theta = 2 * \epsilon_y * (x - a) / t$$

que considera ya que las placas no giran en sus extremos. Integrando nuevamente respecto a la altura, obtenemos el desplazamiento de la sección:

$$\delta y / 2 = 2 * \epsilon_y * (x^2 / 2 - xa) / t$$

Y valuando la integral desde cero hasta "a" obtenemos:

$$\delta y / 2 = 2 * \epsilon_y * (a^2 / 2 - a^2) / t = \epsilon_y * a^2 / t$$

$$\delta y = 2 * \epsilon_y * a^2 / t \quad \dots (4)$$

Expresión que nos permite conocer el desplazamiento en el cual se presenta la fuerza de fluencia. Notese que el valor de δy no cambia con el número de placas que tenga el amortiguador.

Resumiendo, una vez definido el tipo de acero con el que se fabricarán los ADAS, la carga de fluencia en un amortiguador

depende únicamente del número de placas y el espesor de las mismas, mientras que δy depende solamente del espesor y el ancho máximo de las placas (a).

El diseño de un amortiguador consiste principalmente en determinar los valores mas adecuados de P_y y δy para una estructura. Es importante tener en mente que existe una gran cantidad de combinaciones de a, t y n que pueden satisfacer los valores óptimos, aunque el diseño debe tender a estandarizar espesores y tamaños de placas.

En la figura II.5 se muestra el comportamiento de una placa de forma "X" perfecta, en una gráfica de fuerza lateral contra deformación, para dos espesores y tres dimensiones de placas. En la Universidad de Michigan, con la ayuda de una gran cantidad de pruebas, se ha determinado que un modelo Ramberg-Osgood (de tres parámetros) puede representar fielmente el comportamiento histérico de los ADAS. Además se determinó que los amortiguadores permiten ductilidades de hasta 14 sin degradación en su ciclo de histéresis, sin embargo no recomiendan que se exceda de 6 para diseño. En los diseños se ha permitido una ductilidad máxima de 5.

Para simplificar el análisis y el diseño, se ha optado por

GRAFICA P-D TEORICA PARA UNA PLACA "X" PERFECTA

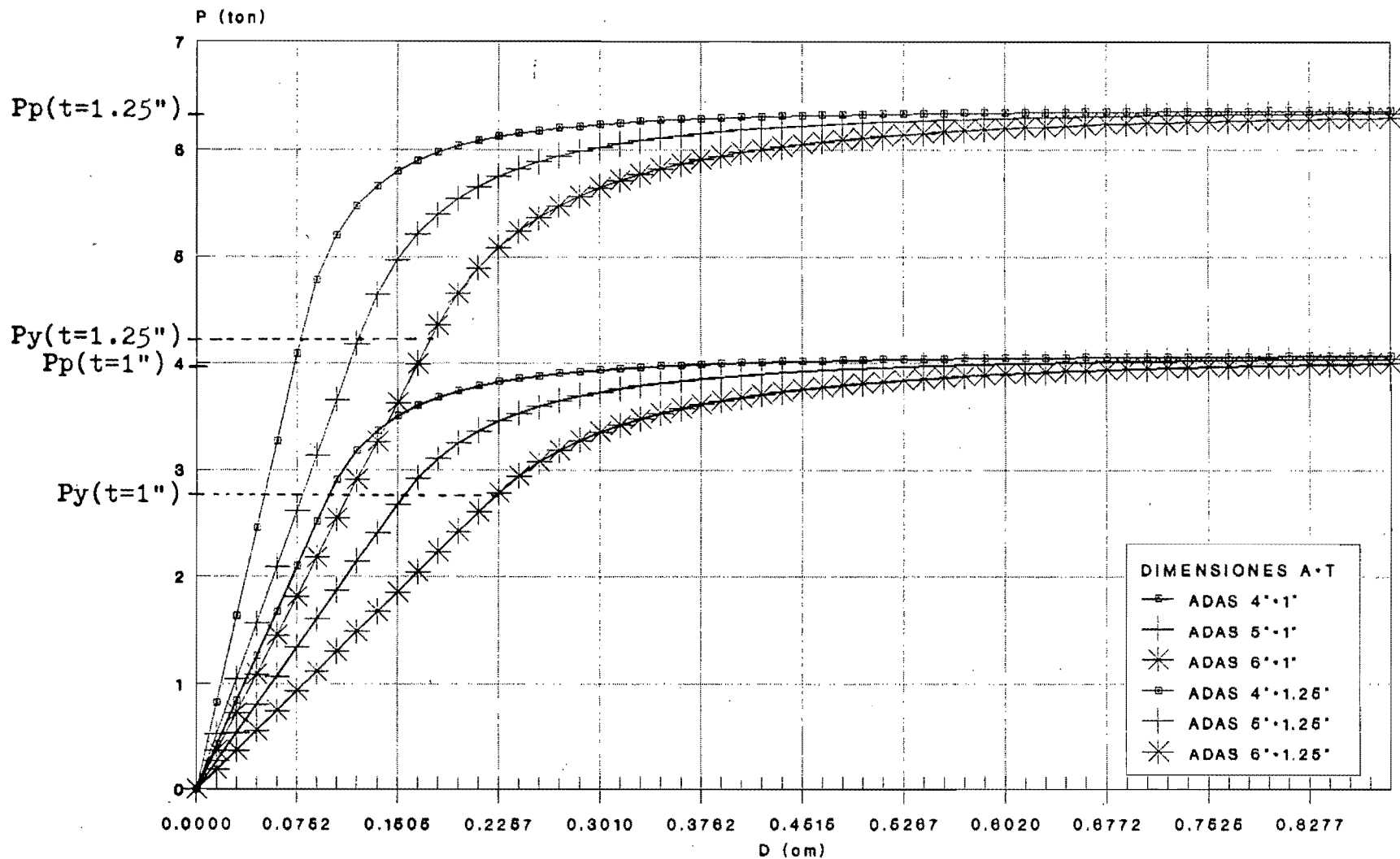


Figura II.5

modelar su comportamiento como un material bilineal (ver fig. II.6), es decir, con una rigidez inicial, una fuerza de fluencia y una rigidez después de la fluencia. Donde K_{ad} , la rigidez inicial es:

$$K_{ad} = P_y / \delta y \quad \dots (5)$$

La fuerza de fluencia es P_y y la segunda rigidez se toma como el 5% de la inicial.

Es muy importante recalcar que las formulas 1 a 4 son para una placa "X" perfecta, y que no deben usarse para diseñar. Todas las fórmulas anteriores tienen factores de corrección, debidos principalmente a que la geometría no es la teórica, y además para lograr que la suposición de comportamiento bilineal sea adecuada.

Es posible obtener una rigidez secante para representar el cambio de la rigidez conforme la carga aumenta. A esta rigidez le llamaremos efectiva (K_{eff}) y la definiremos como:

$$K_{eff} = P_i / \delta y \quad \dots (6)$$

Se puede ver que mientras la carga sea menor a la de fluencia K_{eff} será igual a la rigidez inicial, sin embargo, una vez sobrepasado este límite, K_{eff} tendrá una variación definida por:

$$K_{eff} = (0.95 + 0.05*\mu) * K_{ad} / \mu \quad \dots (7)$$

Donde :

$$\mu = \delta / \delta y$$

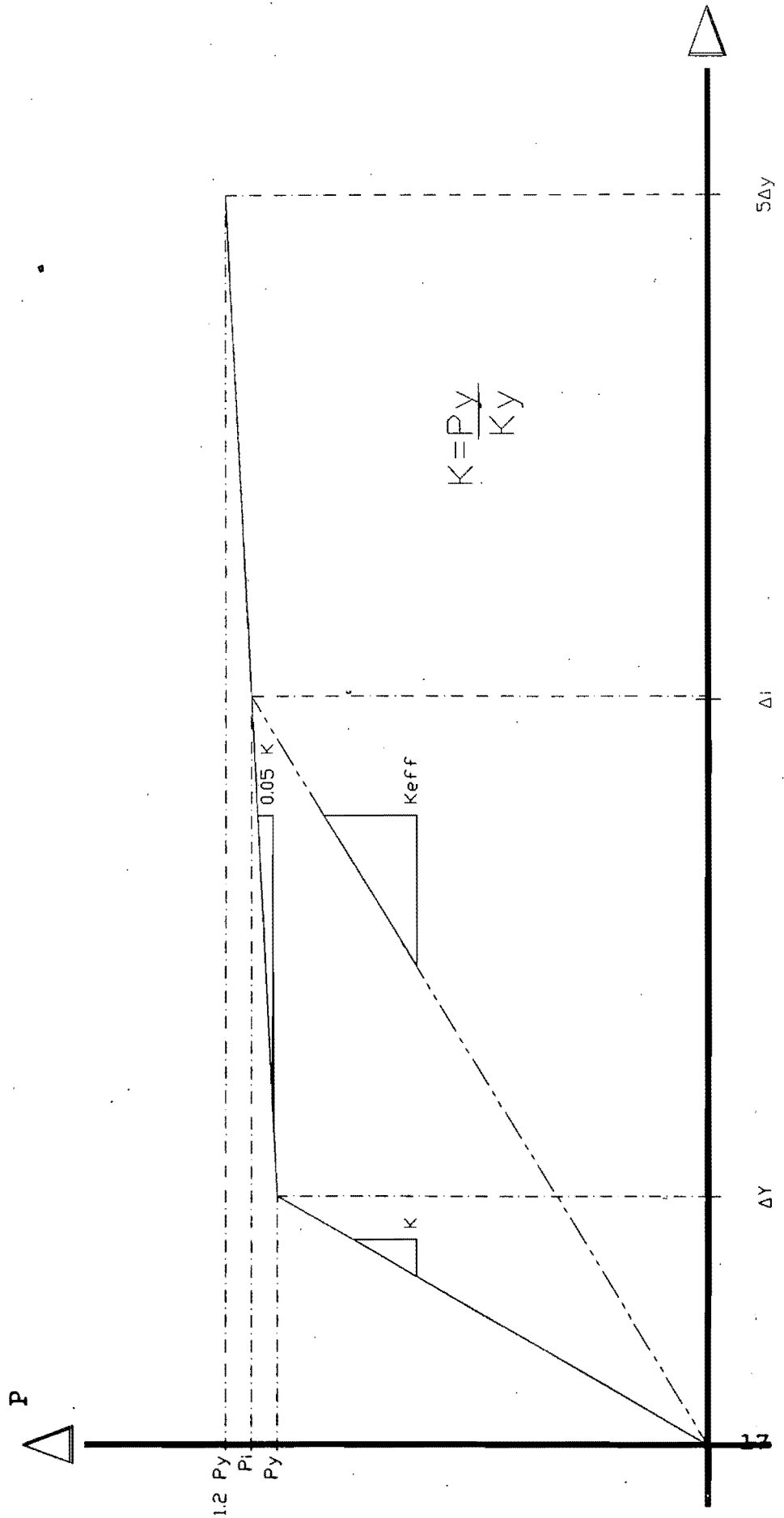


Fig. II.6 Comportamiento idealizado del amortiguador ADAS.

En la figura II.7 se muestra esta variación respecto a la ductilidad desarrollada. Considerando que para diseño se aceptará una ductilidad máxima de 5, la rigidez del amortiguador variará del 100% al 24% de su rigidez inicial.

II.3 CRITERIOS DE DISEÑO

Se han propuesto los siguientes criterios para guiar el diseño de los amortiguadores:

1.- Los dispositivos ADAS tomarán al menos el 50% del cortante del entrepiso. Entre mayor sea este porcentaje, mayor será la fuerza que podrá ser disipada y más eficientemente se podrán controlar los efectos sísmicos. Para edificios dañados, se buscará que este porcentaje sea lo más grande económicamente factible.

Para lograr que los ADAS tomen al menos la mitad de la fuerza cortante, estos y sus contraventeos deben aumentar la rigidez lateral de la estructura al doble, y en consecuencia el periodo se reduce al menos a 71% del periodo original.

El porcentaje del cortante que tomarán los ADAS depende en gran medida del número de crujías en la estructura que puedan ser contraventeadas. Entre mayor sea este número, será más económico

VARIACION DE LA RIGIDEZ CON LA DUCTILIDAD DEL ADAS

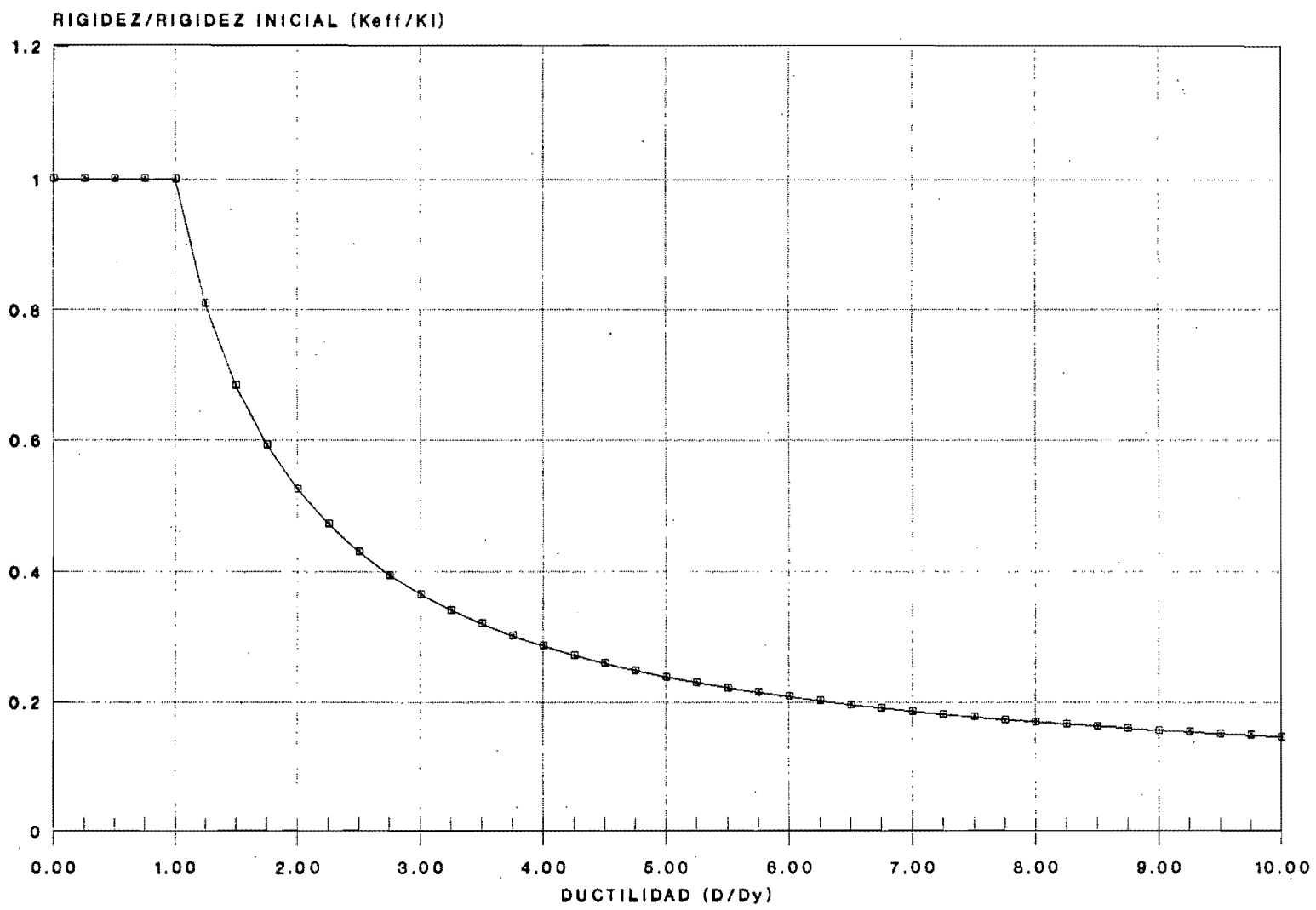


Figura II.7

aumentar la rigidez del edificio.

2.- La ductilidad máxima que se les permitirá a los disipadores será de 5. Aunque, como se mencionó antes, los dispositivos tienen ciclos estables hasta una ductilidad de 14. Entre más cercano a 5 sea la ductilidad desarrollada, más eficiente será el trabajo del amortiguador, ya que el área de la curva de histéresis y la energía disipada serán mayores. Entre mas pequeño sea su trabajo inelástico su comportamiento tenderá a parecerse al de un contraventeo tradicional. Como no es económico que haya un amortiguador distinto en cada nivel, estos tienden a estandarizarse, lo que hace imposible que todos ellos puedan desarrollar exactamente 5 de ductilidad.

3.- La ductilidad en los demás miembros de la estructura debe ser menor de 1.75 en trabes y 1.50 en columnas. Se acepta que la estructura incurriere un poco en el rango inelástico, no despreciando de esta forma la disipación de energía por comportamiento no lineal de la propia estructura. El diseño de estructuras comunes acepta que en sismos intensos, los elementos estructurales deban desarrollar ductilidades locales de 4 o superiores.

Al limitar la ductilidades a valores menores a los que un diseño tradicional acepta se logran tres objetivos fundamentales:

primero, se depende menos de la estructura, la que puede estar dañada si se trata de un reforzamiento. En segundo lugar, después del sismo de diseño la estructura con amortiguadores sobrevivirá con daños menores, mientras que la tradicional presentará daños considerables y tendrá que ser reparada. Finalmente, el factor de seguridad es mayor, ya que la capacidad extra no considerada se convierte en una reserva de resistencia para un sismo mayor al de diseño.

4.- El desplazamiento máximo relativo de entrepisos no será en ningún momento mayor al máximo permitido por el reglamento que sea aplicable. Si el diseño debe hacerse de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal se deberá vigilar que el desplazamiento relativo sea menor de 0.6% ó 1.2% de la altura, dependiendo de la estructura.

CAPITULO III

COMPARACION DE RESULTADOS EN UN MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD

III.1 RIGIDEZ DE UN CONTRAVENTEIO TRADICIONAL Y UN CONTRAVENTEIO CON AMORTIGUADORES

Proponiendo un modelo de un grado de libertad reforzado con diagonales y con ADAS como el de la figura III.1, en donde la rigidez de la estructura sin reforzar es K_o , y sometida a una fuerza lateral F tiene un desplazamiento $d = F/K_o$. Para reforzar la estructura, en los dos casos, el reforzamiento debe ir acompañado de una rigidización.

1.- Reforzamiento a base de un contraventeio tradicional.

Cuando se refuerza por medio de un contraventeio tradicional la rigidez de la estructura final será:

$$K_f = K_o + K_a$$

Donde K_a es la rigidez del sistema de contraventeio. Si es necesario que el sistema de contraventeio deba tener una rigidez α' veces la de la estructura original, la rigidez final se puede expresar también como:

$$K_f = (1 + \alpha') * K_o \quad \dots (7)$$

Donde:

$$\alpha' = K_a / K_o$$

2.- Reforzamiento con ADAS.

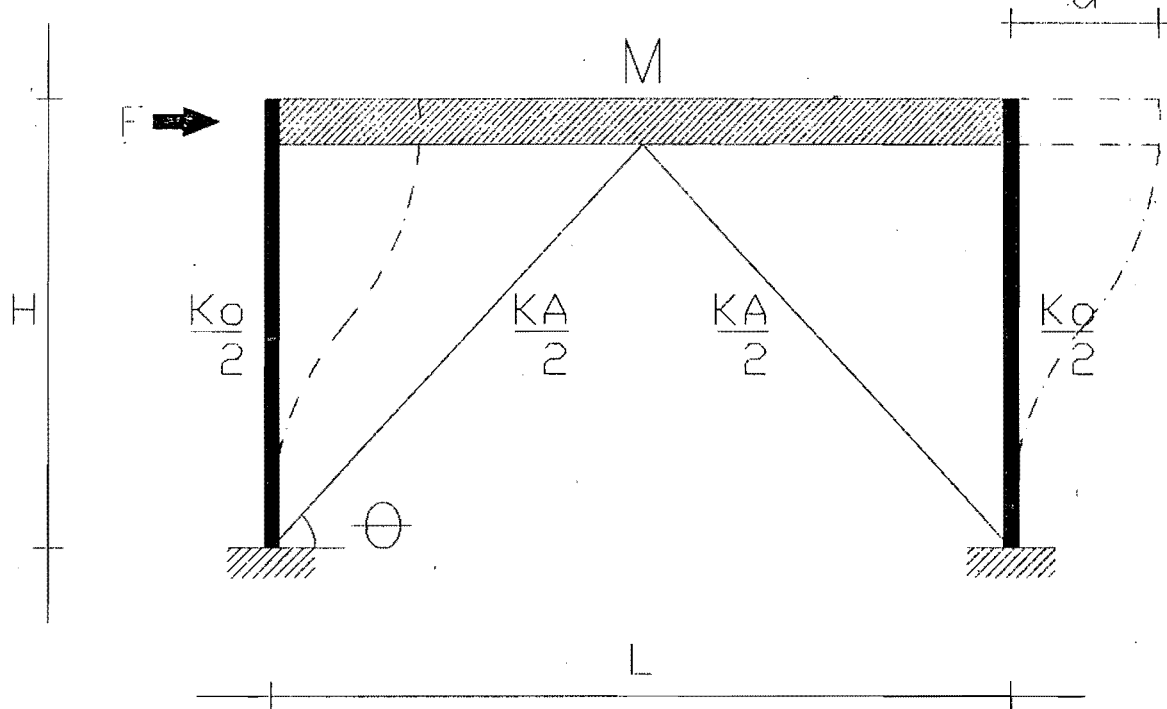


Fig. III.1a Sistema de un grado de libertad contraventeado.

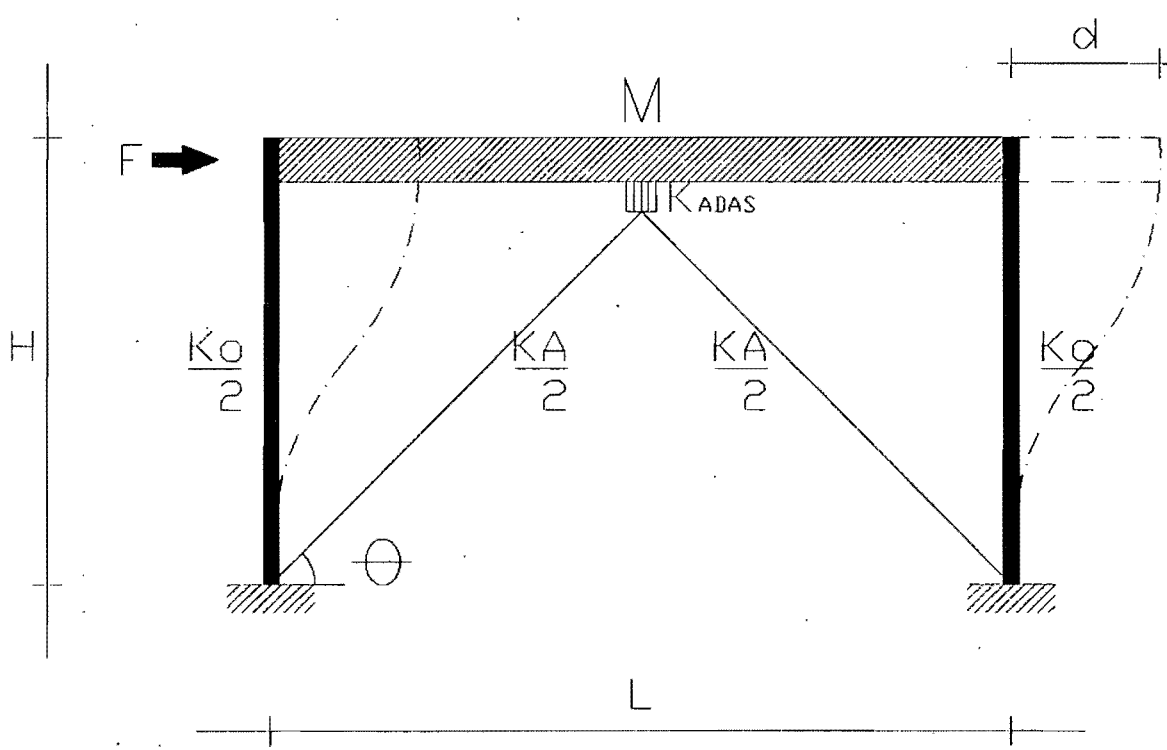


Fig. III.1b Sistema de un grado de libertad amortiguado.

En el caso en que además del contraviento se coloque en serie con un amortiguador de rigidez inicial K_{adas} , la rigidez del reforzamiento se puede obtener como una suma de flexibilidades:

$$1/K_{ref} = 1/K_a + 1/K_{adas}$$

$$K_{ref} = K_a * K_{adas} / (K_a + K_{adas}) \quad \dots (8)$$

Y la rigidez de la estructura final será:

$$K_f = K_o + K_a * K_{adas} / (K_a + K_{adas}) \quad \dots (9)$$

Introduciendo los siguientes factores de rigidez:

$$\alpha = (K_f - K_o) / K_o = K_f/K_o - 1$$

$$\beta = K_a / K_o$$

$$\tau = K_{adas} / K_o$$

Si deseamos que la rigidez del conjunto contraviento-ADAS sea α veces K_o :

$$\alpha * K_o = K_a * K_{adas} / (K_a + K_{adas})$$

$$\alpha = \beta * K_o * \tau * K_o / ((\beta * K_o + \tau * K_o) * K_o)$$

$$\alpha = \beta * \tau / (\beta + \tau) \quad \dots (10)$$

o expresando a τ en función de α y β :

$$\tau = \alpha / (1 - (\alpha / \beta)) \quad \dots (11)$$

que representan una serie de hipérbolas con asíntotas en $\beta=\alpha$ y $\tau=\alpha$. En la figura III.2 se muestran varias curvas correspondientes a distintos valores de α con β en el eje de las ordenadas y τ en el eje de las abscisas. Analizando las curvas se puede ver que para rigidizar $\alpha+1$ veces la estructura existen mas de una

VARIACION DE BETA Y GAMMA PARA UN DETERMINADO VALOR DE ALPHA

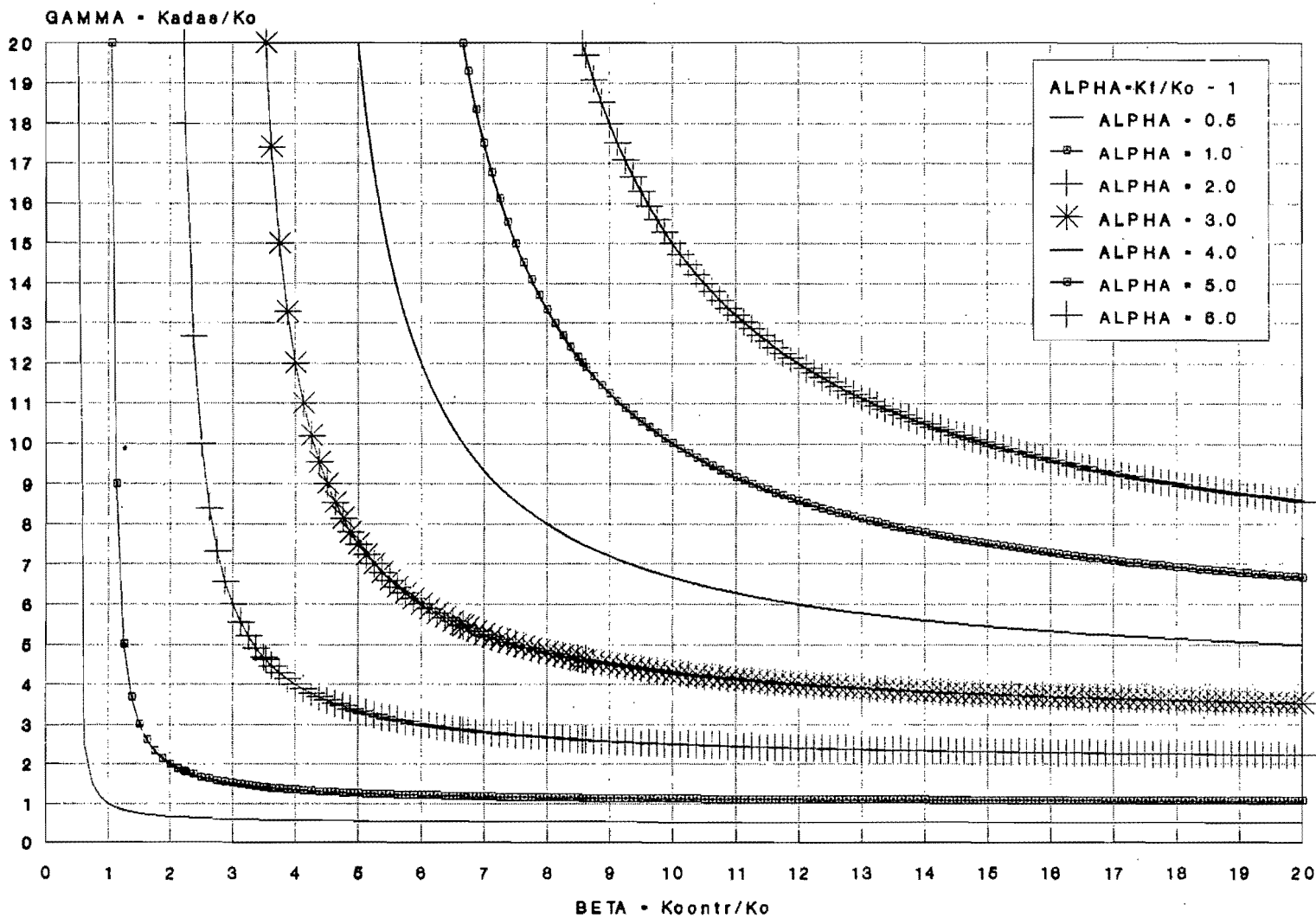


Figura III.2

combinación de β y τ . Existen, además, límites de la rigidez de los contravientos y el amortiguador a partir de los cuales la cantidad de material necesario resulta económicamente inadecuada.

3.- Comparación de ambas formas de rigidización.

Para el caso de un contraventeo tradicional si se desea aumentar la rigidez α' veces, bastará con que el contraventeo tenga una rigidez $\alpha' * K_0$. Pero si además se colocan amortiguadores para subir la rigidez en $\alpha+1$, las diagonales deberán tener una rigidez $\beta * K_0$, donde β es mayor a α , y puede llegar a ser mucho mayor dependiendo del valor de α y de τ .

Por ejemplo, si es necesario que la rigidez de un marco se incremente en 2 veces su valor original, con la opción de un contraventeo tradicional bastará con que las diagonales proporcionen una rigidez de $2 K_0$.

Pero si el contraventeo tiene ADAS, una posible solución es que el contraventeo y los amortiguadores tenga una rigidez de $4 K_0$, es decir el doble de peso de acero que en la opción anterior solamente en las diagonales. El hecho de que K_0 puede tener un valor grande complica la selección de amortiguadores, ya que el rango de valores de τ (K_{adas}/K_0) debe limitarse a valores que sean prácticos de alcanzar.

Resumiendo, para lograr la misma rigidez en ambos métodos, el peso de acero con amortiguamiento es mayor, aunque los esfuerzos en las diagonales son menores. Es decir que la opción con ADAS requiere de mayor cantidad de material no por resistencia, sino por rigidez. O, expresado de otra forma, con la misma cantidad de material en un contraventeo tradicional la rigidez se puede subir mas que cuando se adicionan amortiguadores.

A primera vista el hecho de que un reforzamiento con amortiguadores no aumente tanto la rigidez en la estructura como uno tradicional no es tan importante. Sin embargo no debe olvidarse que los criterios de diseño establecen que los ADAS deberán transmitir al menos el 50% del cortante del entrepiso y que el desplazamiento relativo debe ser menor al máximo permitido, lo cual está íntimamente relacionado con la rigidez del refuerzo.

Las ideas presentadas en los dos párrafos anteriores deben tenerse muy presentes antes de optar por alguna de las dos soluciones. Aunque con los dos sistemas se puede llevar a cabo la reparación, debe haber un rango en el cual la opción con amortiguadores requiere de menos material, cuando la respuesta es suficientemente baja para cumplir con desplazamientos sin necesidad de una rigidización mayor a la correspondiente para que el

sistema absorba el 50% del cortante.

Un factor que puede ser muy importante, para determinar la rigidez que debe tener una cruzía contraventeada, es la cantidad de cruzías en las cuales es posible contraventear. Si el número de cruzías es reducido, estas deberán ser muy rígidas para que tomen el cortante mínimo del entrepiso. En estas condiciones es muy probable que el amortiguamiento deba ser descartado como la solución más económica.

III.2 COMPARACION EN ELEMENTOS MECANICOS Y DESPLAZAMIENTOS

Consideremos nuevamente un modelo de un grado de libertad reforzado con ambas soluciones como el de la figura III.1, con una fuerza lateral F que, por el momento pensaremos, es la misma en ambos modelos. Analicemos las fuerzas y desplazamientos en los dos refuerzos.

1.- Reforzamiento a base de contraventeo tradicional.

Si la estructura con el contraventeo tiene una rigidez total de $(1+\alpha')$ veces K_0 , el desplazamiento máximo será:

$$d'_{\text{máx}} = F / ((1+\alpha') * K_0) \quad \dots (12)$$

La fuerza máxima que tomará la estructura será:

$$F'_{\text{estr}} = F / (1+\alpha') \quad \dots (13)$$

Y la fuerza en las diagonales será:

$$F'_{\text{diag}} = \alpha' * F / (1 + \alpha') / (2 * \cos(\theta)) \quad \dots (14)$$

Y la descarga a la cimentación será:

$$F'_{\text{cim}} = F * H / L \quad \dots (15)$$

Obsérvese que la descarga a la cimentación no depende de la rigidez relativa del refuerzo respecto al marco.

2.- Reforzamiento con ADAS.

En este caso las fuerzas en la estructura dependen de la ductilidad del amortiguador. Si pensamos que para la fuerza máxima F el dispositivo tenga una ductilidad de 5, como se vió en el capítulo II, el dispositivo tendrá una rigidez de 0.24 veces su rigidez original. Y entonces la rigidez del conjunto en ese instante será:

$$\begin{aligned} K_{\text{mín}} &= (1 + 0.24(\beta * \tau / (0.24 * \tau + \beta))) * K_0 \\ &= (1 + (\beta * \tau / (\tau + 4.1667 * \beta))) * K_0 \quad \dots (16) \end{aligned}$$

Para simplificar el análisis, aceptaremos que τ es igual a β , entonces la ecuación anterior se puede simplificar a:

$$\begin{aligned} K_{\text{mín}} &= (1 + (\beta^2 / (5.1667 * \beta))) * K_0 \\ &= (1 + 2 * \alpha / 5.1667) * K_0 \\ &= (1 + 0.3871 * \alpha) * K_0 \quad \dots (17) \end{aligned}$$

Y el desplazamiento del sistema será:

$$d_{\text{máx}} = F / ((1 + 0.3871 * \alpha) * K_0) \quad \dots (18)$$

La fuerza máxima que deberá transmitir la estructura deberá ser:

$$F_{estr} = F / (1 + 0.3871 * \alpha) \quad \dots (19)$$

Mientras que la fuerza cortante máxima en los ADAS será:

$$F_{adas} = 0.3871 * \alpha * F / (1 + 0.3871 * \alpha) \quad \dots (20)$$

que corresponde a una ductilidad de 5, por lo que la fuerza de fluencia en ellos será 1.2 veces menor:

$$F_{yadas} = 0.3226 * \alpha * F / (1 + 0.3871 * \alpha) \quad \dots (21)$$

Y la fuerza lateral con la cual empiezan a fluir es:

$$F_y = F_{yadas} * (1 + \alpha) / \alpha \quad \dots (22)$$

La fuerza máxima en las diagonales será:

$$F_{diag} = 0.3871 * \alpha * F / ((1 + 0.3871 * \alpha) * 2 * \cos(\theta)) \quad \dots (23)$$

Mientras que la descarga máxima a la cimentación será:

$$F_{cim} = F * H / L \quad \dots (24)$$

que no depende ni de la ductilidad desarrollada, ni de las rigideces relativas del sistema.

3.- Comparación de los resultados de ambos modelos.

Podemos expresar al desplazamiento máximo con ADAS en función del desplazamiento máximo con contraventeo:

$$\begin{aligned} d_{m\acute{a}x} &= d'_{m\acute{a}x} * (1 + \alpha') / (1 + 0.3871 * \alpha) \\ &= d'_{m\acute{a}x} * Frig \quad \dots (25) \end{aligned}$$

Donde Frig es un factor de rigideces, definido como:

$$\text{Frig} = (1 + \alpha') / (1 + 0.3871 * \alpha) \quad \dots (26)$$

que en general siempre es mayor de uno, considerando que α' será siempre mayor de α .

Si expresamos a la fuerza máxima en la estructura con un reforzamiento con amortiguadores en función de la obtenida con contraventeo, obtendremos:

$$\text{Festr} = \text{F'estr} * (1 + \alpha') / (1 + 0.3871 * \alpha)$$

$$\text{Festr} = \text{F'estr} * \text{Frig} \quad \dots (27)$$

Y si hacemos lo mismo con las fuerzas máximas en las diagonales:

$$\text{Fdiag} = \text{F'diag} * 0.3871 * \alpha * (1 + \alpha') / (\alpha' * (1 + 0.3871 * \alpha))$$

$$= \text{F'diag} * 0.3871 * \alpha * \text{Frig} / \alpha' \quad \dots (28)$$

En la figura III.3 se puede apreciar la variación del factor de respuesta o rigidez (Frig) para distintos valores de α y α' . A partir de la ecuación 26 se puede calcular el valor de la relación α' / α , para la cual los desplazamientos y fuerzas en la estructura original son iguales para ambos casos de reforzamiento.

A partir de la ecuación 26 se puede determinar una expresión que nos indique el valor de α para el cual el factor de respuesta es la unidad:

FACTOR DE RESPUESTA O RIGIDEZ MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD

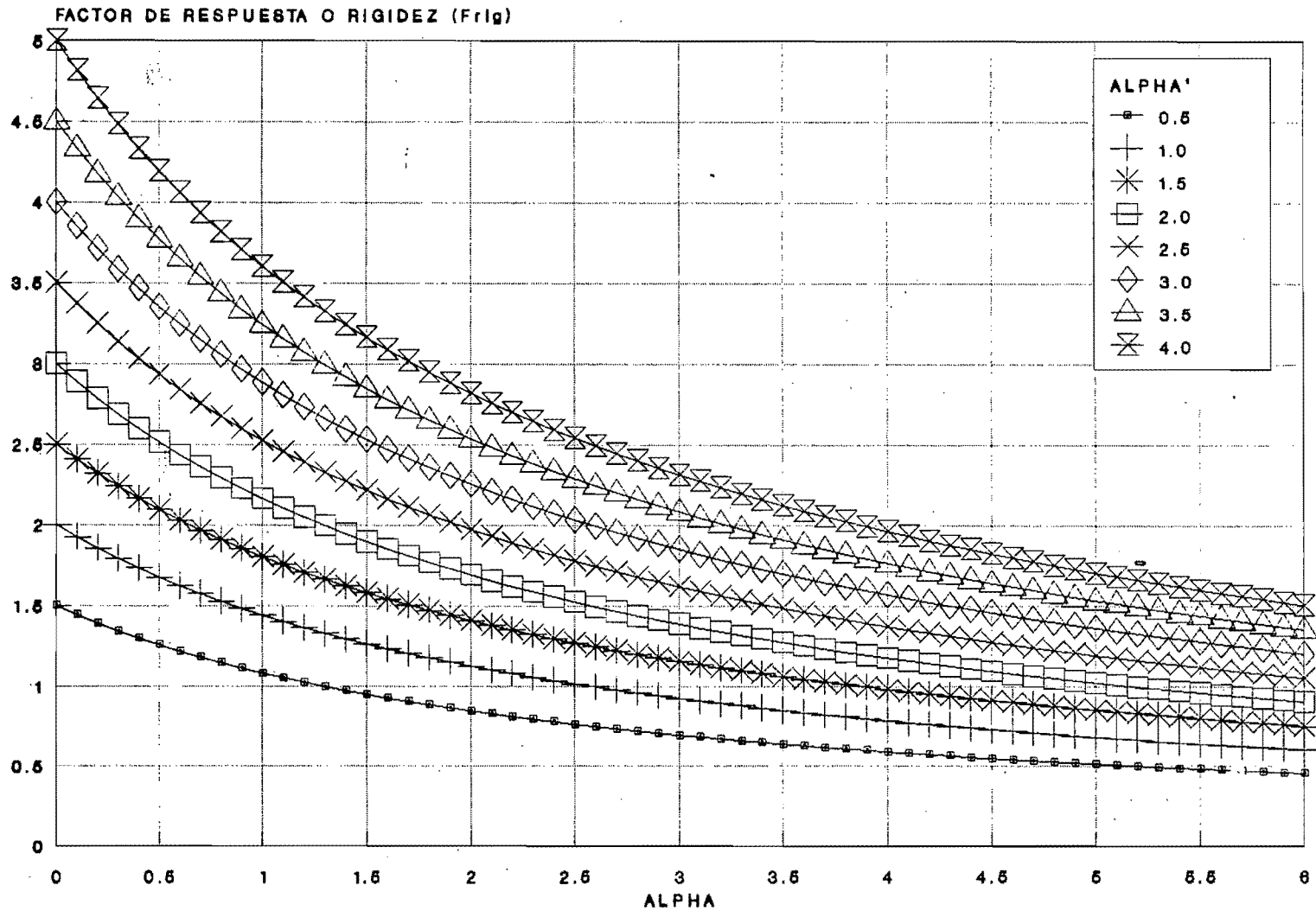
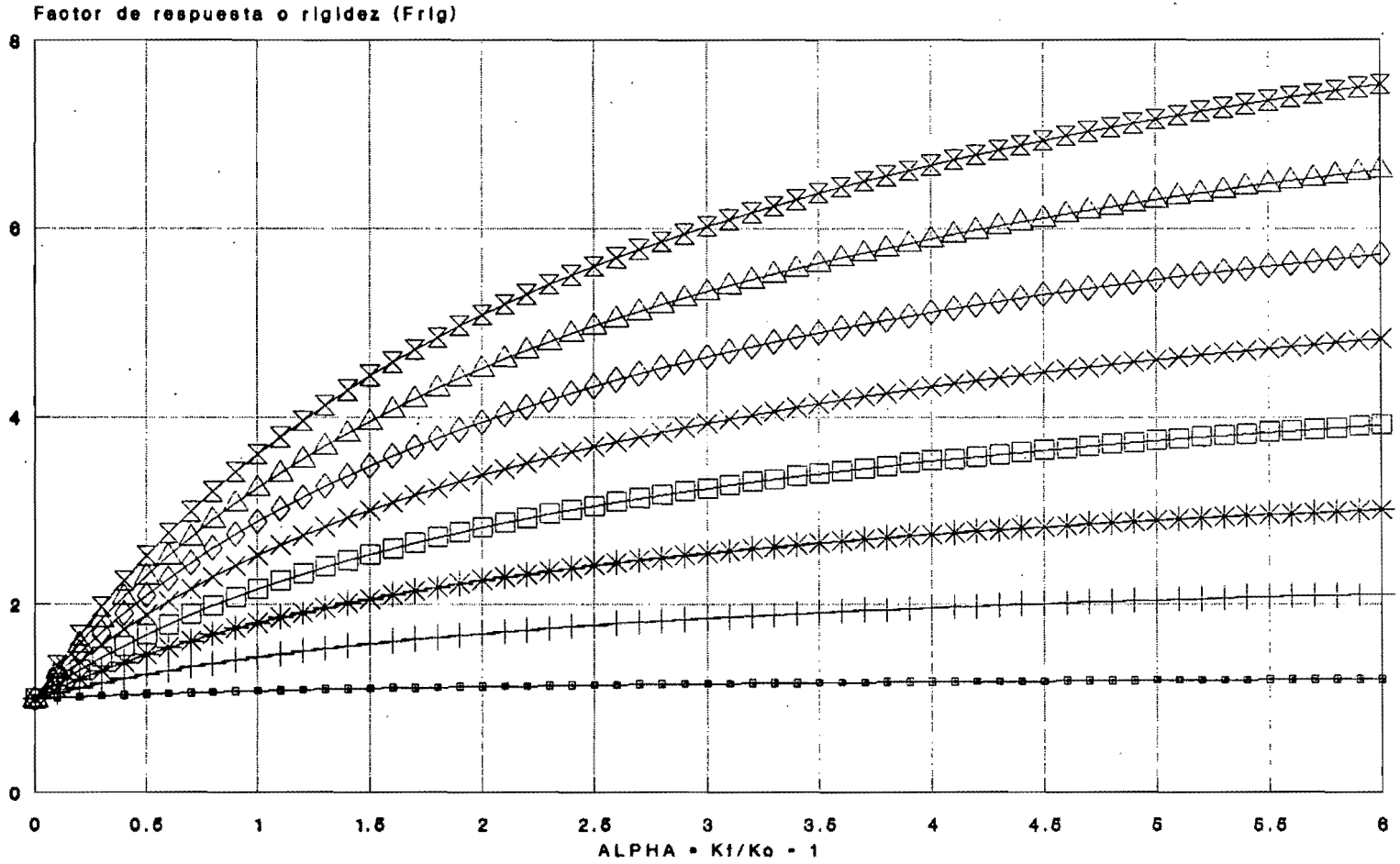


Figura III.3

FACTOR DE RESPUESTA O RIGIDEZ MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD



PARA BETA-GAMMA

Figura III.4

$$\alpha = \alpha' / 0.3871 = 2.5833 * \alpha' \quad \dots (29)$$

Lo que, aunado al hecho de que es mucho mas rígido un contraventeo tradicional, nos indica que la estructura amortiguada será en el caso general más flexible y solicitará mas fuerzas en la estructura original que una contraventeada.

La situación contraria se presenta al comparar las fuerzas en las diagonales, la relación F_{diag}/F'_{diag} se muestra en la figura III.5 para distintos valores de α y α' . De la figura se puede apreciar que para una misma fuerza lateral, con facilidad se puede lograr que las fuerzas en un sistema con ADAS sean del orden de la mitad de las presentes en un sistema contraventeado. Ello se debe a que el sistema con ADAS trabajando con ductilidad de cinco, induce mayores fuerzas en la estructura original.

La comparación anterior no debe tomarse con el enfoque mostrado, pues en el reforzamiento con amortiguadores buscará principalmente que la fuerza F sea menor. Se debe tomar al factor de respuesta (F_{rig}) como un factor mínimo que indica cuánto menores deberán ser las fuerzas del sistema amortiguado para que el desplazamiento y las fuerzas en la estructura original sean las mismas que con un contraventeo normal.

Por ejemplo, si contraventeando una estructura podemos

FUERZAS EN LAS DIAGONALES MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD

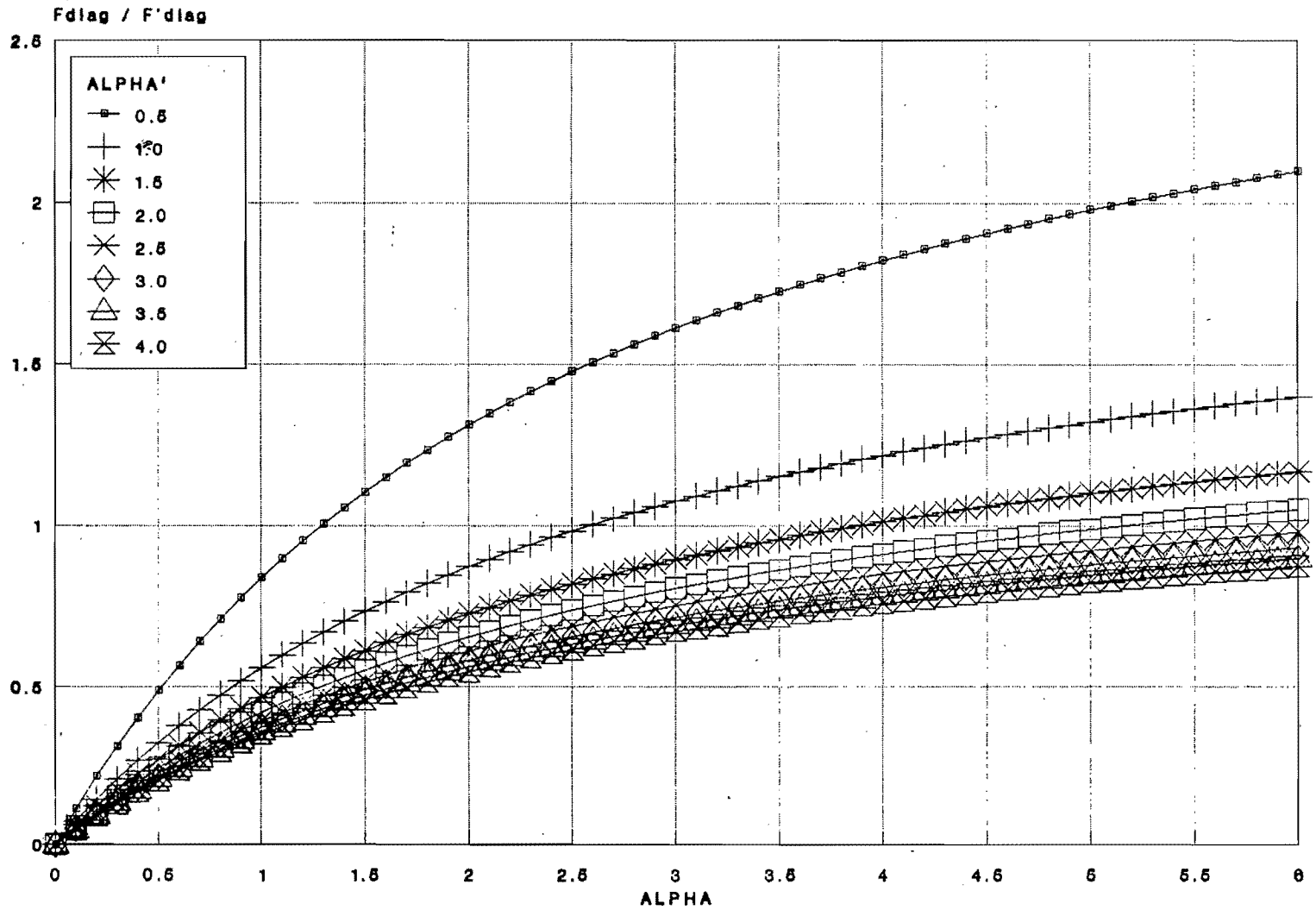


Figura III.5

aumentar su rigidez en cuatro veces su rigidez original y colocando ADAS podemos lograr que la rigidez se vea incrementada en 2 veces, el factor de respuesta será :

$$\text{Frig} = (1 + 4)/(1 + 0.3871*2) = 2.8182$$

Lo que significa que para lograr que la estructura original se vea solicitada en la misma magnitud con ambos reforzamientos, el comportamiento no lineal en los ADAS debe ser capaz de reducir las fuerzas 2.82 veces las que tiene la estructura contraventeada.

La relación de fuerzas en las diagonales, calculada con la ecuación 28, si se logra esta reducción será:

$$\begin{aligned} \text{Fdiag}/\text{F}'\text{diag} &= 0.3871*2/4*2.82/2.82 \\ &= 0.19355 \end{aligned}$$

Menos del 20% de las fuerzas con contraventeos tradicionales.

En el ejemplo anterior, para lograr que la rigidez con los disipadores aumente en 2 se requiere que la rigidez de los contraventeos sea:

$$\alpha = B^2 / (2*B)$$

$$B^2 - 2*\alpha*B = 0$$

$$B * (B - 2*\alpha) = 0$$

$$B = 2*\alpha = 4 \quad \Rightarrow \quad K_a = 4*K_o$$

Que es la misma rigidez que se propuso tuvieran las

diagonales del refuerzo tradicional, aunque las fuerzas sean 19% más pequeñas.

Como se mostró, las descargas a la cimentación en el modelo de una sola crujía no dependen de la rigidez o el tipo del sistema de contraventeo usado, por lo que el valor de la descarga es función solamente de la fuerza lateral. En el ejemplo, la descarga a la cimentación es 2.82 veces menor en el modelo con disipadores de energía, en el caso en que se logre la reducción de 2.82 propuesta en las fuerzas laterales.

En un modelo de varias crujías, en donde no todas ellas estén contraventeadas, la descarga máxima a la cimentación sí estará ligada con la relación de rigideces entre la estructura y el sistema con diagonales (cualquiera de los dos). En este caso la descarga axial máxima será mayor en tanto mayor sea la rigidez del sistema de refuerzo, por las concentraciones de esfuerzos. En conclusión, las descargas serán menores conforme sea menor la rigidez del contraventeo.

III.3 COMPARACION DE COMPORTAMIENTOS DINAMICOS

1.- Modelo usado.

Para hacer la comparación, se utilizaron modelos como los mostrados en la figura III.1. Los estudios se hicieron con los 25

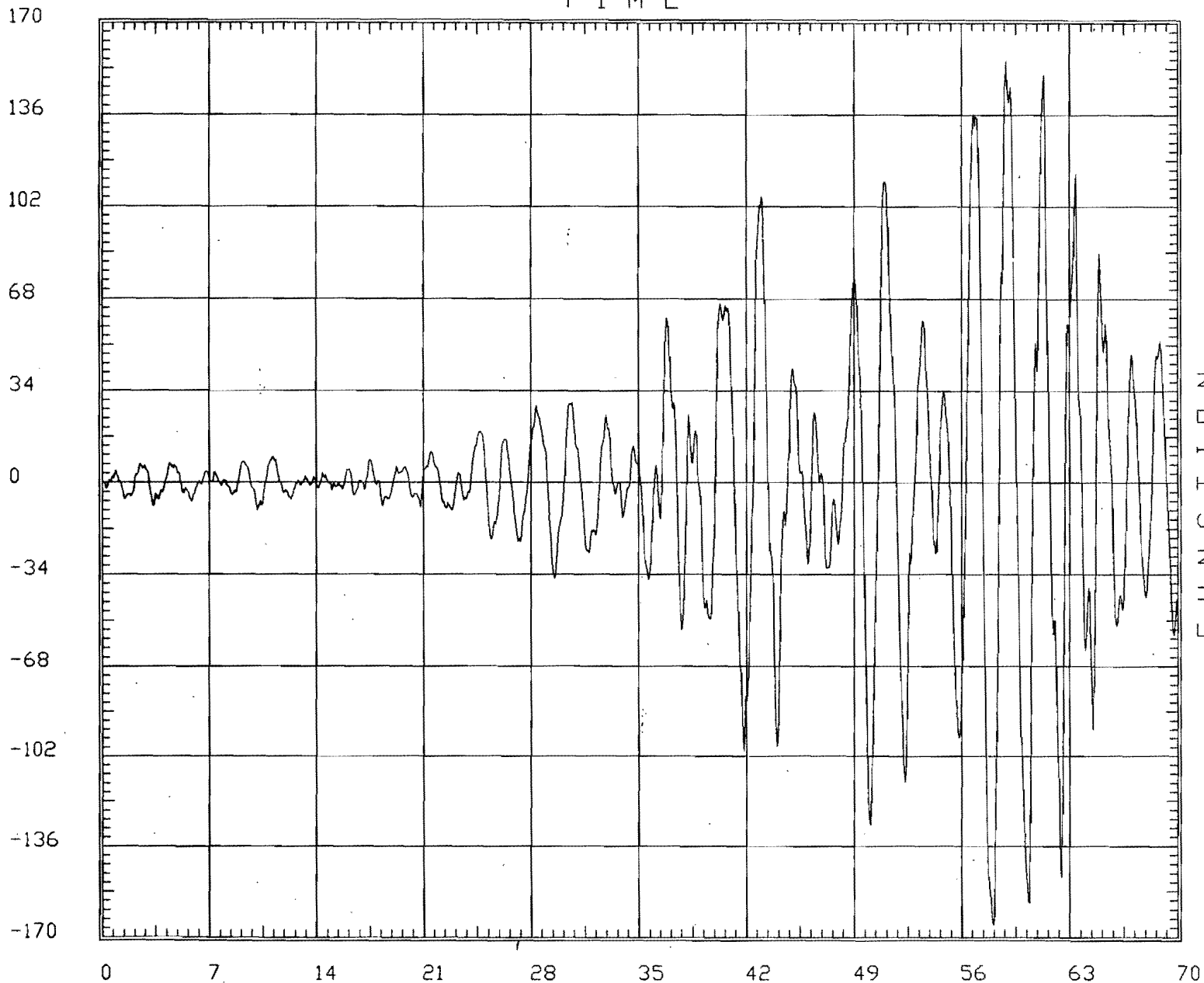
segundos mas desfavorables de la componente Este-Oeste del sismo del 19 de septiembre de 1985 registrado en SCT (figuras III.6 y III.7).

Se utilizó el programa DRAIN2D para evaluar la respuesta del sistema ante la excitación. El paso en la integración usado fue de 0.04 segundos, que proporciona buenos resultados en la zona de periodos de la estructura mayores a 1 segundo, que son las que más nos interesa estudiar.

Para el análisis de estructuras en la zona del lago de la Ciudad de México la interacción Suelo Estructura es muy importante, y debe tomarse en cuenta. Esta puede incorporarse al modelo mediante resortes, cuyas constantes dependerán del tipo de las características del suelo y el tipo de cimentación usada. En estos modelos el efecto de la interacción Suelo-Estructura no se ha incluido para simplificar los análisis y no involucrar mas parámetros, pero para el análisis de estructuras reales sí debe tomarse en cuenta.

En los modelos se considera un 5% de amortiguamiento propio en la estructura. Para simplificar los cálculos, sólomente a los elementos ADAS se les permitió que trabajaran en el rango inelástico.

T I M E



BASE MOTION
TYPE A
DIRN XT

ENVELOPES
MIN
-0.1654E+03
AT 58.10000
MAX
0.1561E+03
AT 58.95000

Figura III.6

FILE : SCT

TIME HISTORY TRACE

FACTOR : .100E+01

SAP90

ESPECTRO DE RESPUESTA REGISTRO SCT1

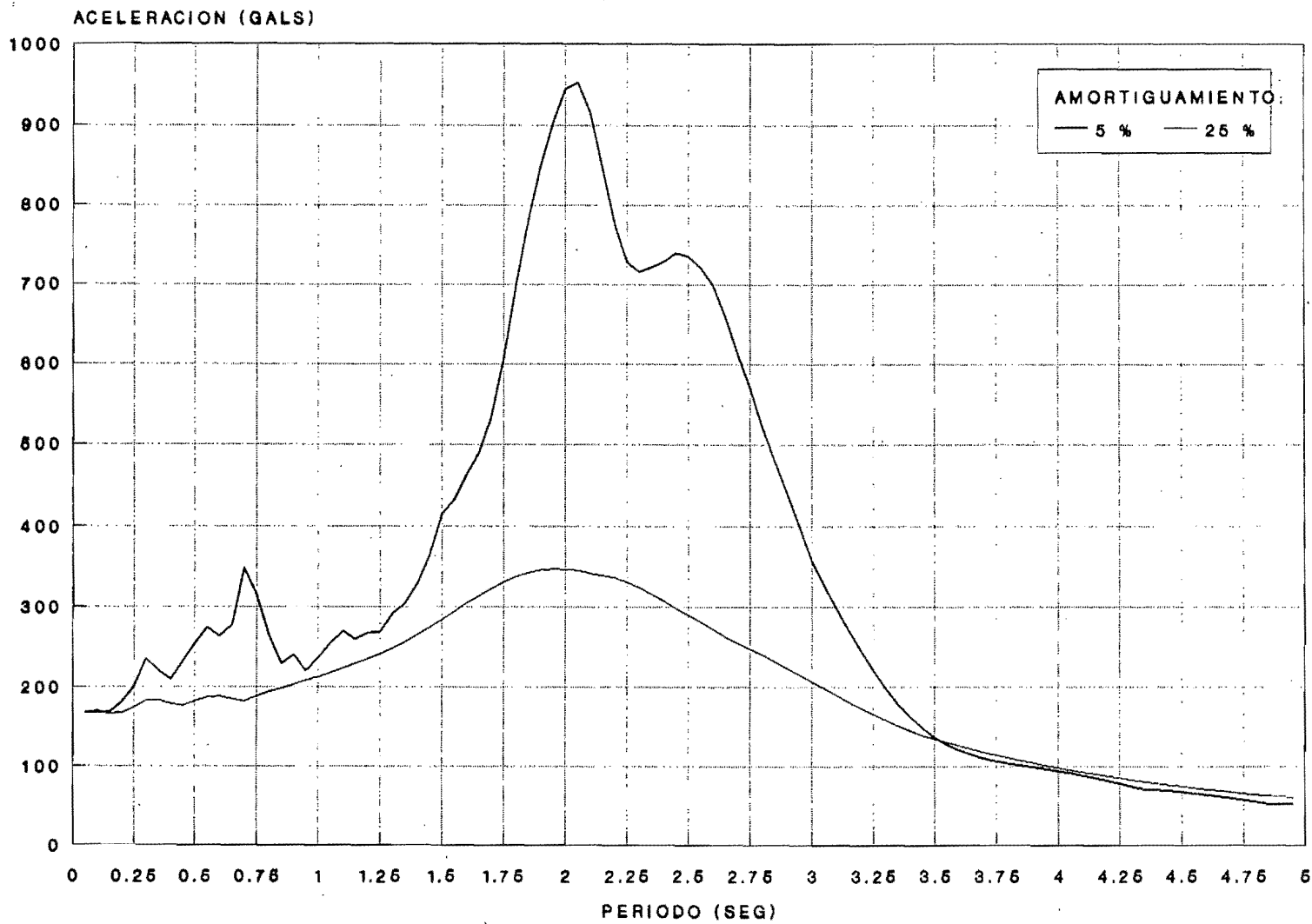


Figura III.7

2.- Variación en la respuesta dependiendo del periodo de la estructura original.

El primer estudio consistió en variar la masa en el sistema de un grado de libertad para representar distintos periodos de la estructura original y en cada caso obtener la respuesta del sistema.

Se propusieron tres valores de α y α' para el reforzamiento de la estructura: 1.6, 2.0 y 2.5. Sólo se presentan los resultados con estas tres relaciones de rigidez para hacer las gráficas más sencillas, pero se debe tener en mente que en realidad existen una gran cantidad de curvas similares a las presentadas. Con esos valores se calcularon las rigideces en los sistemas de contraventeos y en los amortiguadores.

Una vez introducidas las propiedades adecuadas en el modelo se hicieron los análisis para obtener las respuestas de estructuras con periodo original desde 0.25 seg, y aumentando el periodo en 0.25 seg, hasta 5 segundos. Para el sistema amortiguado se tuvieron que hacer varios análisis para lograr que el disipador desarrollara una ductilidad de 5, con un error de $\pm 5\%$, es decir que el amortiguador está trabajando en condiciones óptimas.

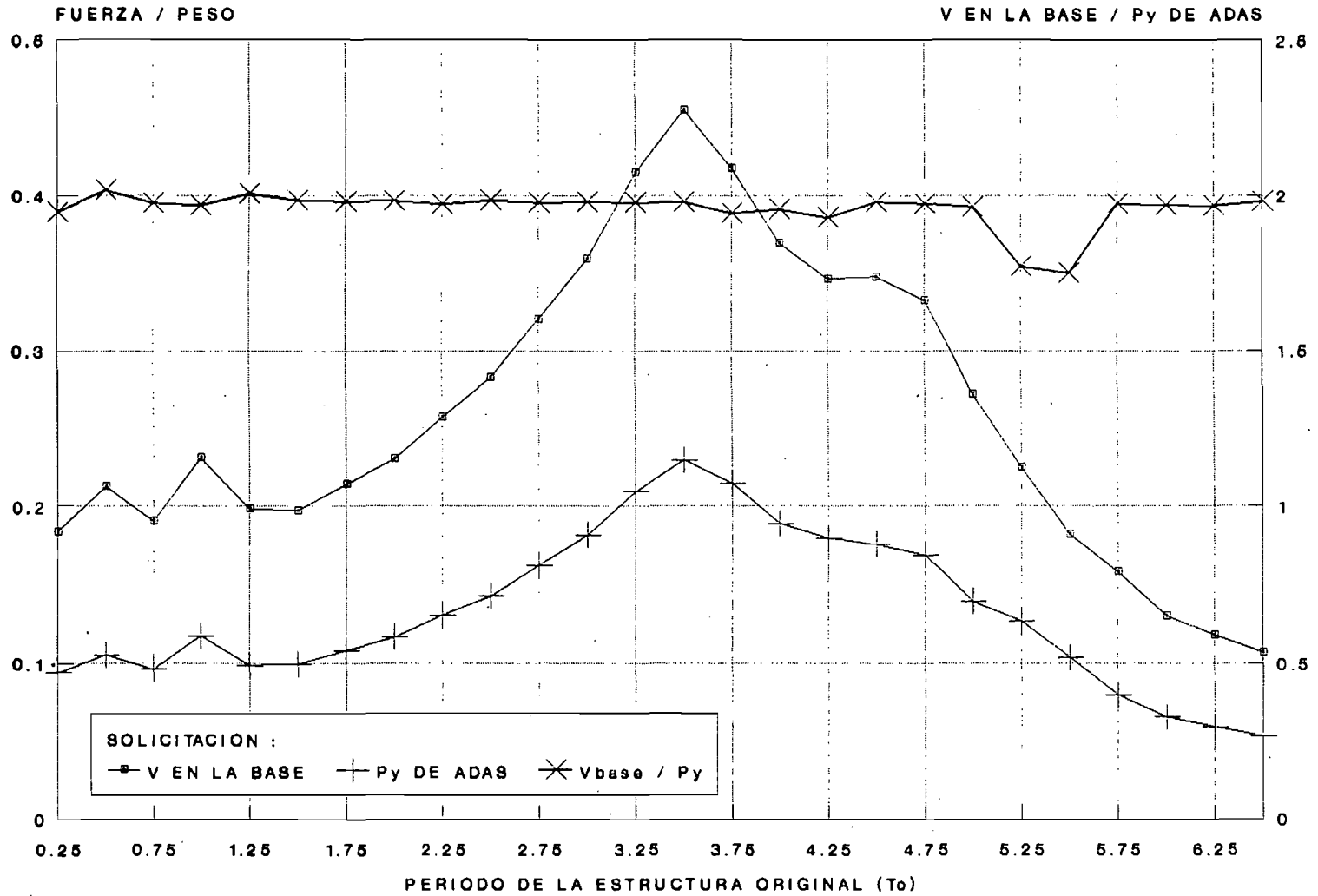
En la figura III.8 se muestra el cortante en la base, la fuerza de fluencia óptima de los dispositivos y la relación entre ambos valores para el reforzamiento amortiguado correspondiente a $\alpha=2.5$ y $\beta=3.2$.

En la figura III.9 se muestra la variación del cortante en la base dividido entre el peso para la estructura original, la amortiguada y la contraventeada. En el eje de las ordenadas se muestra el periodo de la estructura original, entonces para una estructura con un periodo dado podemos determinar cual será su respuesta, dependiendo del sistema con el que se desee reforzar y en la cantidad que se desee rigidizar.

Se puede apreciar que las curvas de ambos reforzamientos tienen ordenadas muy similares cuando la estructura original tiene periodo menor a 2.5 segundos. Pero, a partir de este punto en adelante, las ordenadas en el sistema contraventeado crecen rápidamente porque su periodo se acerca al de resonancia, lo que no sucede en la estructura con ADAS por la energía que se disipa.

En la figura III.10 se muestra la variación en las descargas en la cimentación, como porcentaje del peso, debidas al sismo. En la figura se puede apreciar también cómo las ordenadas en el rango de periodos de la estructura original mayores a los dos

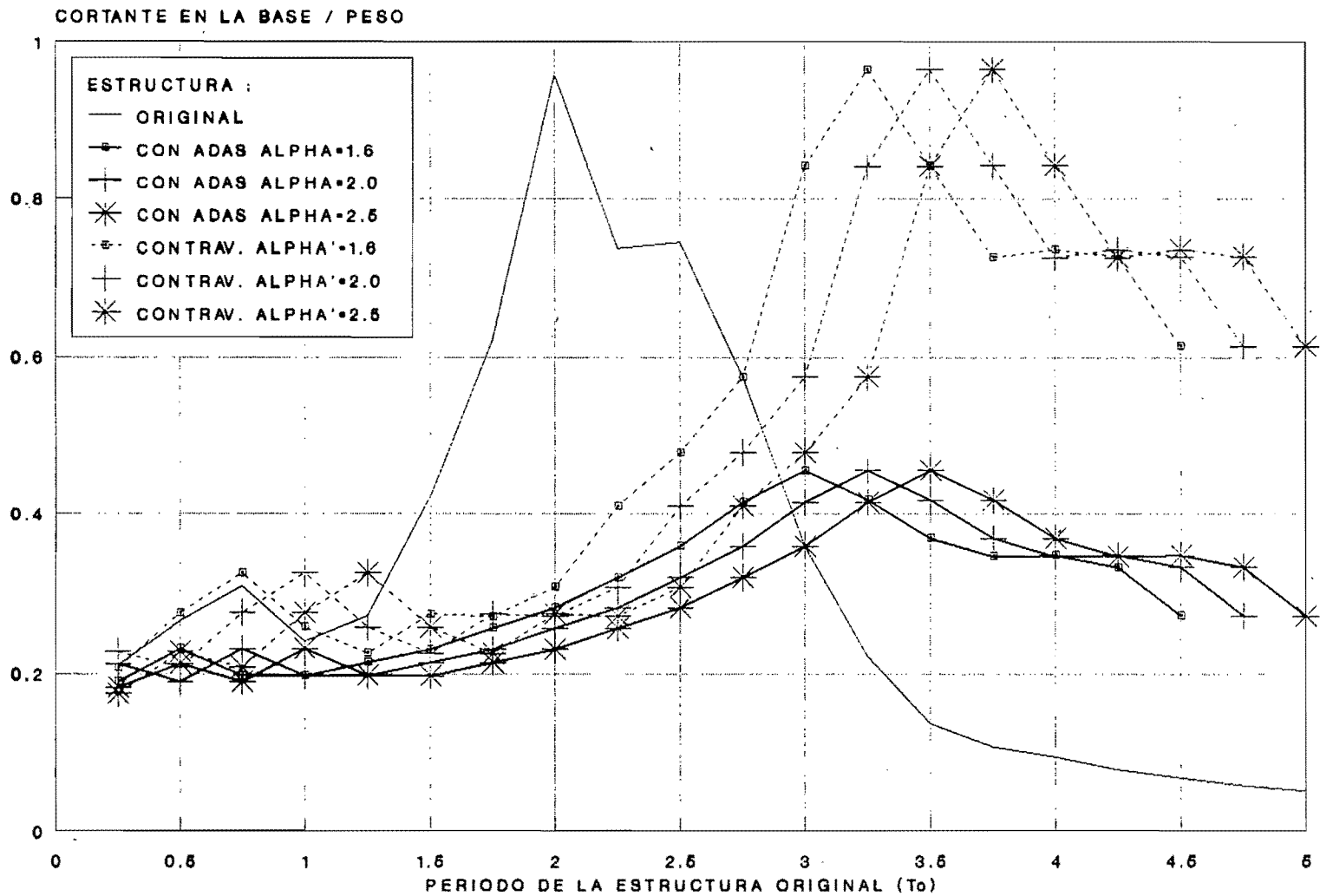
RESPUESTA CON ADAS MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD



ALPHA = 2.5, BETA = 3.2, T = 0.53T₀
 ACELEROGRAMA SCT1

Figura III.8

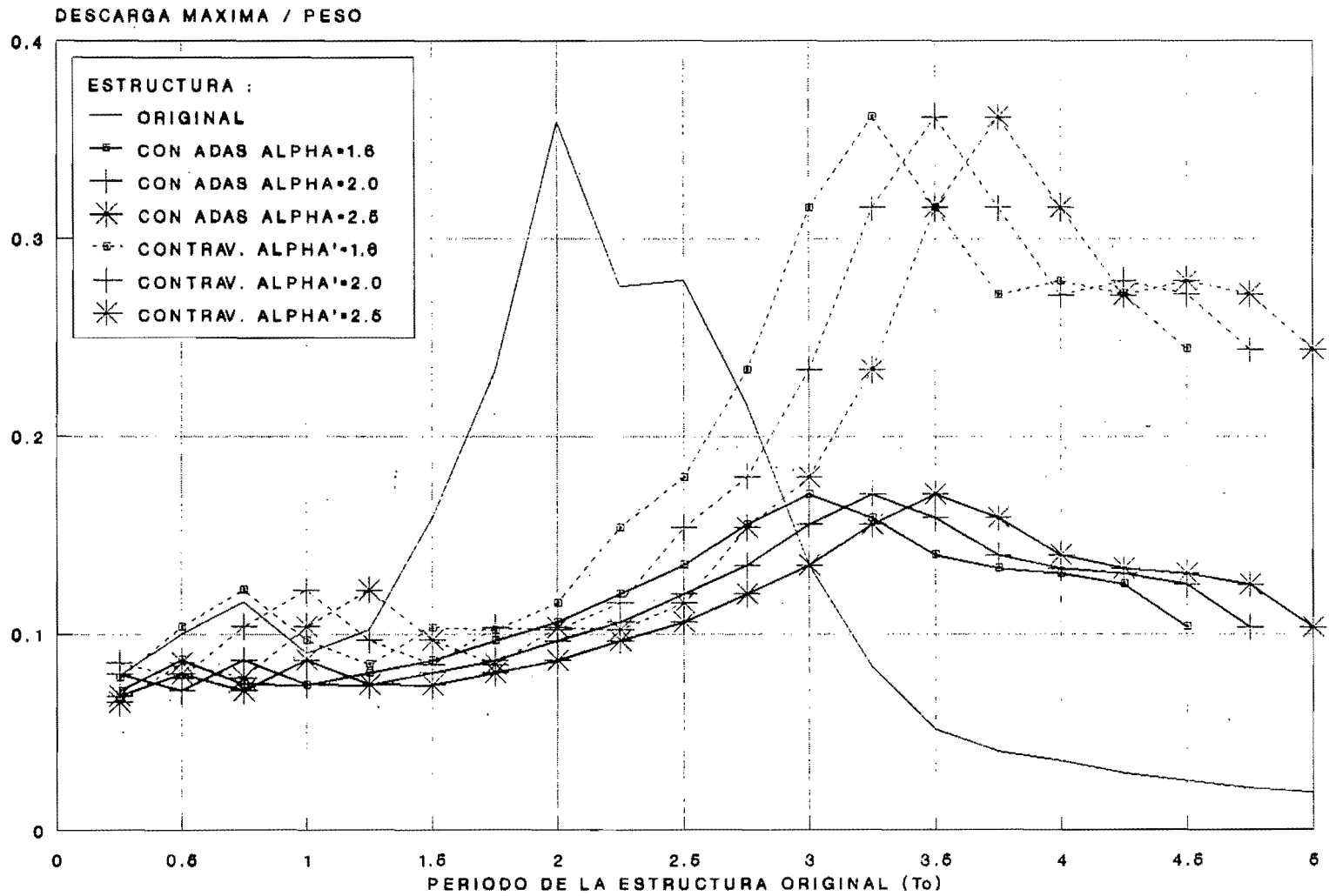
CORTANTES EN LA BASE MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD



ACELEROGRAMA SCT1
BETA/GAMMA = 0.633

Figura III.9

DESCARGAS MAXIMAS A LA CIMENTACION MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD



ACELEROGRAMA SCT1
 BETA/GAMMA = 0.533

Figura III.10

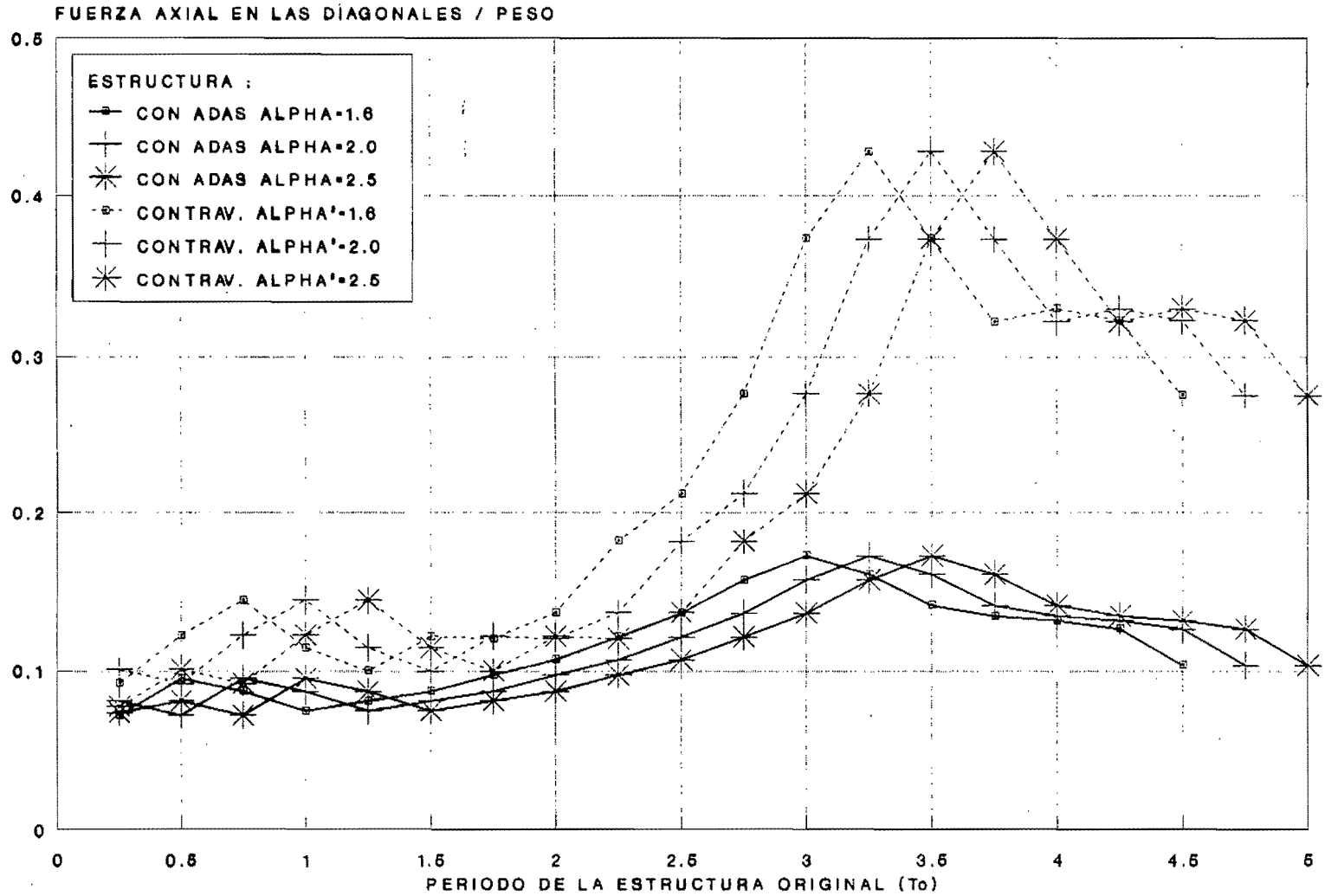
segundos y medio, pueden ser bastante menores debido al comportamiento no lineal del disipador, en tanto que para estructuras con periodo menor, la respuesta de ambos sistemas es similar.

Las fuerzas en las diagonales siguen un comportamiento similar al de los cortantes y descargas en la cimentación (ver figura III.11).

Al observar estas gráficas se pensará que para el diseño del refuerzo se optará por aquella relación de rigidez mínima para lograr un comportamiento adecuado y que se evitará que con el refuerzo con contraventeo la estructura se lleve a la resonancia.

Debe existir alguna curva que represente la respuesta del marco con el diseño óptimo. Esta curva deberá seguir la siguiente tendencia: aproximarse a una curva de un α' bajo, aunque lo suficientemente alto para cumplir con límites de servicio, en la zona de periodos cortos, en donde las solicitaciones son pequeñas. Después, conforme el periodo de la estructura se alarga y las solicitaciones aumentan, se acercará a curvas correspondientes a un valor alto de α' , lo suficientemente alto para cumplir con los desplazamientos y fuerzas impuestas al sistema. Finalmente, existirá un punto a partir del cual un reforzamiento con un menor valor de α' le imponga fuerzas menores al edificio,

FUERZAS EN LAS DIAGONALES MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD



ACELEROGRAMA SCT1
BETA/GAMMA = 0.633

Figura III.11

y que a su vez sea lo suficientemente grande para cumplir con los límites en los desplazamientos.

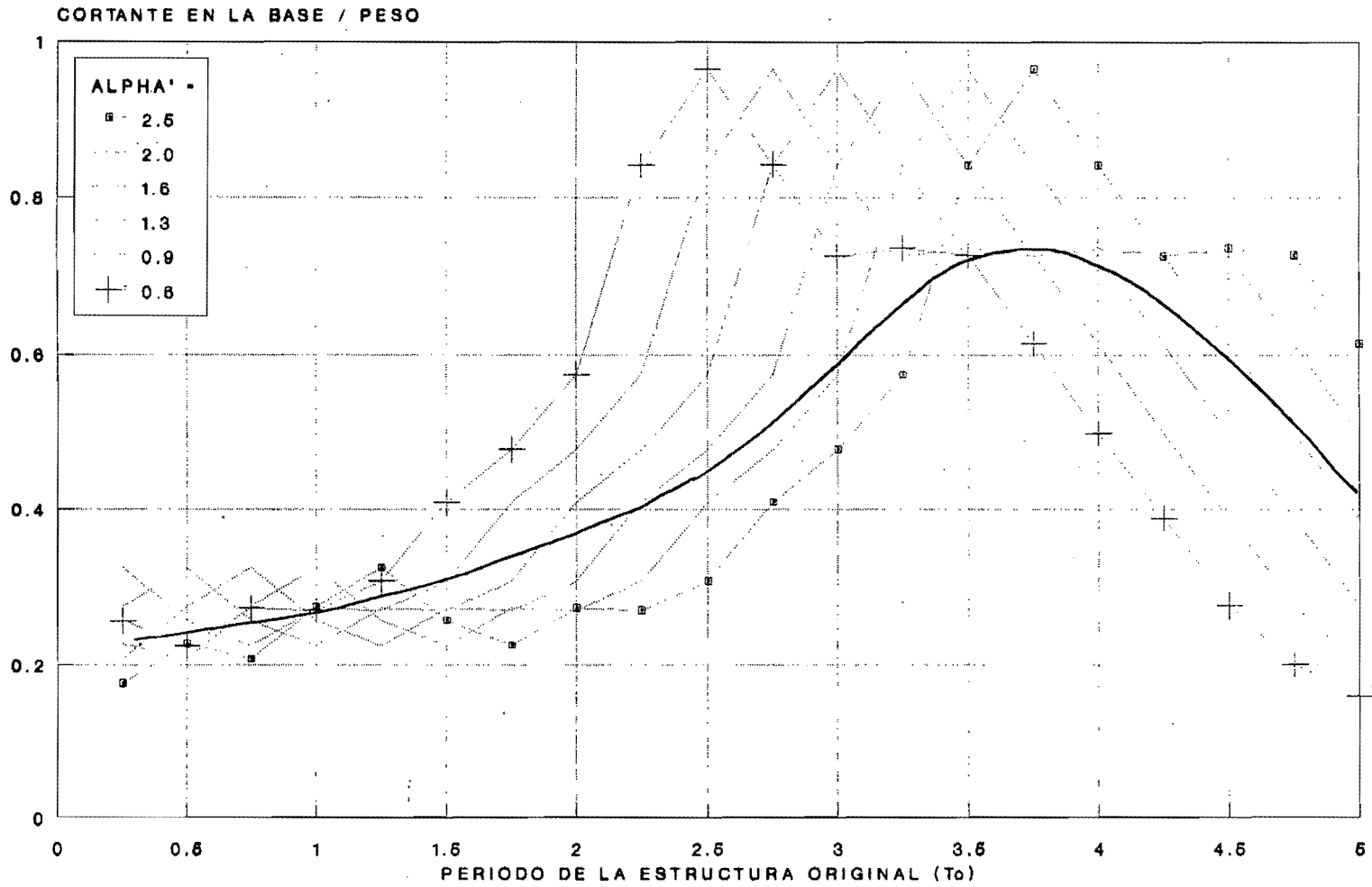
En la figura III.12 se muestra la forma aproximada que debe tener la curva de respuestas correspondientes a diseños óptimos para el sistema contraventeado, y en la figura III.13 se muestra la correspondiente para el refuerzo con amortiguadores. Asociadas a estas curvas deben haber otras vinculadas con los costos de reparación, donde al sobreponer ambas podría apreciarse el ahorro de un sistema con respecto al otro en un rango de periodos o en la totalidad de ellos.

III.4 INFLUENCIA DE LA RELACION DE RIGIDECES DEL CONTRAVENTEADO Y DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL EN LA RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADORES.

Para hacer las comparaciones anteriores se propuso siempre un valor de la relación rigidez del contraviento entre rigidez original de la estructura (β) de 3.2 para aumentar la rigidez del sistema en 2.5, pero no se describió el cambio en la respuesta que puede haber si β tiene un valor distinto.

Se estudia la respuesta de un sistema de un grado de libertad con periodo original de 3.5 segundos al que se le aumento la

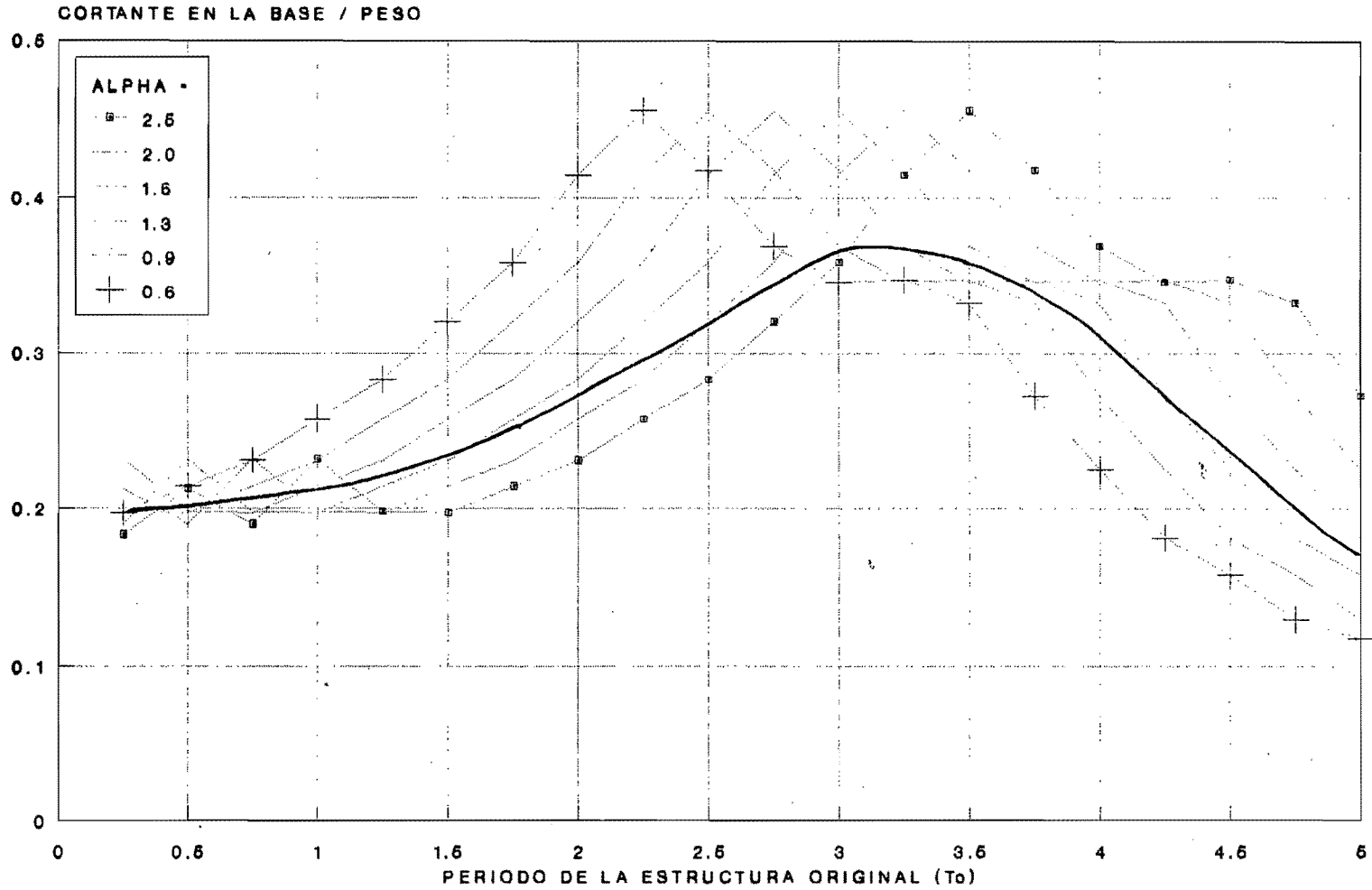
CORTANTES EN LA BASE MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD REFUERZO CON CONTRAVIENTOS



ACELEROGRAMA SCT1
BETA/GAMMA = 0.633

Figura III.12

CORTANTES EN LA BASE MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD REFUERZO CON ADAS



ACELEROGRAMA SCT1
BETA/GAMMA = 0.833

Figura III.13

rigidez inicial en $\alpha=2.67$ veces. El sistema se aceleró en su base con el registro de SCT del 19 de septiembre de 1985, componente este-oeste.

Una estructura con un periodo de 3.5 es del tipo de estructuras que no sufrieron daños durante el sismo de 1985, sin embargo, se escogió una estructura con estas características de rigidez y periodo, por ser la combinación de valores que vuelve las sollicitaciones en la estructura reforzada, en la cantidad indicada, máximas. Mas adelante se presentan los resultados para estructuras con periodos de 0.25 a 5 segundos.

Si el periodo dominante en el acelerograma fuera distinto, sería otra la combinación de valores correspondientes a la sollicitación máxima. Además, no debemos olvidar que en estos análisis no se ha tomado en cuenta la interacción Suelo-Estructura que alarga el periodo de vibración de la edificación.

El análisis se llevó a cabo para los siguientes valores de β (K_a/K_o) : 4, 4.5, 5, 6, 7, 8, 10 y 15. De acuerdo a lo expuesto en las primeras hojas de este capítulo, el valor de la relación entre la rigidez inicial del amortiguador y la estructura original (τ) se obtiene con la expresión:

$$\tau = \alpha / (1 - (\alpha/\beta))$$

Los valores de τ que se obtuvieron se muestran en la figura III.14, con los que se obtuvieron las rigideces iniciales de los ADAS para cada β :

$$K_{adas} = \tau * K_0$$

Y las rigideces del sistema de contraventeo:

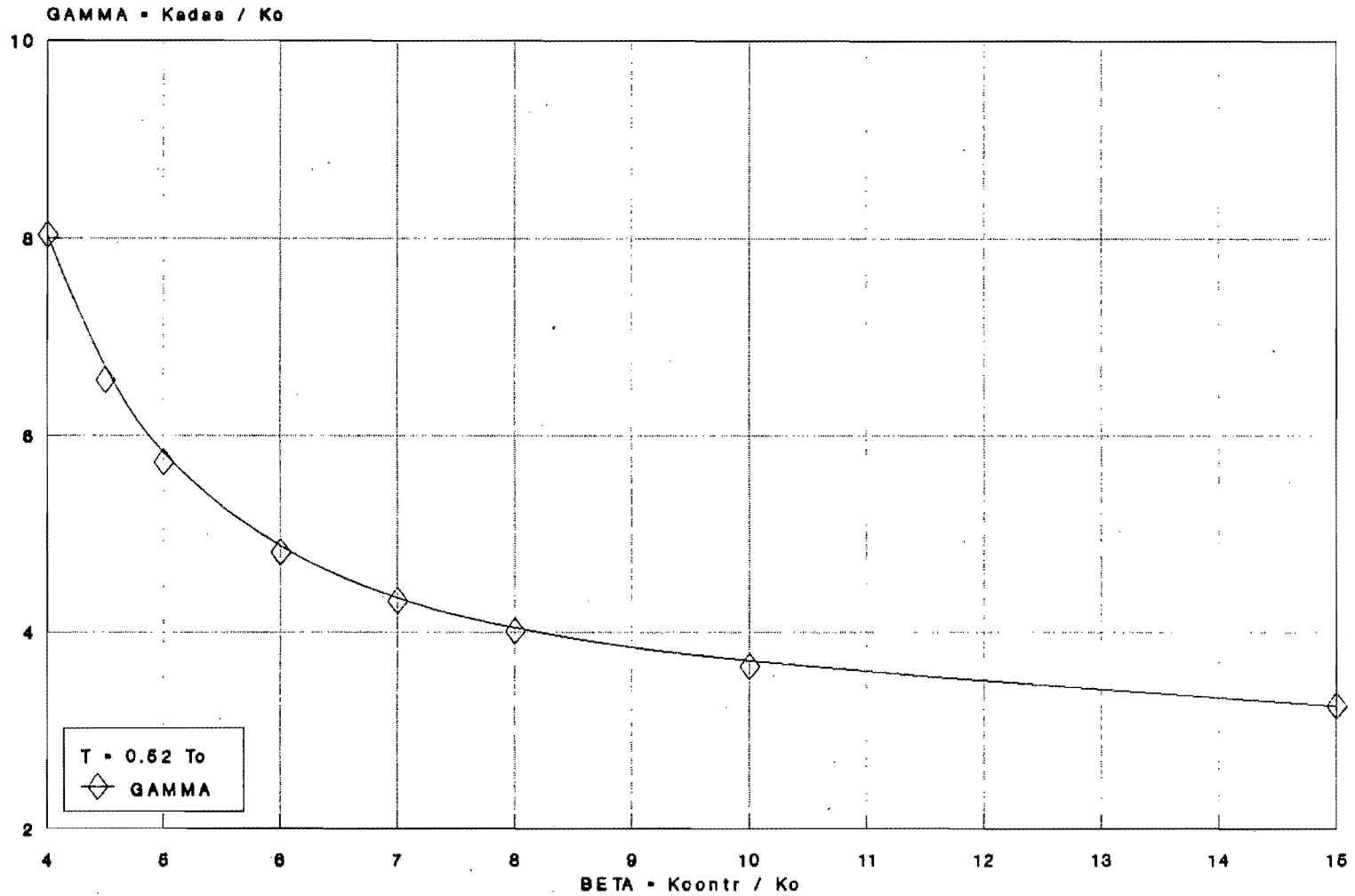
$$K_a = \beta * K_0 \quad \Rightarrow \quad A = \beta * K_0 * L_a / (2 * E * \cos^2 \theta)$$

En cada análisis, la fuerza de fluencia de los ADAS se ajustó para lograr que desarrollaran una ductilidad de 5 ± 0.05 . En la figura III.15 se muestran los cortantes en la base como porcentaje del peso. En la gráfica se puede apreciar que el cortante en la base disminuye conforme aumenta el valor de β , y que la disminución es mayor al principio. La reducción máxima lograda fue aproximadamente 1.3.

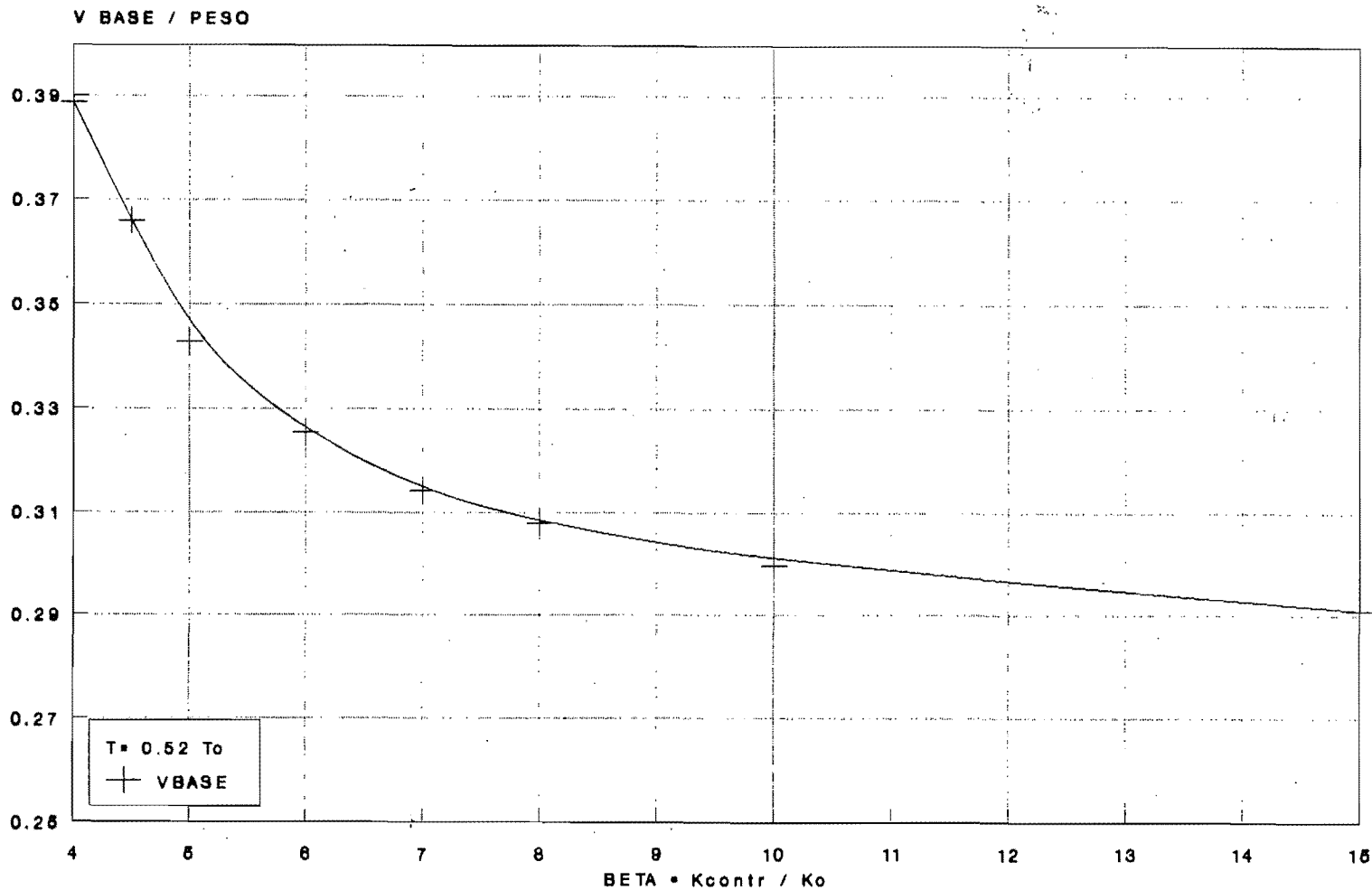
En la figura III.16 se graficaron la descarga axial a la cimentación, la fuerza en las diagonales y la fuerza de fluencia en los amortiguadores para lograr la ductilidad de 5. La tendencia de las curvas es similar a la obtenida para el cortante en la base.

Para este caso las solicitaciones se redujeron en 1.4, 1.75 y 1.7 veces para descarga axial, fuerza en diagonales y fuerza de fluencia respectivamente. Nótese que para llegar a las reduc-

VARIACION DE GAMMA
MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD
 $T_0=3.5$ SEG, $M=2232.3$ TON \cdot S 2 /M



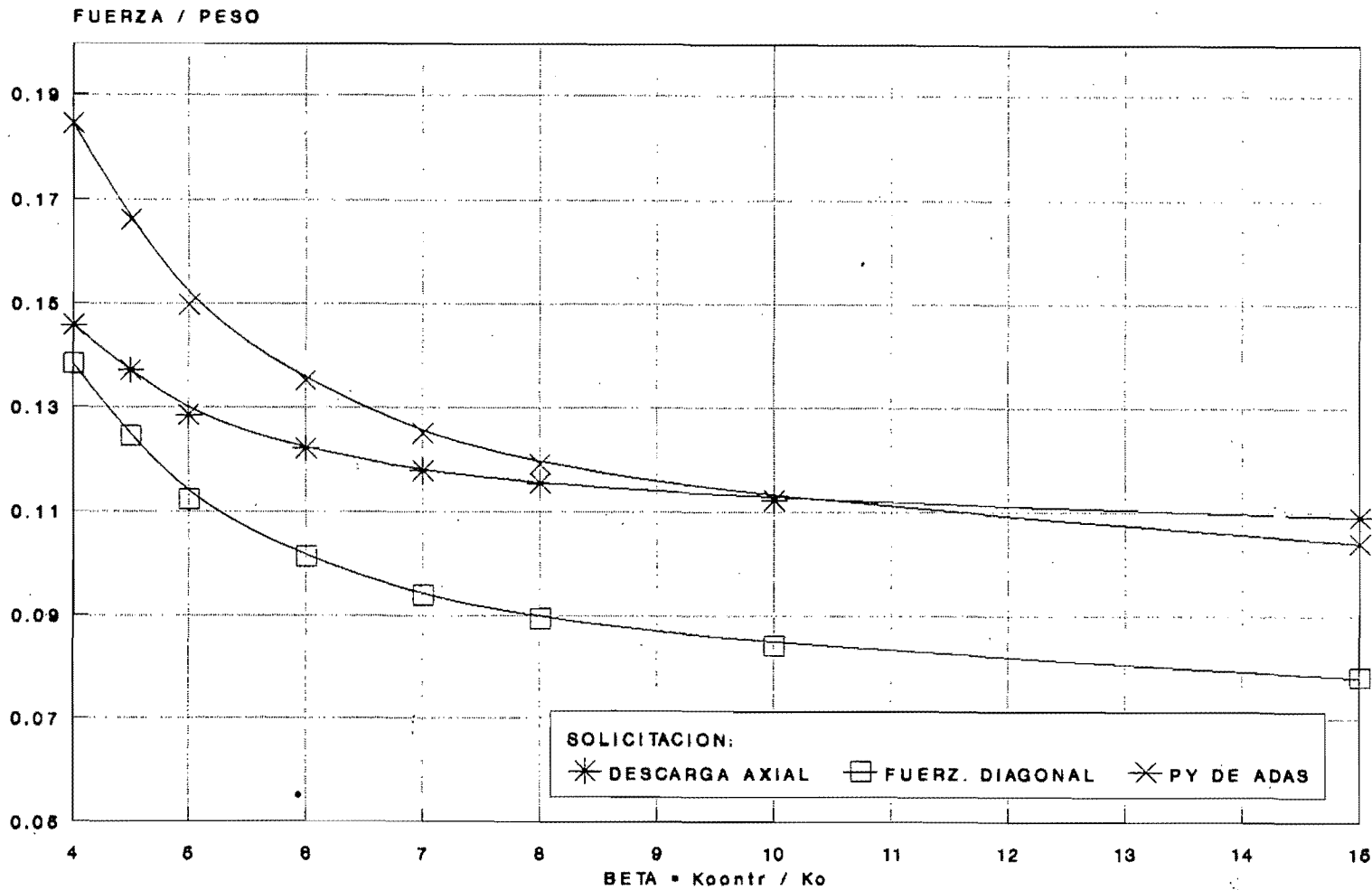
**CORTANTES EN LA BASE
 MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD
 $T_0=3.5 \text{ SEG}$, $M=2232.3 \text{ TON}\cdot\text{S}^2/\text{M}$**



ACELEROGRAMA SCT1
 ALPHA = 2.67

Figura III.15

COMPARACION DE RESPUESTAS
 MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD
 $T_0=3.5$ SEG, $M=2232.3$ TON \cdot S 2 /M



ACELEROGRAMA SCT1

ALPHA = 2.67

Figura III.16

ciones mencionadas fue necesario aumentar la rigidez del contraviento de 4 a 15 (3.75 veces).

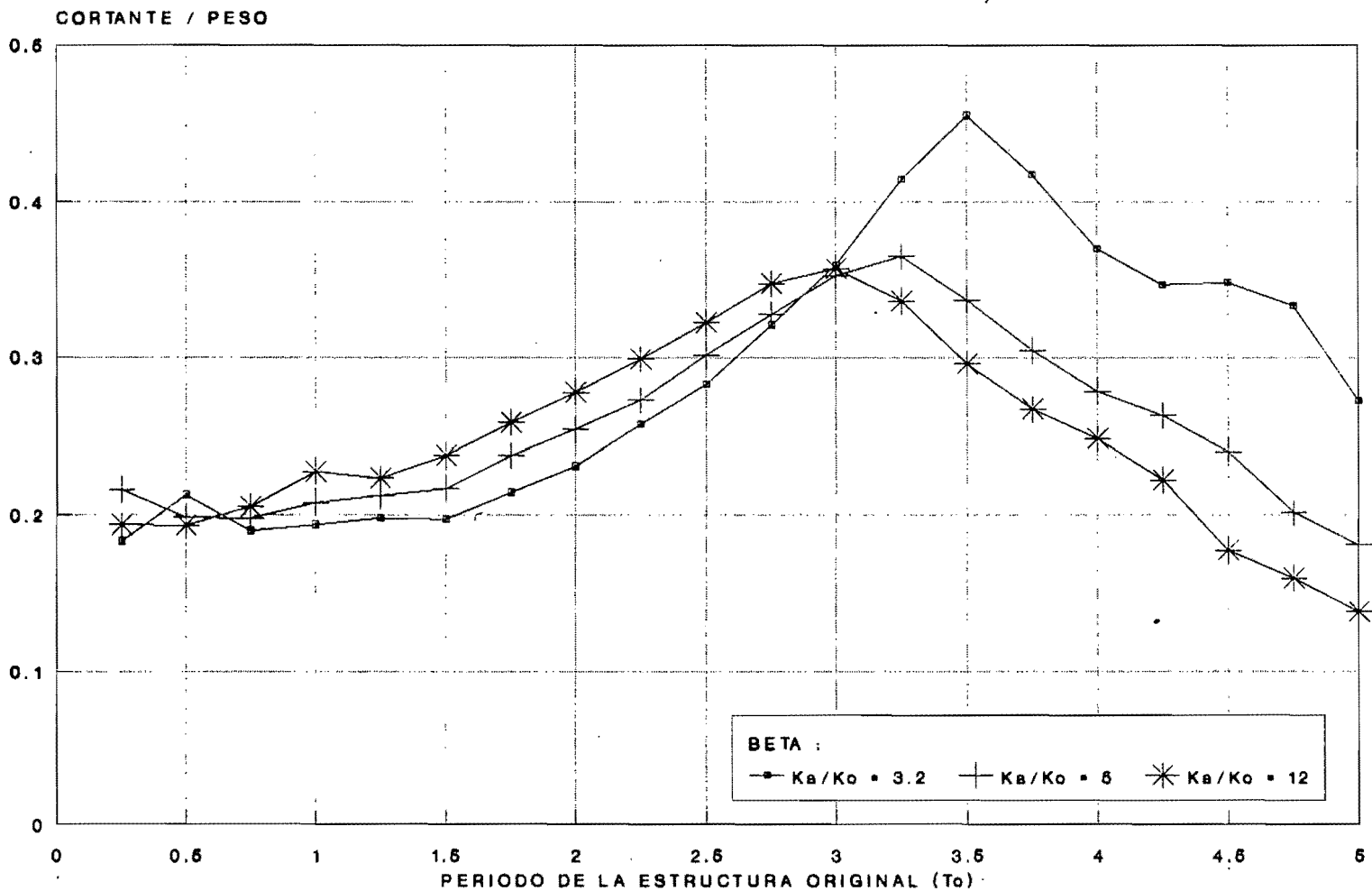
Además del estudio anterior se hizo un escrutinio (barrido) de periodos con 3 valores de β para la misma estructura, pero con $\alpha=2.5$. Los valores de β usados, y sus correspondientes valores de τ (K_{adas}/K_0) son: 3.2 con 12, 5 con 5.12 y 12 con 3.2, donde el primero corresponde a una estructura con un contraviento moderadamente rígido pero con un amortiguador muy rígido, el último par de valores corresponde al caso contrario, y el segundo representa una rigidez proporcional en los ADAS y las diagonales.

En las figuras III.17 a III.20 se muestran los resultados del barrido de periodos. Se puede apreciar cómo para un rango de periodos de la estructura original (mayores a 2.5) la respuesta del sistema disminuye conforme se aumenta β . También se nota que el periodo de máxima respuesta se corre a la izquierda conforme se aumenta β , aunque la rigidez inicial del sistema es la misma.

Se pueden construir curvas similares a las mostradas para distintos valores de α , pero con la misma relación β/τ , ajustando el eje de los periodos.

Resumiendo: la respuesta del sistema disminuye conforme

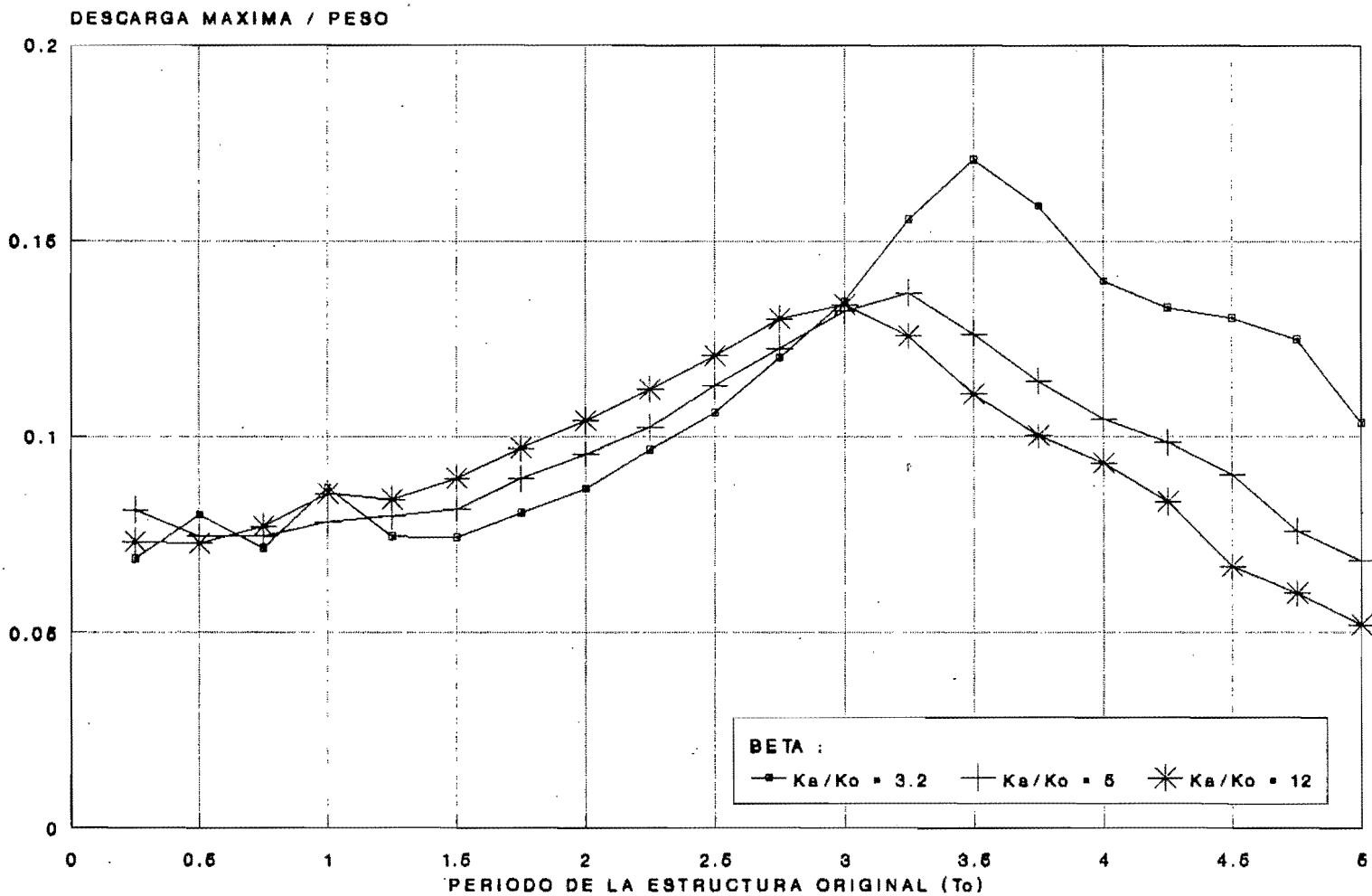
CORTANTES EN LA BASE MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD VARIACION CON BETA (K_a/K_o)



ALPHA = 2.5
ACELEROGRAMA SCT1

Figura III.17

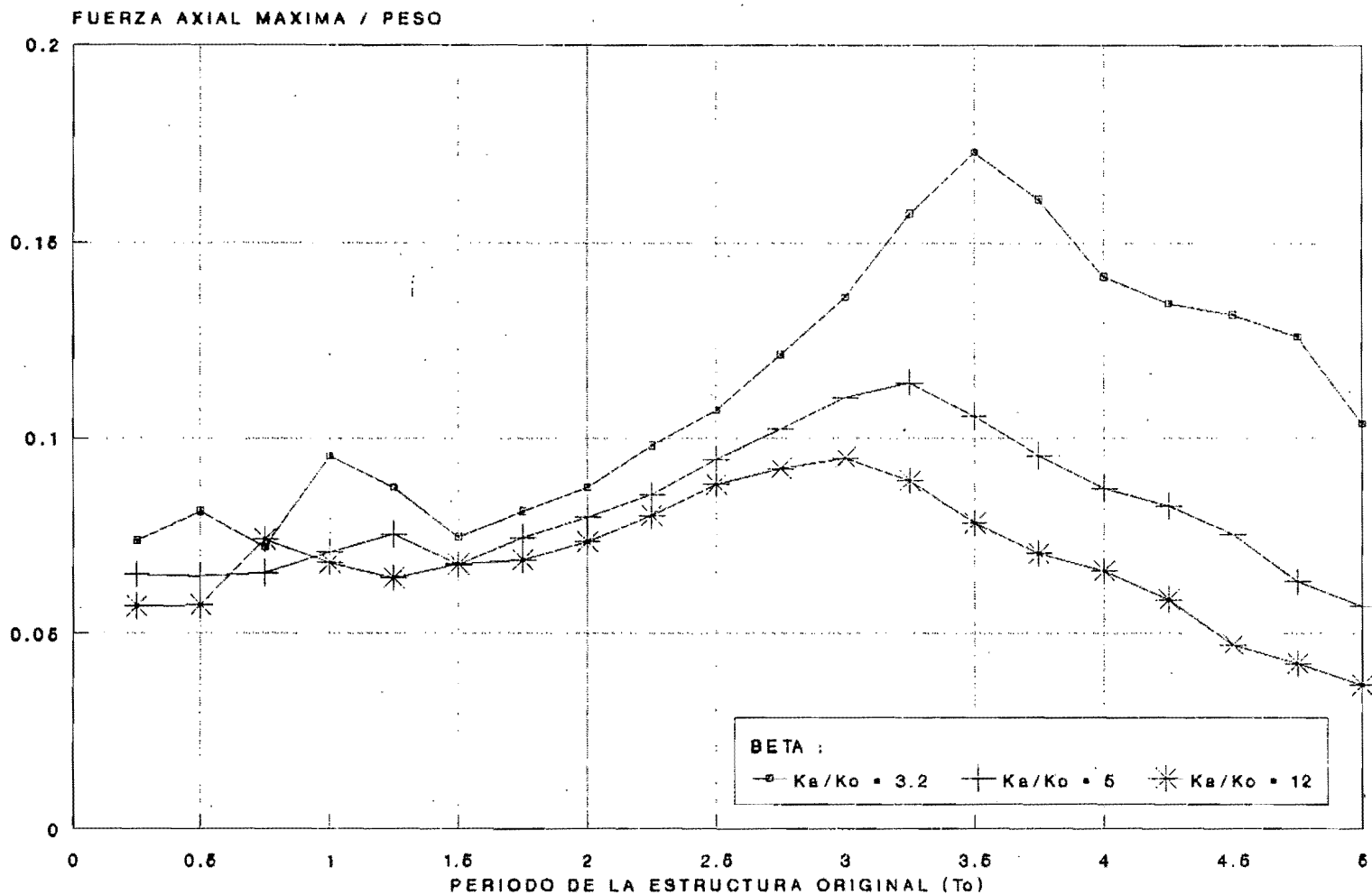
DESCARGAS A LA CIMENTACION MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD VARIACION CON BETA (K_a/K_o)



ALPHA = 2.5
ACELEROGRAMA SCT1

Figura III.18

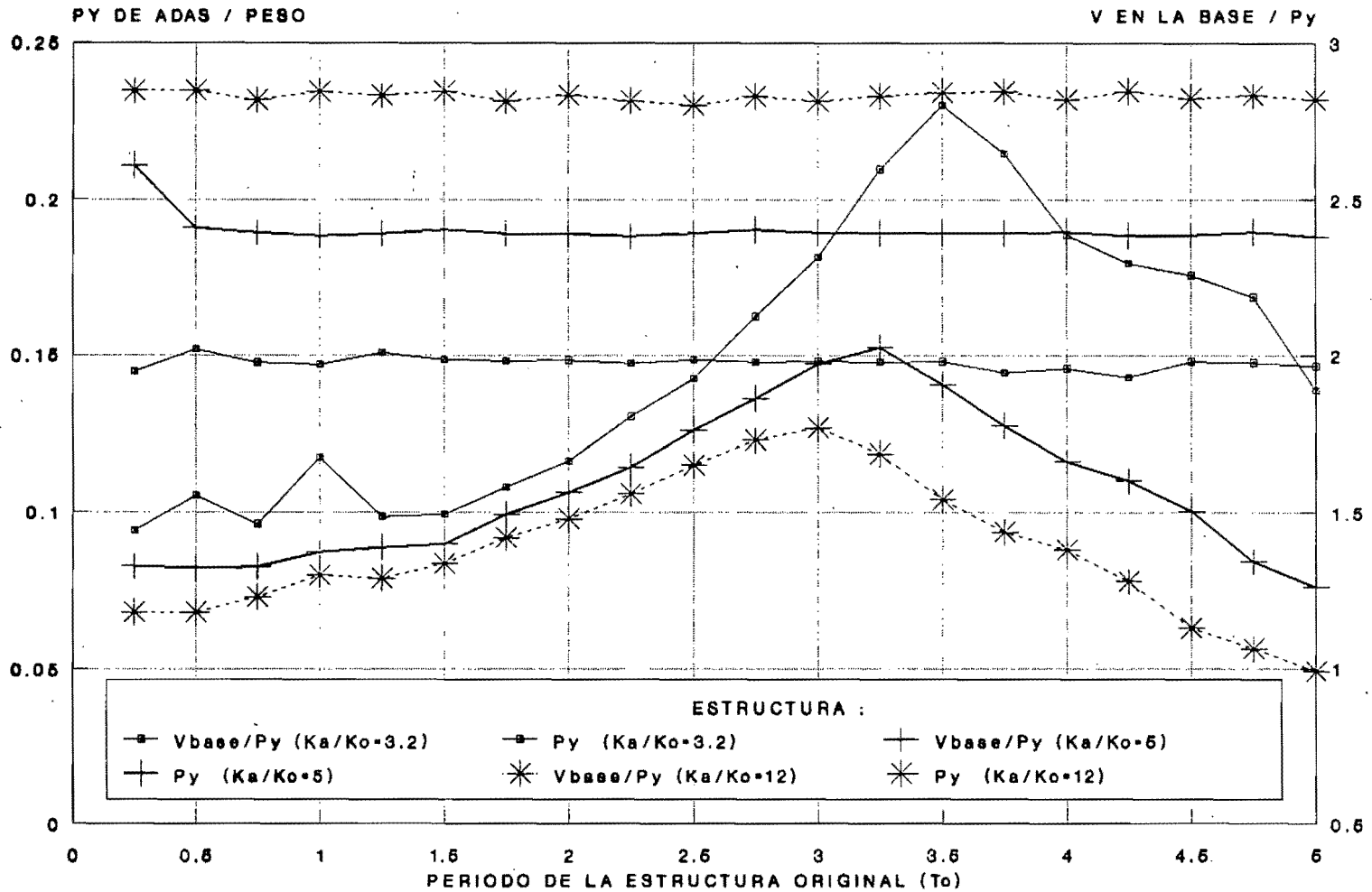
FUERZA MAXIMA EN DIAGONALES MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD VARIACION CON BETA (K_a/K_o)



ALPHA = 2.5
ACELEROGRAMA SCT1

Figura III.19

FUERZA DE FLUENCIA EN ADAS MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD VARIACION CON BETA (K_a/K_o)



ALPHA = 2.5
ACELEROGRAMA SCT1

Figura III.20

aumenta la relación β/τ , pero esta reducción es pequeña en comparación con lo que debe agregarse en material. Se recomienda que se busque una relación β/τ (K_a/K_{adas}) un poco mayor a uno.

III.5 INFLUENCIA DE LA DUCTILIDAD EN EL SISTEMA CON DISIPADORES.

Como se mencionó anteriormente, los disipadores ADAS han sido probados hasta ductilidades de 14 mostrando un comportamiento histerético estable, aunque para diseño se recomienda se use un valor de 5. En todos los modelos anteriores se vigiló que se cumpliera la ductilidad de diseño, pero no se mencionó la influencia que tiene la ductilidad en la respuesta de la estructura.

Para determinar esta influencia se usó un modelo de un grado de libertad sujeto al sismo registrado en SCT en 1985. El periodo original de la estructura es de 3.5 segundos y las relaciones de rigidez usadas son las siguientes: $\alpha=2.67$, $\beta=4.5$ y $\tau=6.57$. En este estudio no se tomaron en cuenta los efectos de la interacción Suelo-Estructura para no agregar mas parámetros al estudio.

Se varió la fuerza de fluencia de los ADAS para lograr distintas ductilidades en el mismo. Se analizaron los resultados encontrados en el rango de ductilidades de 1 a 12. Nótese que en

el caso en que la ductilidad del dispositivo sea uno, en realidad se esta modelando un contraventeo tradicional con igual rigidez inicial. Los resultados obtenidos se dividieron entre los correspondientes a ductilidad uno (contraventeo tradicional).

En la figura III.21 están graficados los valores de fluencia en el dispositivo con su ductilidad correspondiente. Se puede observar que estos pares de valores en una gráfica con escala logarítmica forman una recta.

En la figura III.22 se graficaron los desplazamientos de la estructura. Se muestra que con una ductilidad de 2.5 los desplazamientos resultaron ser casi el 80% de los de un contraventeo tradicional. Para una ductilidad de 5 los desplazamientos resultaron 16% menores que en un contraventeo sin ductilidad.

En la figura III.23 se presentan los resultados obtenidos para el cortante en la base y la descarga máxima a la cimentación. Existe una tendencia, marcada al principio y cada vez menor, de bajar las solicitaciones conforme aumenta μ . Para una ductilidad de 5 se redujeron estas solicitaciones a casi la mitad de las correspondientes a un sistema sin disipación inelástica de energía.

PY-DUCTILIDAD MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD

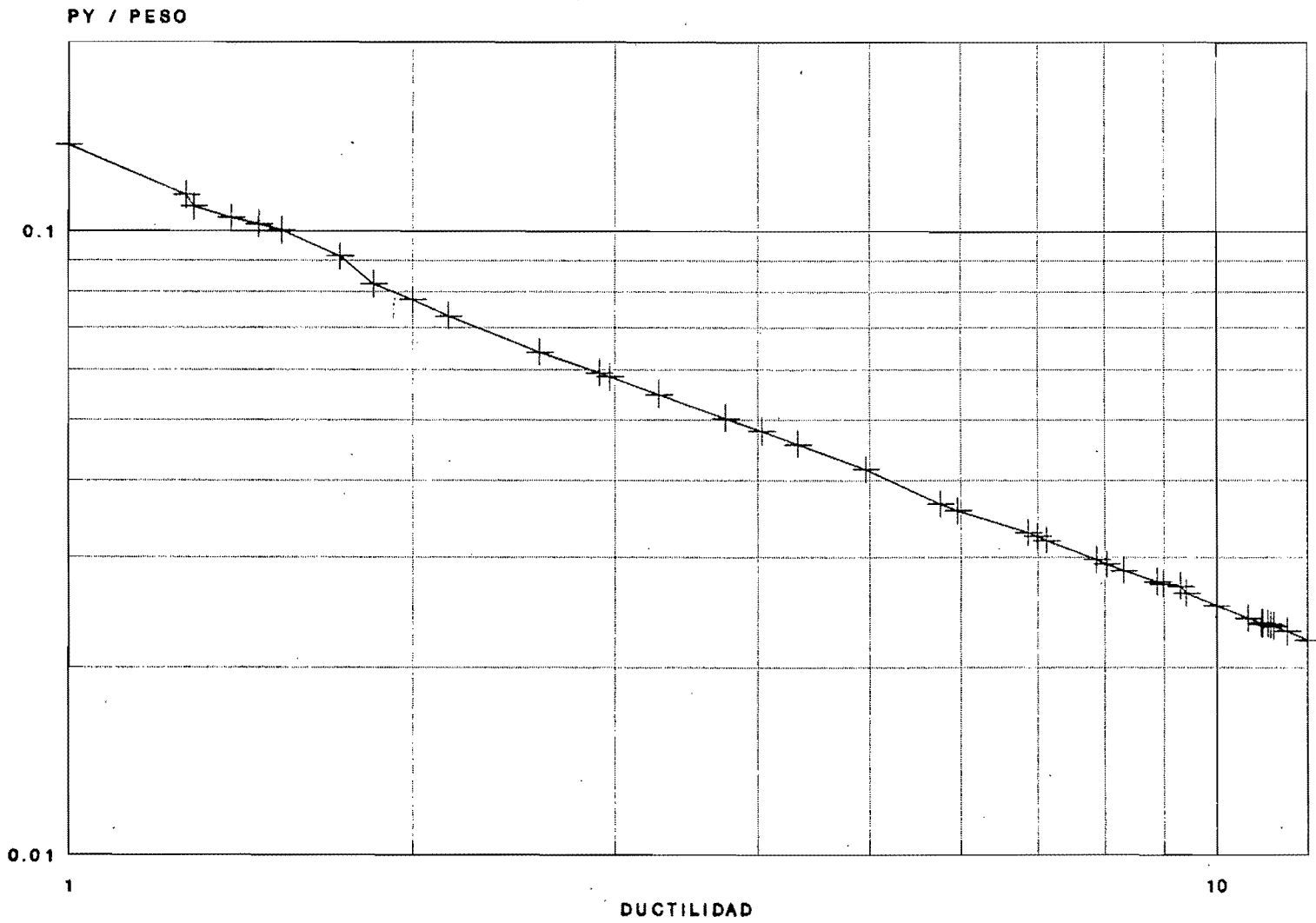
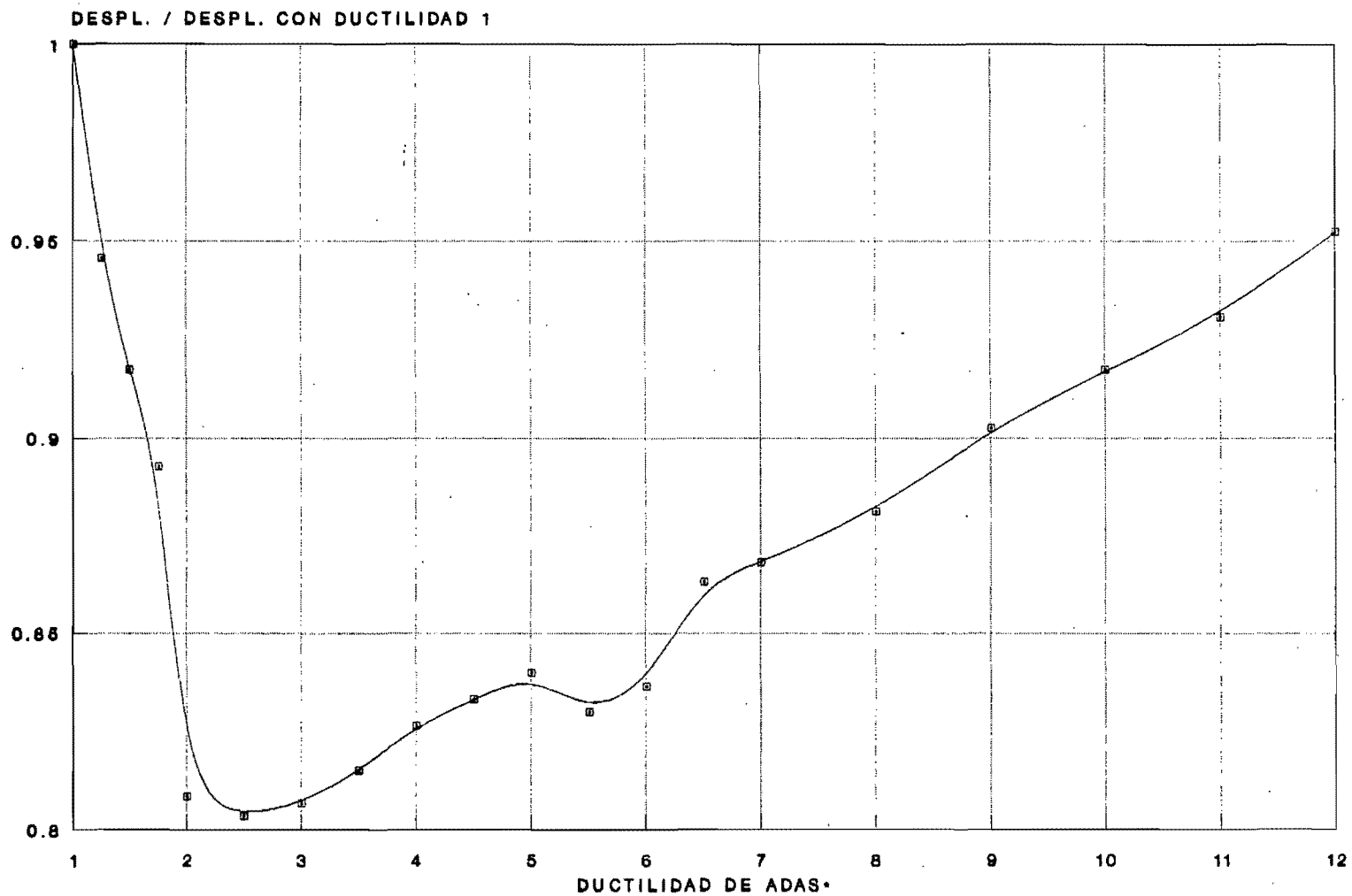


Figura III.21

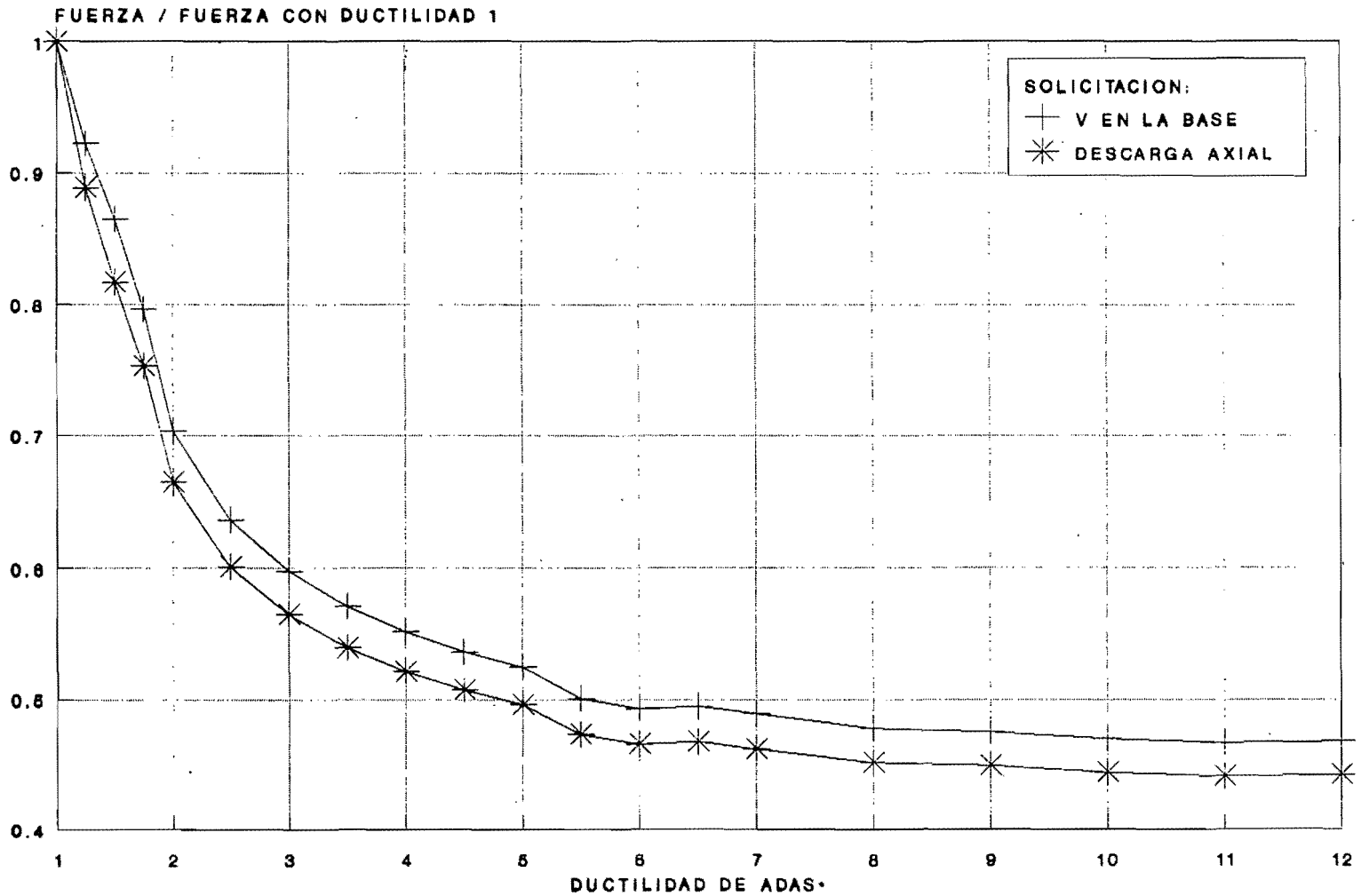
DESPLAZAMIENTO VARIANDO DUCTILIDAD MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD



ACELEROGRAMA SCT1
• CONTRAVIENTO NORMAL CON DUCT. 1
ALPHA=2.07 BETA=4.8

Figura III.22

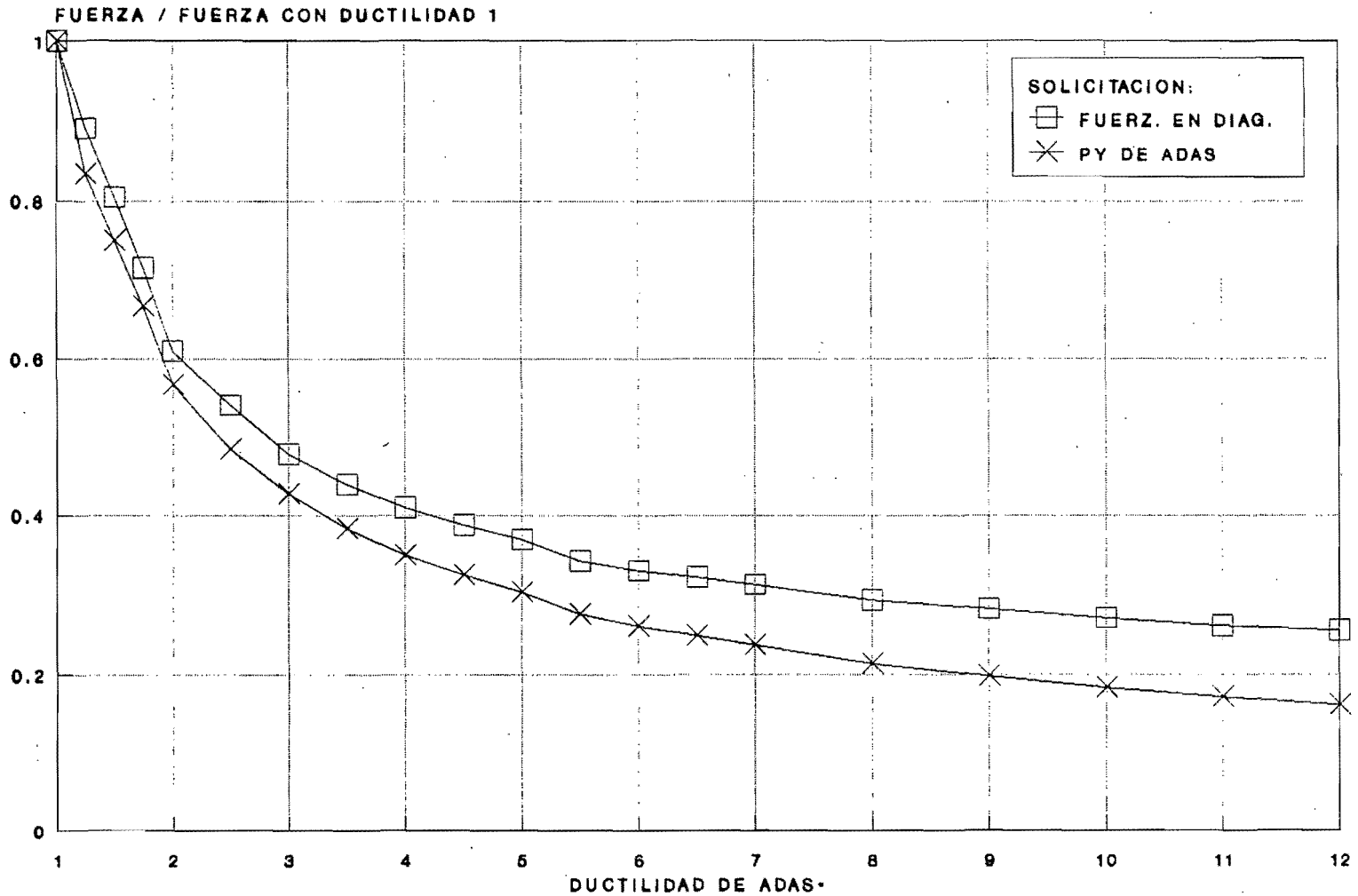
RESPUESTA VARIANDO DUCTILIDAD MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD



ACELEROGRAMA SCT1
- CONTRAVIENTO NORMAL CON DUCT. = 1
ALPHA = 2.87 - BETA = 4.8

Figura III.23

RESPUESTA VARIANDO DUCTILIDAD MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD



ACELEROGRAMA SCT1
• CONTRAVENTO NORMAL CON DUCT.=1
ALPHA=2.67, BETA=4.8

Figura III.24

En la figura III.24 se muestran los resultados correspondientes a fuerzas en las diagonales y fuerza de fluencia en los amortiguadores. La gráfica tiene la misma tendencia que en la figura anterior. En este caso la reducción de las fuerzas en las diagonales, respecto al sistema sin ductilidad, no es importante ya que la rigidez del contraviento con amortiguador es:

$$K_a = \beta \cdot K_o = 4.5 \cdot K_o$$

mientras que la rigidez del contraviento sin amortiguador puede ser:

$$K_a = \alpha \cdot K_o = 2.67 \cdot K_o$$

Resumiendo: para la combinación de periodo de la estructura, periodo dominante del sismo, y relación de rigidización propuestos, el valor de la ductilidad influye mucho en la respuesta del sistema. Al ver la figura III.9, donde se compara un sistema con ductilidad 1 (contrav. tradicional) y ductilidad 5 (con amortiguadores) se notará que la respuesta sí disminuye mucho donde el periodo de la estructura reforzada es cercano al periodo dominante de la excitación sísmica, y poco, cuando no sucede esto.

III.6 RANGO DE MAYOR EFICIENCIA DE LOS AMORTIGUADORES ADAS.

De acuerdo a lo expuesto, los disipadores ADAS mejoran la respuesta de las estructuras en comparación con un contraviento

tradicional. El grado en que la respuesta es menor con amortiguadores, depende de la relación entre el periodo de la estructura reforzada y el periodo dominante de excitación del suelo. Cuando esta relación tiene un número cercano a uno, los amortiguadores reducen mucho la respuesta.

En el párrafo anterior y en los siguientes, al decir periodo de la estructura, se debe entender que se trata del periodo de la estructura incluyendo su interacción con el suelo.

Se mostró cómo el reforzamiento con amortiguadores requiere de más material para llegar al mismo valor de rigidización que el sistema tradicional, por lo que se debe pensar en rigidizar menos cuando se amortigua para dar una solución económica.

En el capítulo II se indicó el hecho de que conforme el amortiguador presente mayor ductilidad alarga el periodo del sistema, lo que nos hace pensar que su trabajo no es tan eficiente como el tradicional cuando la relación entre el periodo de la estructura reforzada y el periodo dominante de la excitación del suelo tiene valores cercanos a uno, pero menores. Esto se debe a que un contraventeo tradicional puede aumentar la rigidez mas económicamente y reducir la ordenada espectral, mientras que un refuerzo con ADAS no puede aumentar mucho la rigidez y al

perder rigidez el sistema por la ductilidad desarrollada alarga su periodo y se ve sometido a esfuerzos mayores.

Tomando en cuenta estos puntos, en la figura III.25 se muestra un espectro de respuesta donde se marcan 4 zonas. En las ordenadas se muestra el periodo de la estructura original (antes del reforzamiento). En la primera zona, correspondiente a estructuras de periodo menor al del movimiento y con ordenadas espectrales bajas en donde la reducción en la ordenada por comportamiento no lineal es muy pequeña, el sistema de refuerzo mas económico es el tradicional.

La zona dos está formada por estructuras con periodo menor, igual o un poco mayor al del movimiento, donde las ordenadas espectrales son muy altas. En esta zona el reforzamiento tradicional es mas eficiente, porque al rigidizar mas a la estructura disminuye sus sollicitaciones.

La tercera zona es donde el amortiguamiento reduce mas la respuesta, ya que se requiere un reforzamiento tradicional muy grande para que la estructura sea capaz de resistir las sollicitaciones a las que estará sometida (cerca de la resonancia), o para lograr acortar el periodo lo suficiente como para reducir las, mientras que un amortiguamiento reducirá las ordenadas al disipar

ESPECTRO DE RESPUESTA REGISTRO SCT1

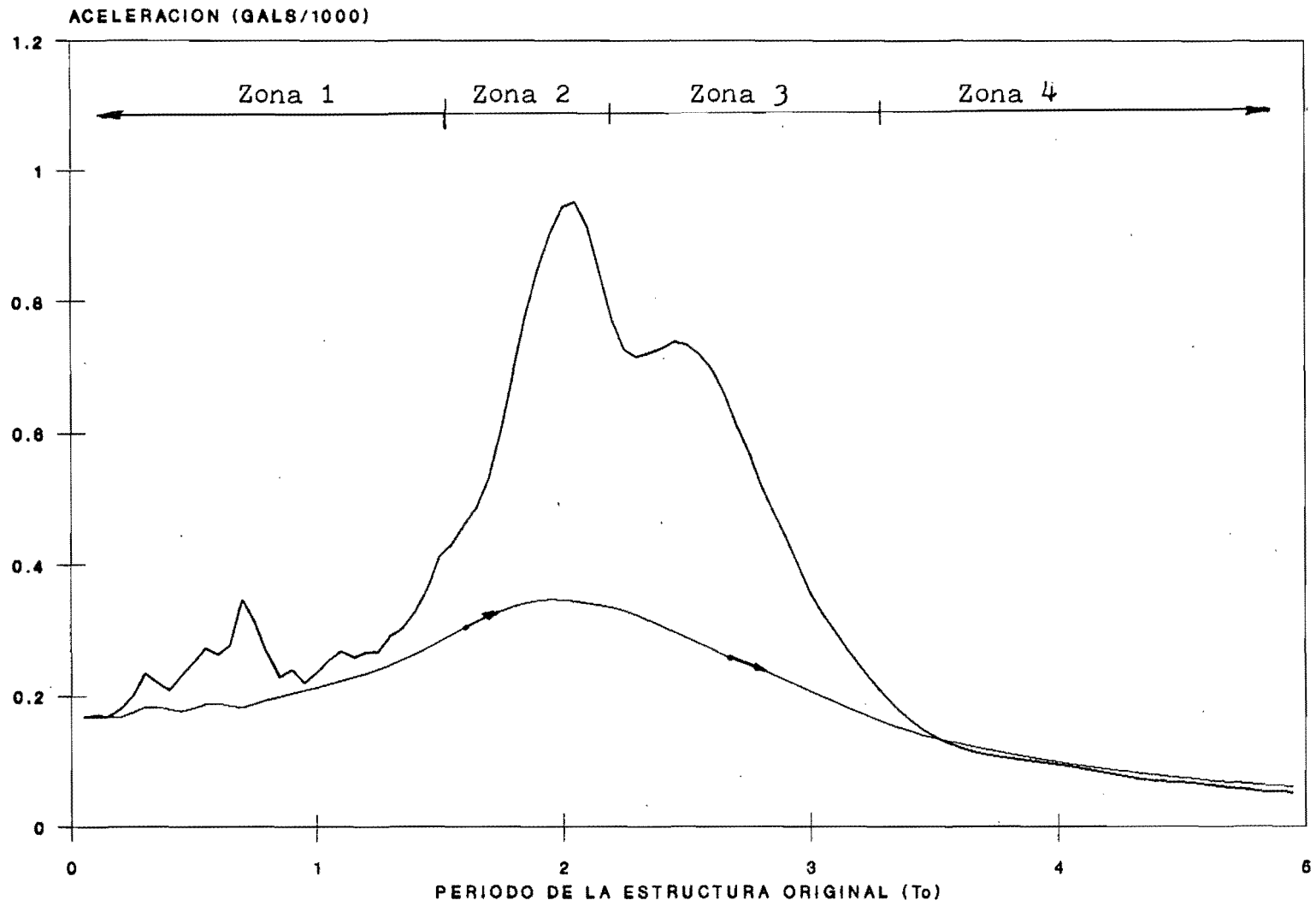


Figura III.25

energía, sin necesitar una rigidización tan grande.

La cuarta zona corresponde nuevamente a ordenadas bajas en donde el diseño del refuerzo puede estar regido por los desplazamientos relativos de entrepiso y en donde la rigidización por medio de contraventeos resulta más económica.

Para la determinación de la zona en la que se encuentra una estructura, es muy importante tener en cuenta la interacción Suelo-Estructura, ya que se puede clasificar a la estructura en una zona en la que no corresponde y optar por un sistema de reforzamiento que no es el mas adecuado.

CAPITULO IV

COMPARACION DE RESULTADOS EN UN MODELO DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

En el capítulo anterior se presentaron las diferencias en el comportamiento sísmico de modelos de un grado de libertad, reforzados con un contraventeo tradicional o con amortiguamiento. Se hizo notar que hay un rango de periodos de la estructura en el que, para un sismo con características determinadas, el amortiguador reduce considerablemente sus solicitaciones.

Se mencionó que los amortiguadores ADAS son de patente extranjera, lo que no permite que el gran beneficio en el comportamiento que se puede lograr con ellos se vislumbre a priori también en el costo de la reparación.

IV.1 MODELO DE 16 NIVELES.

Se propuso para los análisis una estructura de concreto reforzado de 16 niveles (49 m de altura) y 4 crujiás de ocho metros de claro, la cual se diseñó de acuerdo al Reglamento del Departamento del Distrito Federal de 1976.

Las siguientes suposiciones se hicieron en cuanto a las características de la estructura para hacer el diseño original:

- Por su uso pertenece al grupo B1.
- Por su localización está en la zona III. Cortante sísmico $C=0.24$.
- Factor de ductilidad o de comportamiento sísmico: $Q=4$.
- Los elementos no estructurales están debidamente desligados.
Desplazamiento relativo máximo de entrepiso = $0.016 \cdot H$.
- Resistencia del concreto: $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$.
- Módulo de elasticidad del concreto: $E=10000 \cdot \sqrt{(f'c)}$.
- Fuerza de fluencia del acero de refuerzo: $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.
- Peso del nivel tipo: $CM + CVR = 930 \text{ kg/m}^2$.
- Ancho tributario del marco: 8 m.
- Peso total de la estructura: $W_t = 930 \cdot 8 \cdot 32 \cdot 16 = 3809 \text{ ton}$.

Se aplicaron a la estructura las fuerzas laterales estáticas calculadas de acuerdo al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1976. Para hacer el análisis se utilizó el programa ETABS.

El desplazamiento en el nivel N15 es:

$$D = 13.26 \text{ cm} \cdot 4 = 53.04 \text{ cm} = 0.0108 \cdot H$$

lo que es menor de 1.8% de la altura que se fijó como máximo para esta estructura. El programa reportó que el periodo del primer modo es 2.31 segundos y que el segundo es de 0.85 segundos.

Del análisis se obtuvieron las siguientes reacciones en la cimentación: 750 toneladas de descarga axial en las columnas extremas y 1050 toneladas en las columnas centrales. Se aceptará que la cimentación de la estructura esta diseñada para soportar las descargas anteriores.

El diseño del refuerzo en los miembros estructurales, indispensable para la obtención de las curvas de interacción, se hizo con la ayuda del postprocesador de diseño CONKER del ETABS.

En la figura IV.1 se presenta la estructura y se indican las dimensiones de sus elementos. En la tabla IV.1 se se listan las capacidades últimas de trabes y columnas, mismas que se usarán en los análisis inelásticos.

La misma estructura se analizó con las solicitaciones del Reglamento de Construcciones emitido en 1987, considerando en esta ocasión un factor de comportamiento sísmico (Q) de 3. Con estas cargas laterales el desplazamiento en la estructura aumentó a:

$$D = 29.52 * 3 = 88.56 \text{ cm} = 0.18 * H$$

desplazamiento que excede al límite de 1.2% de la altura
marcado en Reglamento ahora vigente.

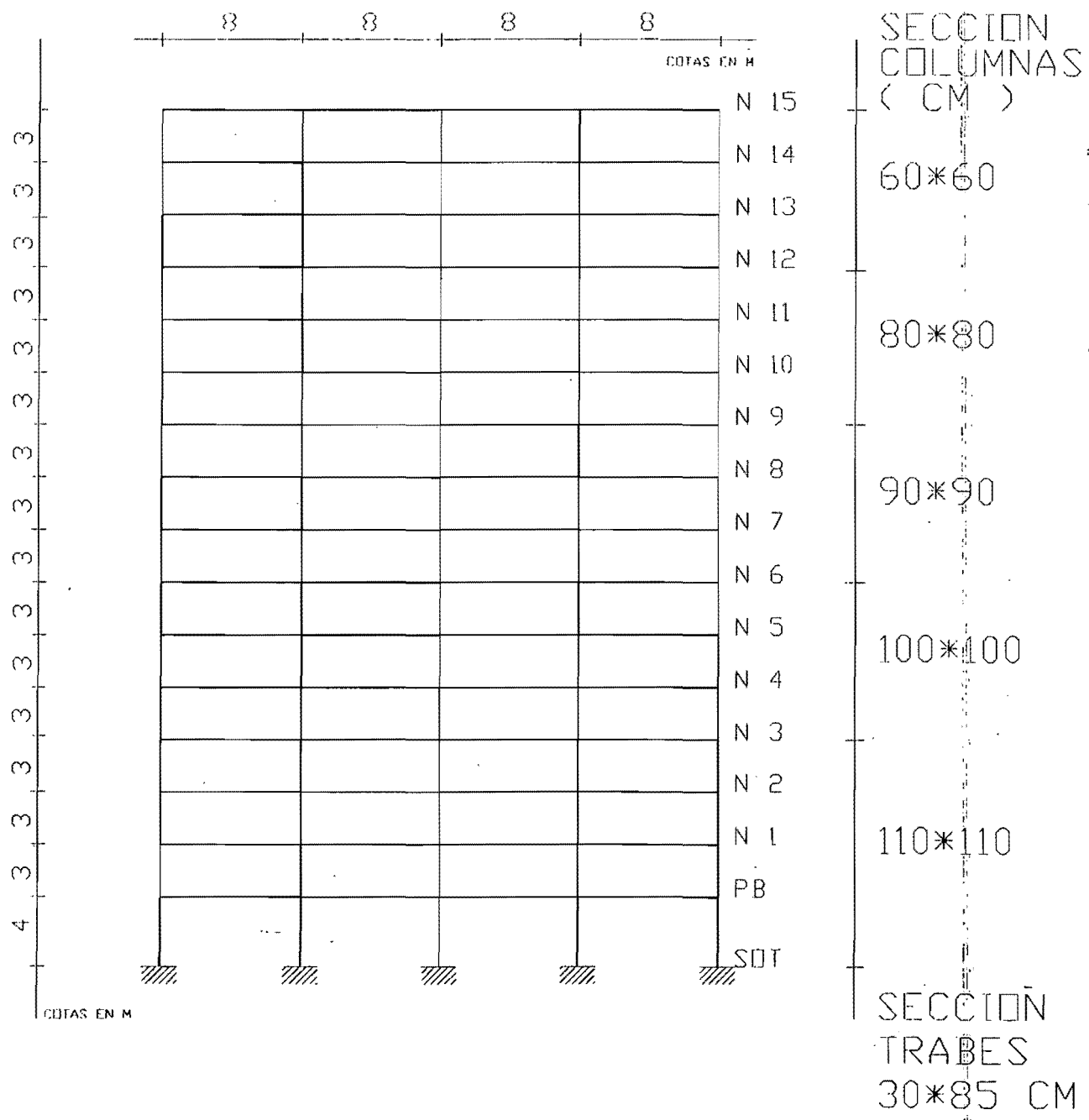


Fig. IV.1 Modelo de 16 niveles

Interacciones de columnas

Niveles	My (ton*m)	Pc (ton)	Pt (ton)	Mb / My	Pb / Pc
SOT a N3	361.30	2792.10	766.10	1.47	0.36
N3 a N6	254.00	2266.80	590.70	1.54	0.36
N6 a N9	198.80	1887.70	532.20	1.47	0.35
N9 a N12	128.70	1460.90	388.60	1.55	0.35
N12 a N15	43.50	775.50	170.40	1.77	0.37

Tabla IV.1a Interacciones de columnas

Interacciones de trabes

Niveles	My+ (ton*m)	My- (ton*m)
SOT a N3	69.30	95.70
N4 a N6	70.40	97.90
N7 a N9	61.60	91.30
N10 a N12	44.00	75.90
N13 a N15	25.30	51.70

Tabla IV.1b Momentos resistentes de trabes

NIVEL	Refuerzo con ADAS		Refuerzo contrav.	
	A diag (cm ²)	Kadas (ton/m)	A diag (cm ²)	A ref col.* (cm ² /ang)
N15	51.40	30000	148.04	20.97
N14	51.40	30000	148.04	20.97
N13	51.40	30000	148.04	20.97
N12	80.72	44000	232.48	35.10
N11	80.72	44000	232.48	35.10
N10	80.72	44000	232.48	35.10
N9	101.63	51000	292.27	35.10
N8	101.63	51000	292.27	35.10
N7	101.63	51000	292.27	35.10
N6	101.63	59000	292.27	44.77
N5	101.63	59000	292.27	44.77
N4	101.63	59000	292.27	44.77
N3	139.39	67000	401.45	54.45
N2	139.39	67000	401.45	54.45
N1	139.39	83000	401.45	54.45
PB	139.39	83000	401.45	54.45

Tabla IV.2 Refuerzos en la estructura

* Refuerzo columna con un ángulo en cada esquina

Los elementos resistentes, columnas y trabes, fueron revisados con las nuevas solicitudes y se encontró a la gran mayoría sobreesforzados. Debido a que las descargas en la cimentación también se incrementaron, los pilotes también están sobreesforzados.

En conclusión, la estructura no es capaz de soportar las cargas del nuevo Reglamento. Por tratarse de una edificación existente hay dos caminos a seguir dependiendo de si la estructura sufrió o no daños durante el sismo de septiembre de 1985. Si al hacerse el peritaje del edificio se clasificaron sus daños como menores, el Departamento del Distrito Federal no obliga que se refuerce. Pero si el peritaje indica otro nivel mayor de daños, sí se tendrán que hacer trabajos de reforzamiento.

IV.2 DATOS DEL ANALISIS PARA DISEÑAR EL REFUERZO.

El Departamento del Distrito Federal exige que se usen fuerzas laterales no menores a las indicadas en su Reglamento de Construcciones, para el diseño de edificaciones nuevas o de refuerzos en estructuras existentes. Entonces, el diseño del refuerzo con contraventeos se puede hacer aplicando las fuerzas laterales indicadas en el reglamento.



Las sollicitaciones marcadas en los reglamentos son envolventes de sismos de diseño en distintos lugares de la ciudad. Sin embargo, para el diseño de un sistema amortiguado es necesario conocer con más detalle las características del movimiento en la zona del edificio. Para satisfacer esta necesidad se puede recurrir al uso de registros escalados cerca de la edificación o a la generación de espectros e historias para el sitio, a partir de los resultados de pruebas de cono dinámico.

El Reglamento de Construcciones obliga a usar al menos 4 registros para hacer los diseños con un análisis paso a paso. Para el análisis se permite el uso de acelerogramas, medidos o artificiales, que sean representativos del terreno. Por simplicidad en este trabajo solamente se usará un acelerograma para hacer el diseño del refuerzo.

Los espectros de respuesta de movimientos, registrados en sismos intensos o los generados para el sitio, en general tienen ordenadas máximas mayores a las del reglamento. Otra peculiaridad de estos espectros es que el rango de ordenadas máximas es pequeño en comparación con el del reglamento, lo que se debe a que se trata de un registro específico para la zona.

Debido a que el diseño del sistema con ADAS debe hacerse con

un acelerograma, al que corresponde un espectro de ordenadas mayores a las del reglamento, no se considerará adecuado hacer una comparación de refuerzos con estos diferentes métodos de diseño. Por esta razón, ambos refuerzos se diseñaron para tener un comportamiento adecuado si se ven solicitados con el acelerograma usado en los análisis.

El diseño del sistema con ADAS permitirá que la estructura desarrolle como máximo una ductilidad de 2, mientras que en el reforzamiento con contraventeos, la ductilidad máxima a permitir será 4.

El objetivo de la comparación, es analizar en el caso más desfavorable, que tanto beneficio se obtiene mediante la adición de amortiguadores. Para cumplir con el objetivo debemos seleccionar una combinación de periodos de la estructura y del suelo, para que la estructura se ubique en la región de periodos marcada como zona III en la figura III.25.

En este análisis, para simplificar los cálculos, no se tomará en cuenta la interacción Suelo-Estructura, pero para el diseño de una estructura real sí se debe tomar en cuenta. Con esto en mente y que el periodo original de la estructura es de 2.31 seg, se debe seleccionar algún acelerograma con ordenada espectral máxima

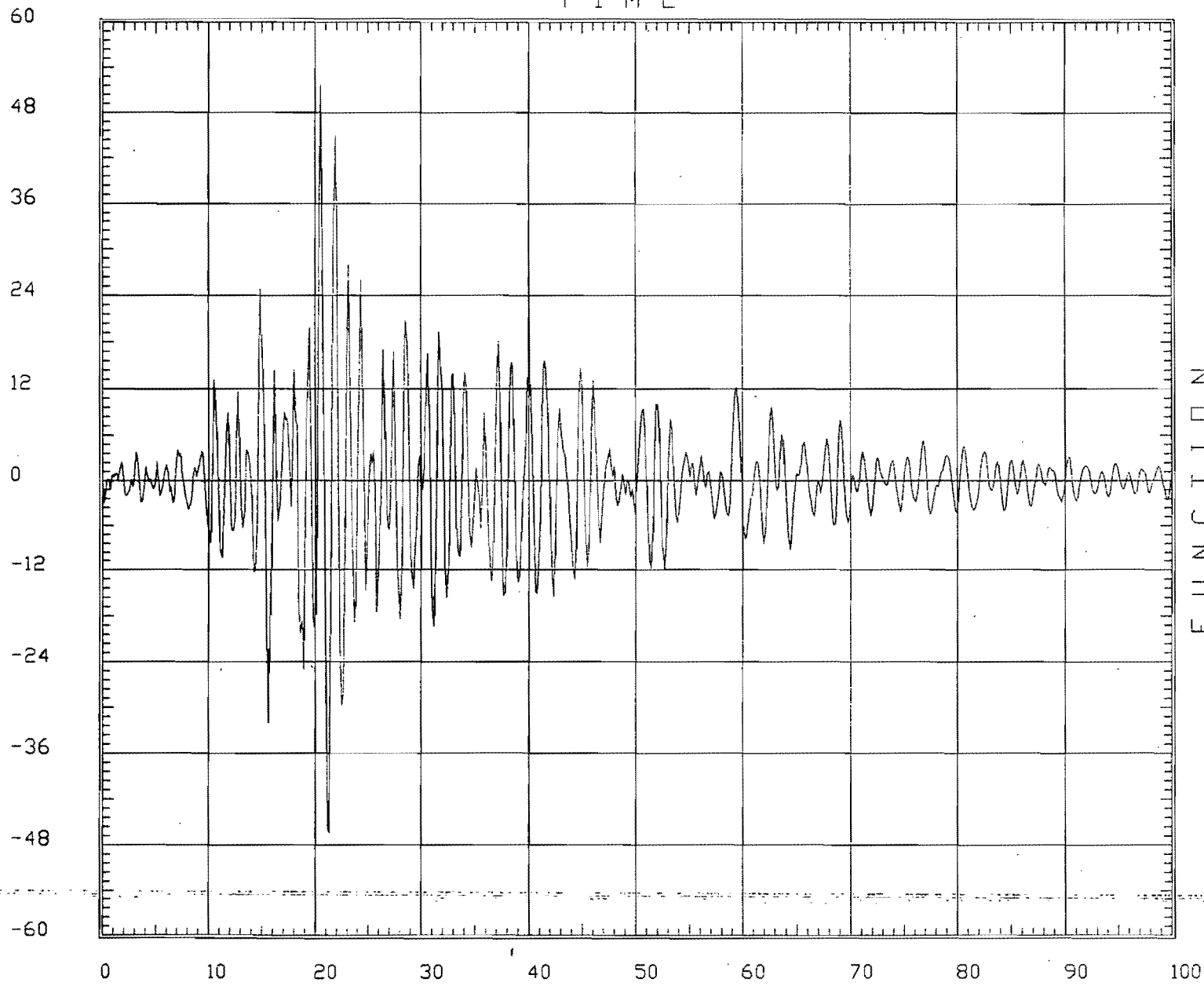
en un periodo de 1.5 segundos o ligeramente menor.

De entre los acelerogramas disponibles se optó por usar el registro del sismo del 25 de abril de 1989 en la estación 44 a cargo del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A.C. (CIRES) de la Fundación Javier Barros Sierra. La estación 44 se localiza en la unidad Colonial del Instituto Mexicano del Seguro Social, en Villalongín 117, Colonia San Rafael, que de acuerdo a la zonificación sísmica de la ciudad corresponde a zona 4.

En la figura IV.2 se muestra el registro Norte-Sur de la estación 44 en los 100 segundos del movimiento más intenso. El registro corresponde a un sismo de magnitud muy pequeña, por lo que no puede usarse como base en un diseño. Por esta razón, el registro se escaló para representar un movimiento de magnitud igual a la de septiembre de 1985.

Para escalar la señal se siguió el siguiente criterio: se conoce la aceleración máxima del suelo registrada en SCT en 1985 (165.4 gals componente E0), y además se conoce la aceleración máxima que registro la estación en SCT el 25 de abril de 1989 (37.9 gals componente E0). Si se acepta que ambos eventos sísmicos tienen la misma relación de incremento en las aceleraciones máximas registradas, la aceleración máxima en la estación 44 en

T I M E



BASE MOTION
TYPE A
DIRN XT

ENVELOPES
MIN
-4649E+02
AT 21.45000
MAX
.5167E+02
AT 20.70000

Figure IV.2
FILE : ACEL_44
TIME HISTORY TRACE
FACTOR : .100E+01

SAP90

el sismo de 1985 debió haber sido:

$$a_{\text{máx85}} = (165.4/37.9) * a_{\text{máx89}} = 4.36 * a_{\text{máx89}}$$

La aceleración máxima en la componente Norte-Sur registrada en la estación 44 en 1989 fué 51.67 gals, por lo que la aceleración máxima correspondiente a 1985 debió ser 225.49 gals.

En la figura IV.3 se presentan los espectros de respuesta, para 5% de amortiguamiento, del registro sin escalar y escalado en la estación 44. Puede observarse que las ordenadas máximas se presentan en estructuras con periodos entre 1.1 seg y 1.4 seg y que la ordenada espectral máxima es superior a una 'g'. En la figura se incluye también el espectro de respuesta del registro de 1985 en SCT.

El análisis de las estructuras se hizo con el programa de análisis no lineal DRAIN2D. Para el análisis se escogieron los 25 segundos del registro donde las aceleraciones son las máximas. El paso usado para la integración numérica fué 0.04 segundos.

IV.3 REFUERZO CON AMORTIGUADORES.

Para reforzar la estructura se colocaron los amortiguadores y sus contraventeos en las dos crujías extremas (ver figura IV.4). Debido a que entre mas se rigidice la estructura las sollicitaciones serán mayores, se buscó una rigidización pequeña.

ESPECTROS DE RESPUESTA

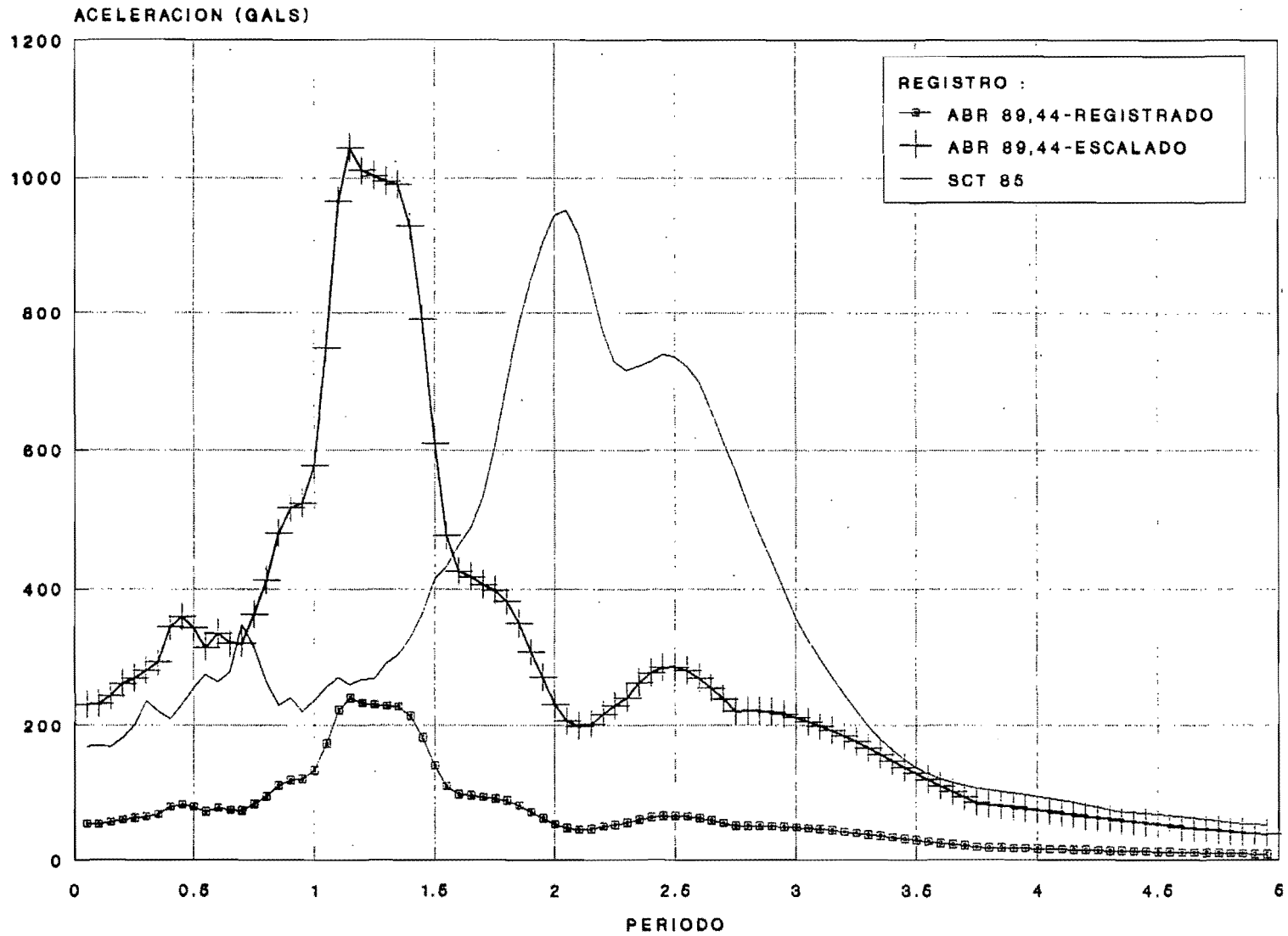


Figura IV.3

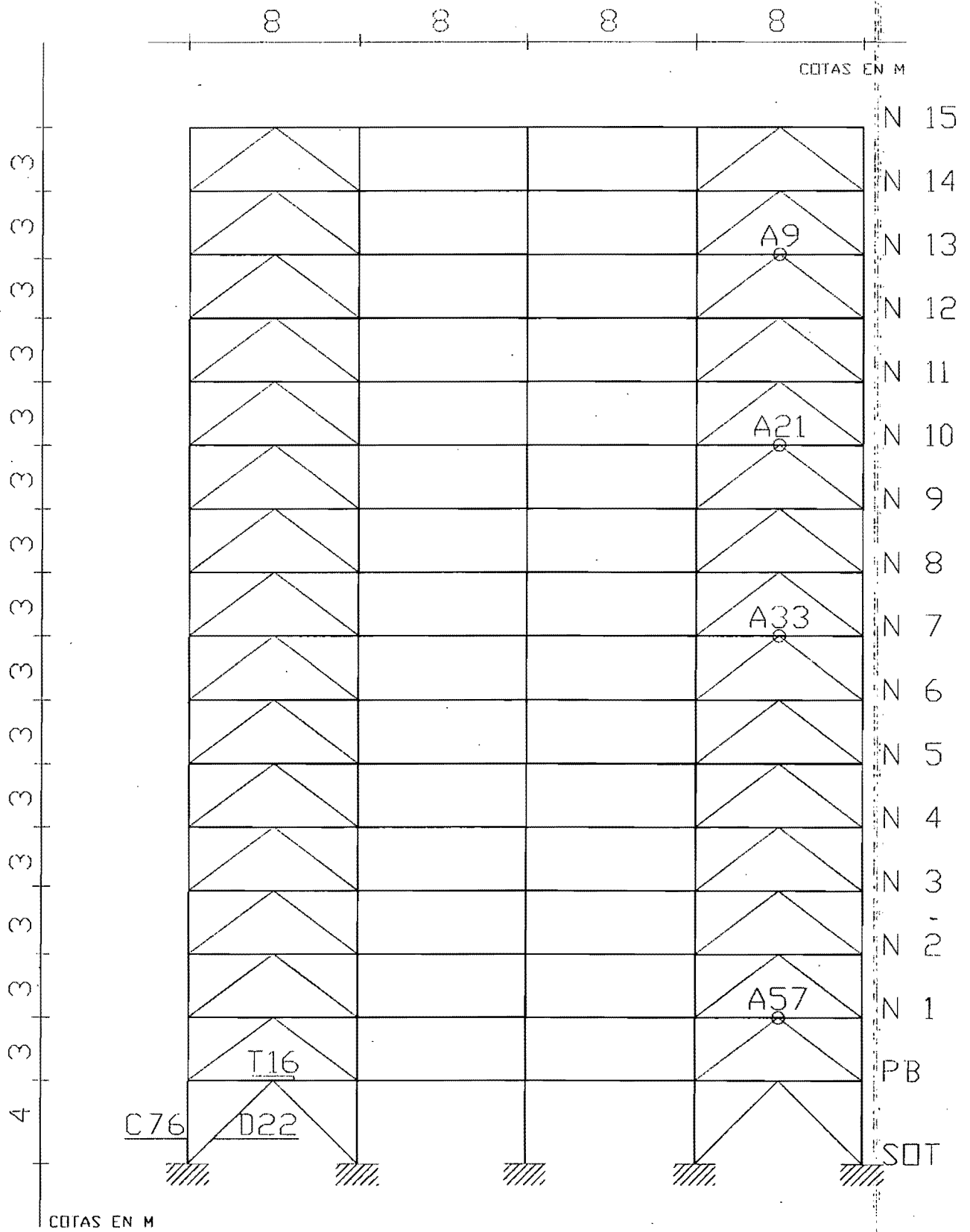


Fig. IV.4 Refuerzo de la estructura.

Se propuso que la rigidez de los amortiguadores fuera la misma que la del sistema de contraventeo ($\beta=1$) y a su vez aproximadamente 3 veces la rigidez lateral del nivel correspondiente. La variación de las secciones de los contraventeos y la rigidez de los amortiguadores se puede ver en la tabla IV.2.

Con el refuerzo propuesto se redujo el periodo inicial de la estructura de 2.31 a 1.48 segundos, lo que implica que la rigidez del marco se aumentó en 1.42 veces.

Las curvas de interacción de columnas y los momentos resistentes de trabes se introdujeron al programa para tomar en cuenta el comportamiento no lineal de los mismos. El valor de la fuerza de fluencia de los disipadores se fué ajustando en cada corrida, para lograr que desarrollaran una ductilidad grande, pero no mayor de cinco.

El proceso de corrección de las fuerzas de fluencia resulta muy complicado y consume mucho tiempo de computadora. Se debe buscar una distribución mas o menos uniforme en la altura de las ductilidades e ir la cambiando poco a poco hasta llegar a valores adecuados. Si en algún nivel se ha logrado una ductilidad de 5, pero en otro de ellos la ductilidad reportada implica un cambio

relativamente importante en la fuerza de fluencia para la siguiente iteración, la ductilidad en los demás niveles, incluyendo el que tiene ductilidad adecuada, cambiarán.

Una vez determinados los valores mas adecuados de P_y y δ_y se hizo el diseño de las placas de los amortiguadores, suponiendo que los amortiguadores estan hechos con acero A-36. En la tabla IV.3 se listan los valores de P_y y δ_y del diseño final, la ductilidad máxima y el tamaño, espesor y número de placas que deben tener los amortiguadores.

En las figuras IV.5 y IV.6 se gráficó la variación de la fuerza y deformación de 4 amortiguadores, ver figura IV.4 para determinar su localización.

El análisis final reportó que el cortante máximo en la base de la estructura fué 739.58 toneladas, es decir, 19.35% de su peso. Las descargas máximas de las columnas extremas fueron 1797 toneladas de compresión y 748 toneladas en tensión. En las columnas interiores, pertenecientes a las crujías contraventeadas, la descarga máxima fué de 1818 toneladas en compresión y 15 toneladas en tensión. La descarga máxima en la columna central fué de 970 ton en compresión. El desplazamiento máximo de la estructura resultó ser 30.7 cm.

Nivel	Py (kg)	Dy (m)	Dimensiones de ADAS		
			espesor t (in)	peralte 2a (in)	número de placas
N15	40000	0.00133	1	6	3
N14	68000	0.00227	1	7	4
N13	76000	0.00253	1	8	5
N12	116000	0.00264	1	8	7
N11	116000	0.00264	1	8	7
N10	116000	0.00264	1	8	7
N9	168000	0.00329	1	9	10
N8	168000	0.00329	1	9	10
N7	168000	0.00329	1	9	10
N6	176000	0.00298	1	8	11
N5	176000	0.00298	1	8	11
N4	176000	0.00298	1	8	11
N3	196000	0.00293	1	8	12
N2	196000	0.00293	1	8	12
N1	176000	0.00212	1	7	11
PB	176000	0.00212	1	7	11

Tabla IV.3 Diseño de los amortiguadores

FUERZA EN LOS AMORTIGUADORES MODELO DE 16 NIVELES

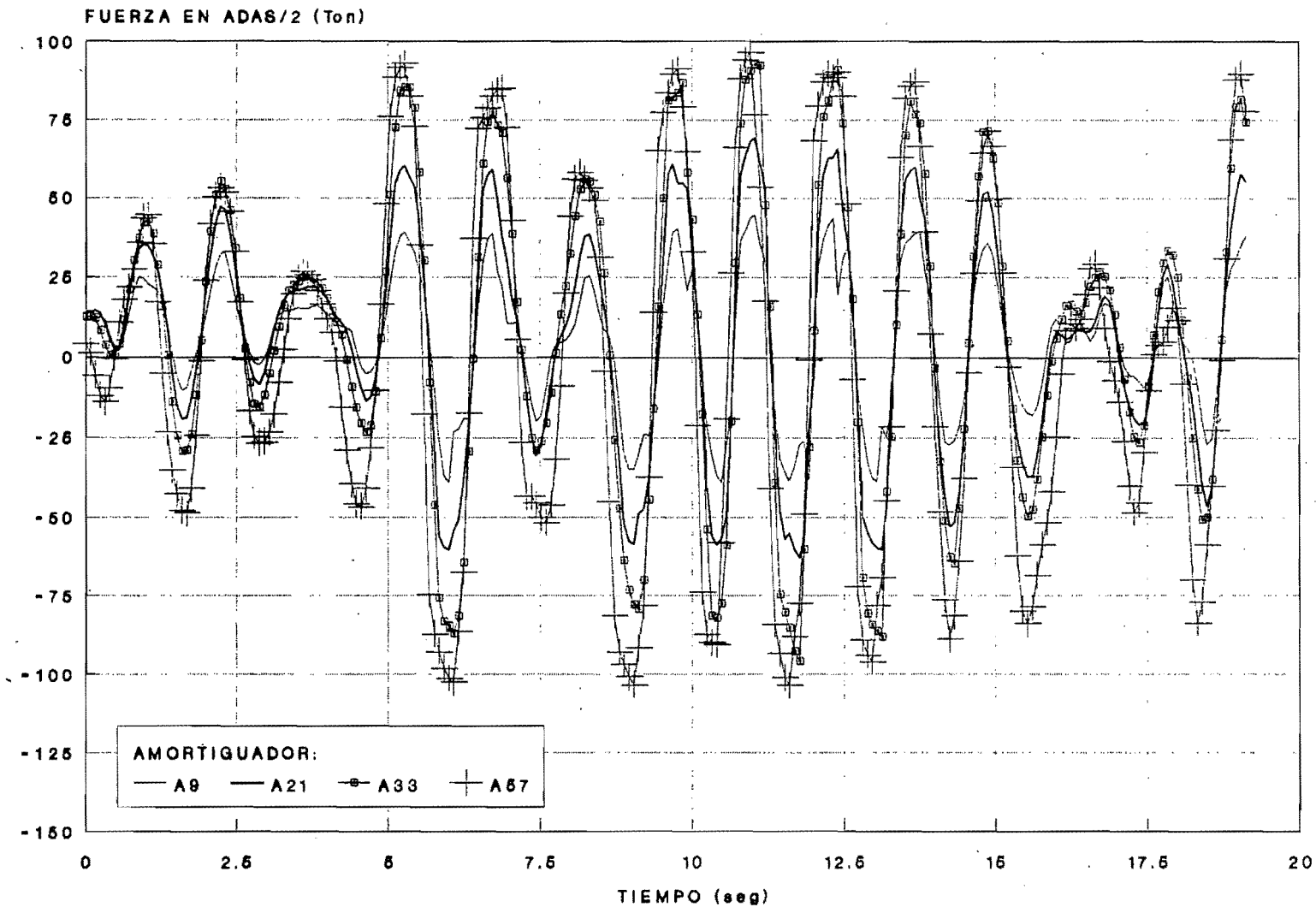


Figura IV.5

DEFORMACION EN AMORTIGUADOR MODELO DE 16 NIVELES

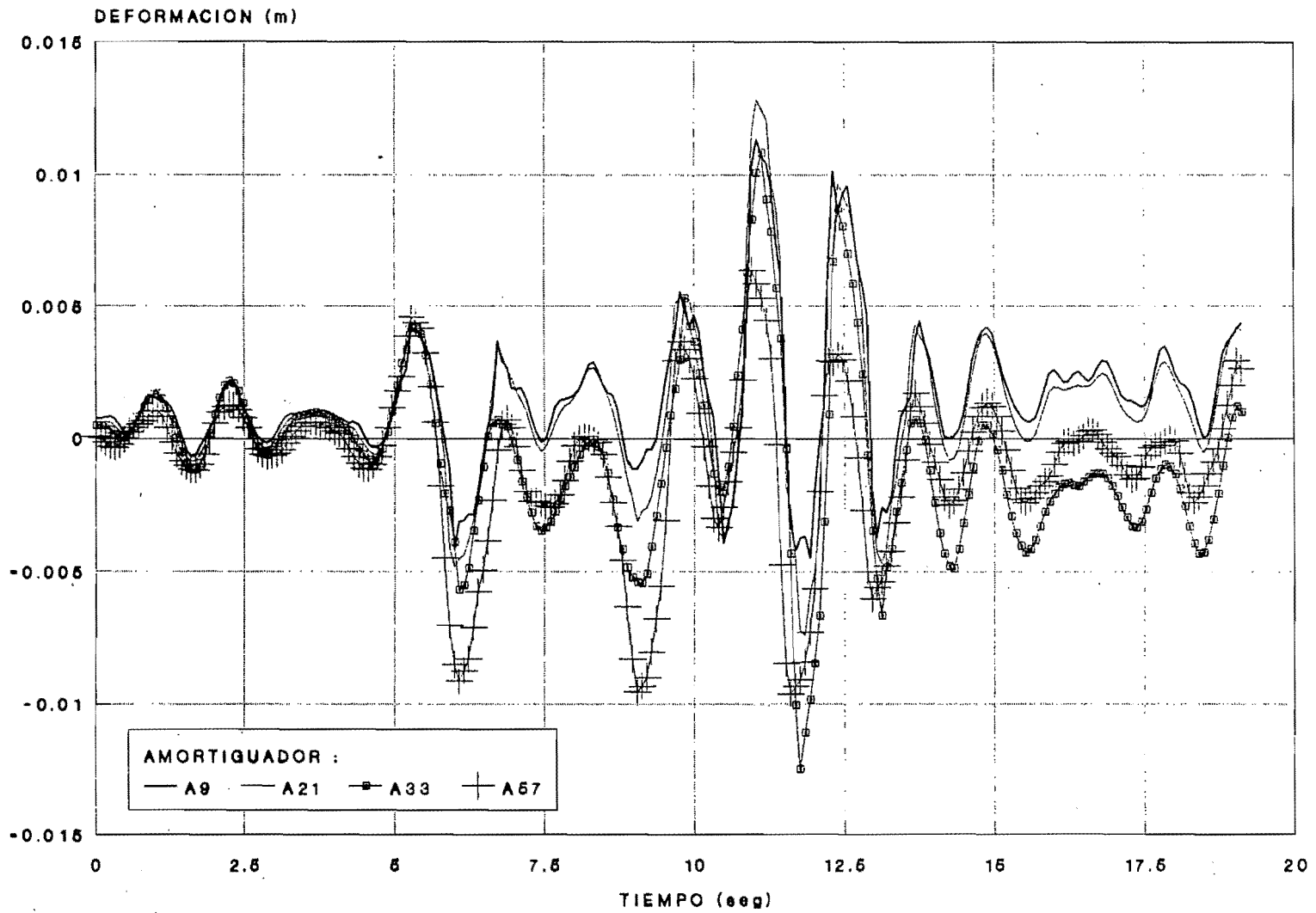


Figura IV.6

IV.4 REFUERZO CON CONTRAVENTEEO TRADICIONAL.

Para este reforzamiento se propone también contraventear las dos crujías extremas. Como primer análisis se propusieron secciones de contraventeo menores a las usadas en el reforzamiento con ADAS. El periodo fundamental de la estructura resultó ser de 1.46 segundos, es decir, que la rigidez se aumentó en 1.49 veces.

Con este primer análisis las acciones en la estructura resultaron bajas, inclusive menores que con el refuerzo con amortiguadores. El desplazamiento máximo de la estructura, las descargas y el cortante máximo en la base resultaron similares a lo reportado en el sistema con amortiguadores. Sin embargo, al revisar los elementos mecánicos en las diagonales se encontró que la gran mayoría de ellas no tenía la resistencia adecuada, por lo que fué necesario aumentar su área y, en consecuencia, su rigidez.

Al vernos forzados a aumentar la rigidez de la estructura, las solicitaciones en la misma resultaron mayores y en cada nuevo análisis se fué aumentando el área del sistema de contraventeo. Las fuerzas cada vez mayores a las que se veía sometida la estructura se reflejaron rápidamente en fuerzas axiales de compresión y tensión elevadas en las columnas, este hecho obligó a un reforzamiento importante en ellas con ángulos de acero en sus

esquinas.

El proceso de incrementar cada vez mas la rigidez, llevo a la estructura a un periodo inicial de 1.13 segundos, es decir, a una rigidez 4.2 veces la original ($\alpha'=3.2$). En la tabla IV.2 se indica el área final de diagonales y de los ángulos en las esquinas de las columnas.

El análisis definitivo indicó un desplazamiento máximo de 34.8 cm, y un cortante en la base máximo de 1864.3 toneladas, es decir 48.78% de su peso. Las descargas máximas a la cimentación en las columnas extremas fueron de 3937 toneladas en compresión y 2757 toneladas en tensión. Las columnas interiores pertenecientes a crujiás contraventeadas descargaron 3835 toneladas en compresión y 2150 toneladas en tensión. La columna central descargó 981 toneladas en compresión.

IV.5 COMPARACION DE RESPUESTAS.

Resulta claro que la combinación usada de periodo de la estructura y periodo dominante del suelo, hace que el sistema contraventeado no tenga un comportamiento adecuado. Sin embargo, debemos recordar que el diseño del sistema contraventeado se hizo con un análisis paso a paso, pero que de haberse hecho siguiendo el Reglamento del D.F. se hubiera diseñado el refuerzo con un

cortante en la base de cuando mucho 20% de su peso (considerando $Q=2$), en vez de 48.78%, y estar de acuerdo con la ley.

El comportamiento de la estructura reforzada de acuerdo con el Reglamento del D.F. ante el sismo de diseño, en caso de llegar a presentarse durante su vida útil, no hubiera sido adecuado. Para hacer la comparación mas justa, el diseño de ambos refuerzos se hizo de tal forma que su comportamiento fuera similar durante el mismo sismo de diseño.

A las dos estructuras reforzadas se le aplicó una fuerza lateral triangular cada vez mayor, para determinar su curva de cortante-desplazamiento máximo. En la figura IV.7 se muestran las curvas de ambos refuerzos, así como la de la estructura original. En la gráfica se puede apreciar la resistencia lateral y rigidez tan elevada que se le proporcionó a la solución con contraventeos para lograr que tuviera un comportamiento adecuado, y la diferencia en comportamiento, con respecto a la estructura amortiguada.

En la figura IV.8 se graficó la historia en desplazamientos y aceleraciones del nivel más alto de la estructura con ambos sistemas de refuerzo. En la figura IV.9 están graficadas las envolventes de desplazamientos y aceleraciones para cada nivel del edificio. En estas figuras se puede ver que los despla-

CORTANTE - DESPLAZAMIENTO LATERAL MODELO DE 16 NIVELES

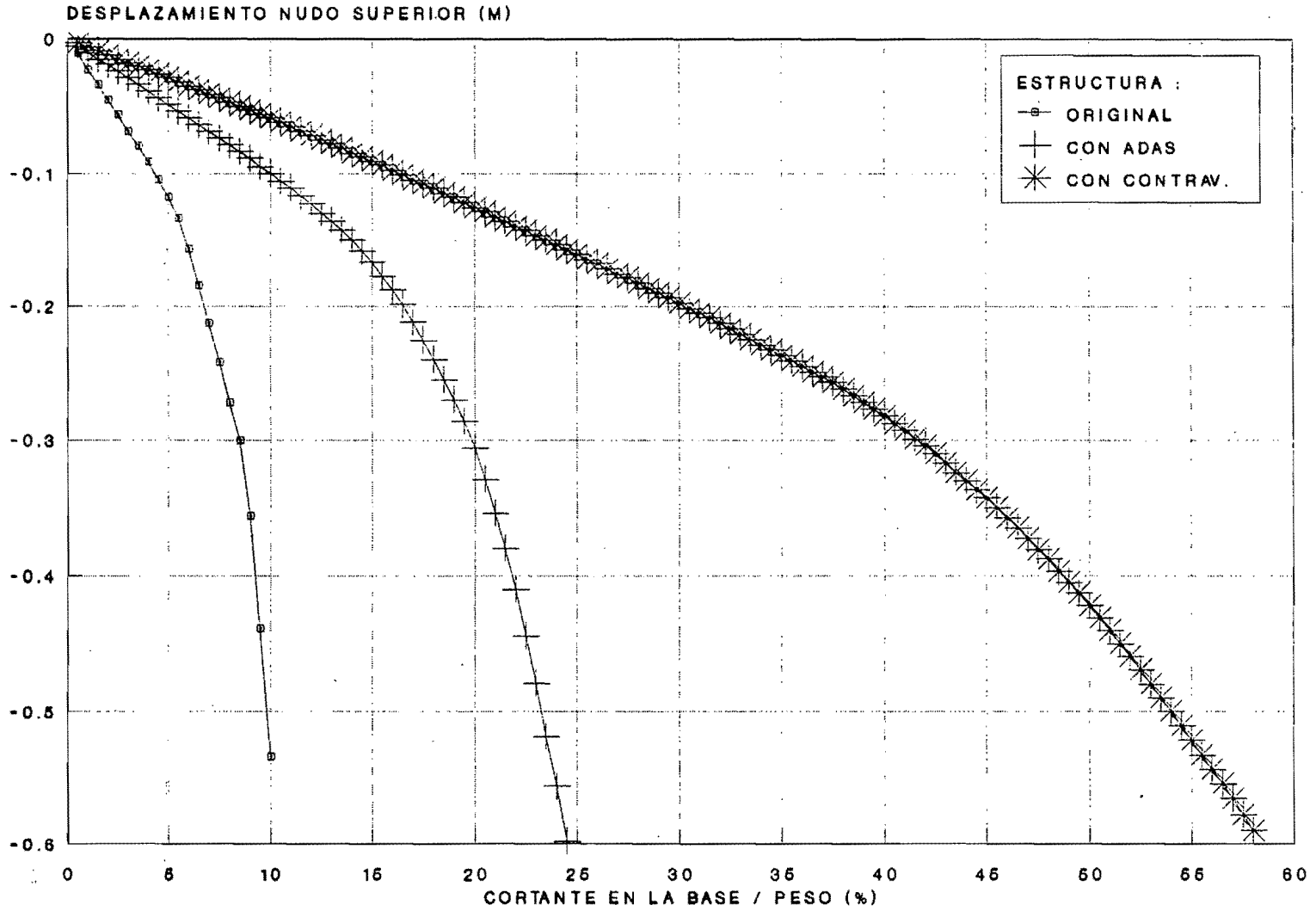
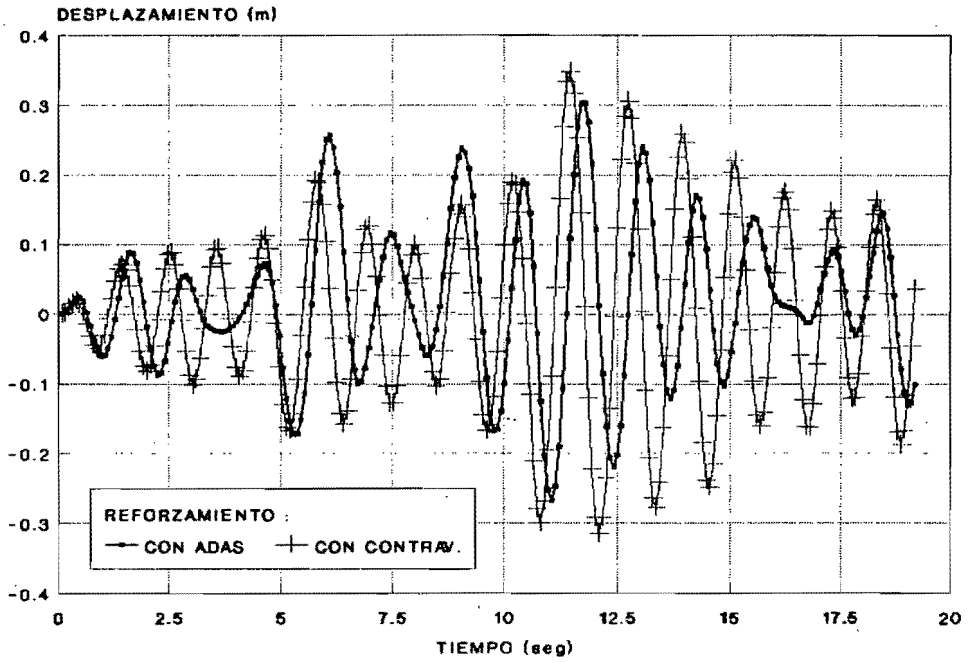
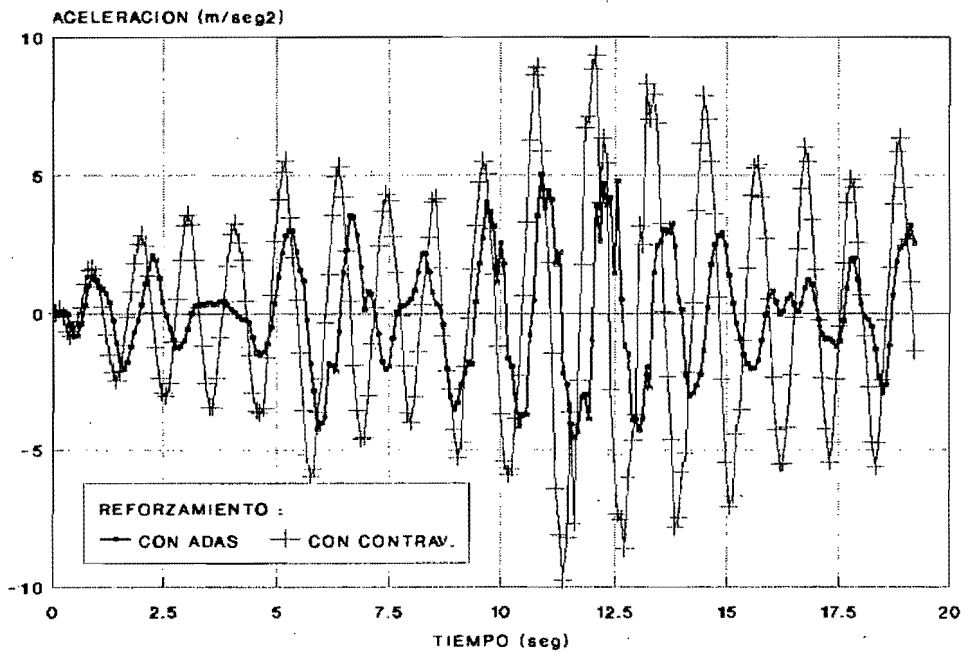


Figura IV.7

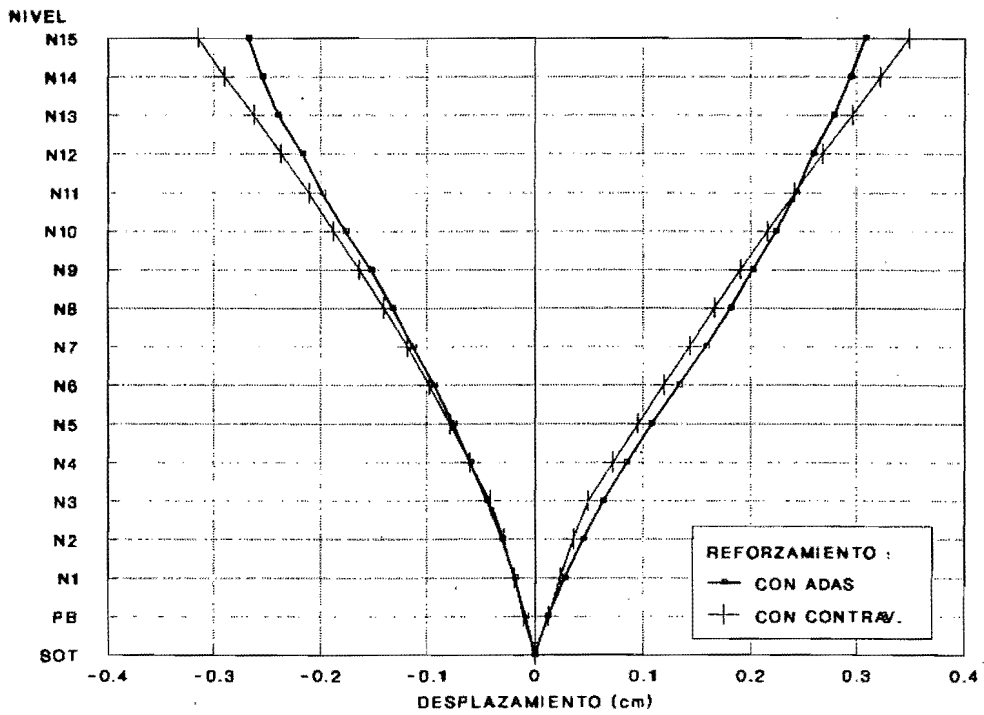
DESPLAZAMIENTO EN EL NIVEL N15 MODELO DE 16 NIVELES



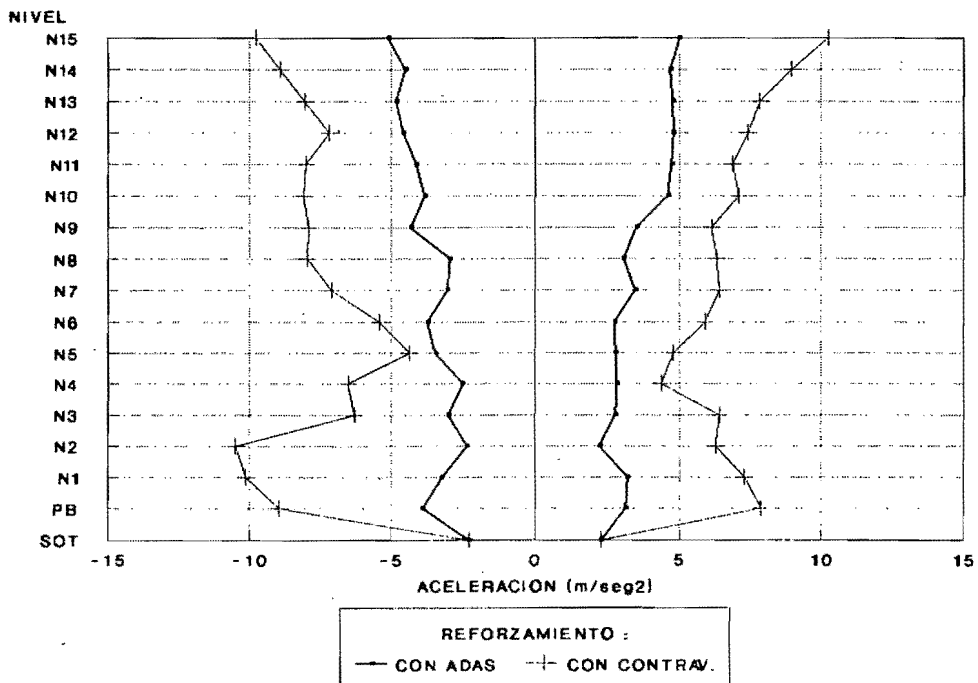
ACELERACION EN EL NIVEL N15 MODELO DE 16 NIVELES



DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS



ACELERACION MAXIMA



ACELEROGRAMA EST.44 ESCALADO

Figura IV.9

zamientos en ambos refuerzos son muy parecidos, pero en las aceleraciones sí hay diferencias importantes.

En las figuras IV.10 y IV.11 se presentan las historias de cortantes en la base y descargas a la cimentación en una de las columnas extremas, para ambos refuerzos. En ellas se puede notar la gran diferencia que hay en las respuestas.

Se consideró necesario contar con historias de los elementos mecánicos de los elementos que forman la estructura, en la figura IV.4 se pueden ver a que elementos corresponden las graficas de las figuras IV.12 a IV.15. En las gráficas se puede apreciar que las fuerzas axiales son menores en el sistema amortiguado, pero los momentos en general resultan mayores.

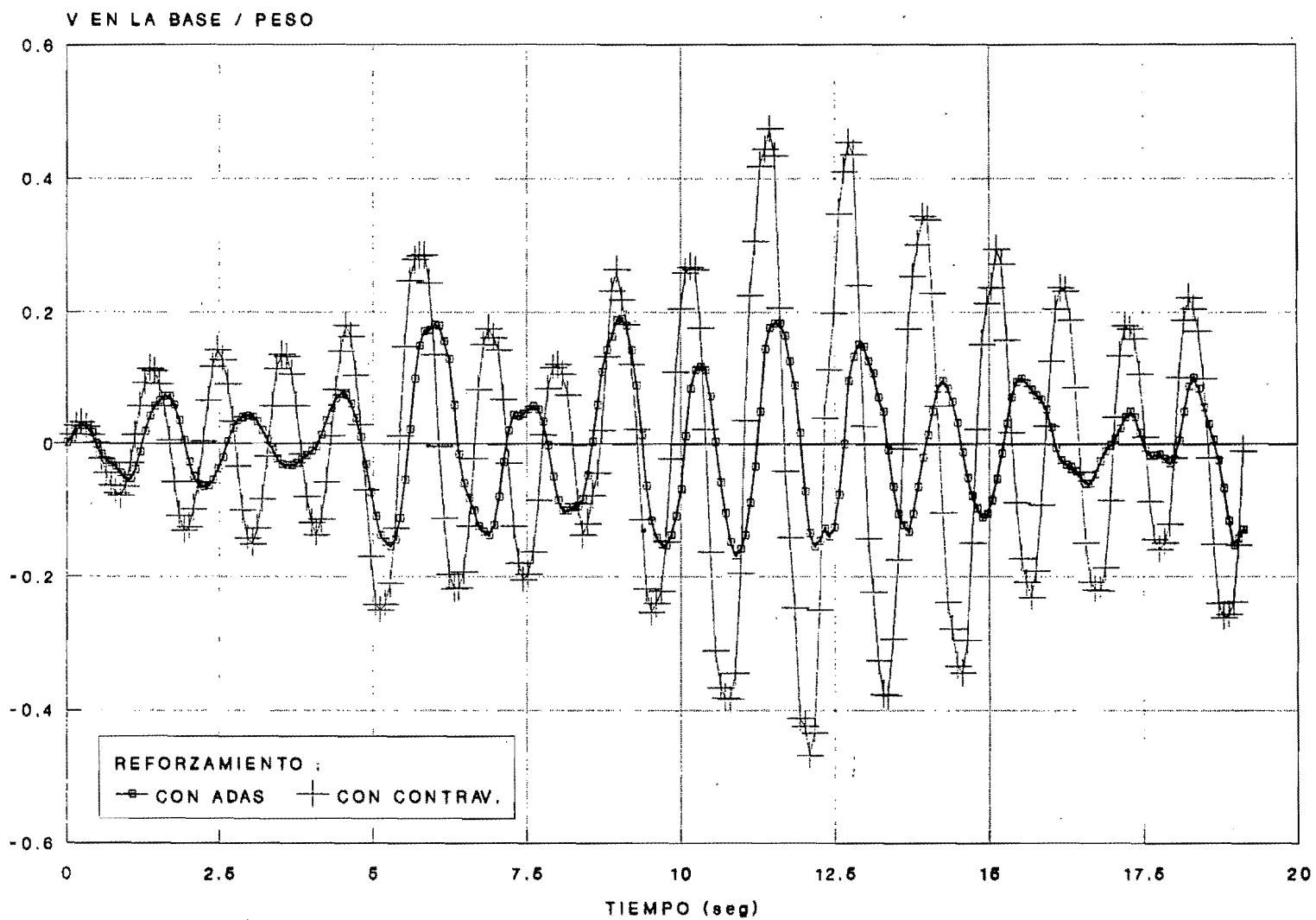
IV.6 COSTO DE LAS REPARACIONES.

Para el refuerzo de la cimentación se usarán pilotes con capacidad de 250 toneladas ante cargas sísmicas, y se aceptará que su resistencia es igual a la compresión y a la tensión.

1.- Refuerzo con amortiguadores.

De acuerdo al área de las diagonales señalado en la tabla IV.2 se calculó que el peso de las mismas es de 24.6 toneladas. Con este reforzamiento no fué necesario reforzar trabes o colum-

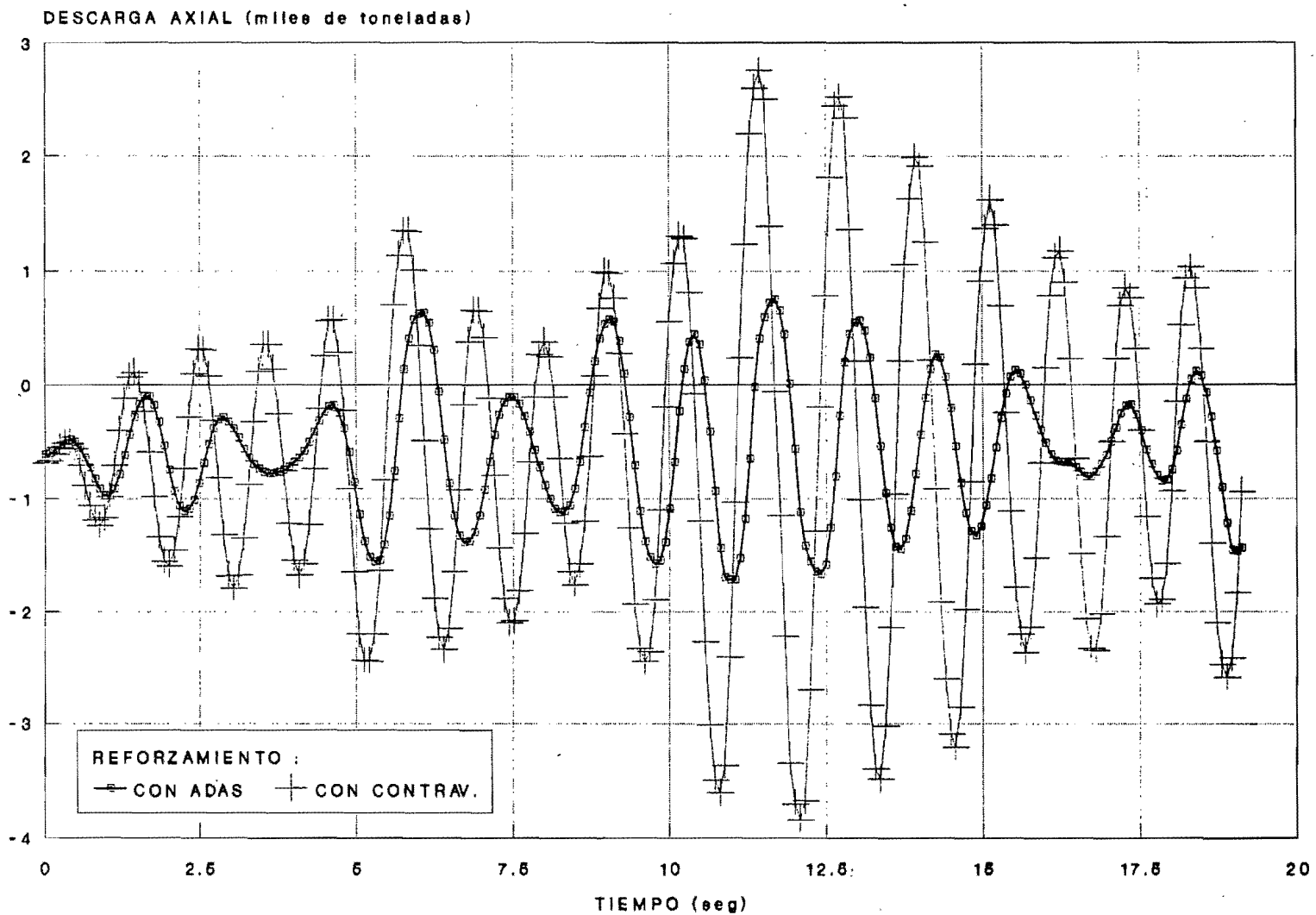
CORTANTE EN LA BASE MODELO DE 16 NIVELES



ACELEROGRAMA EST.44 ESCALADO

Figura IV.10

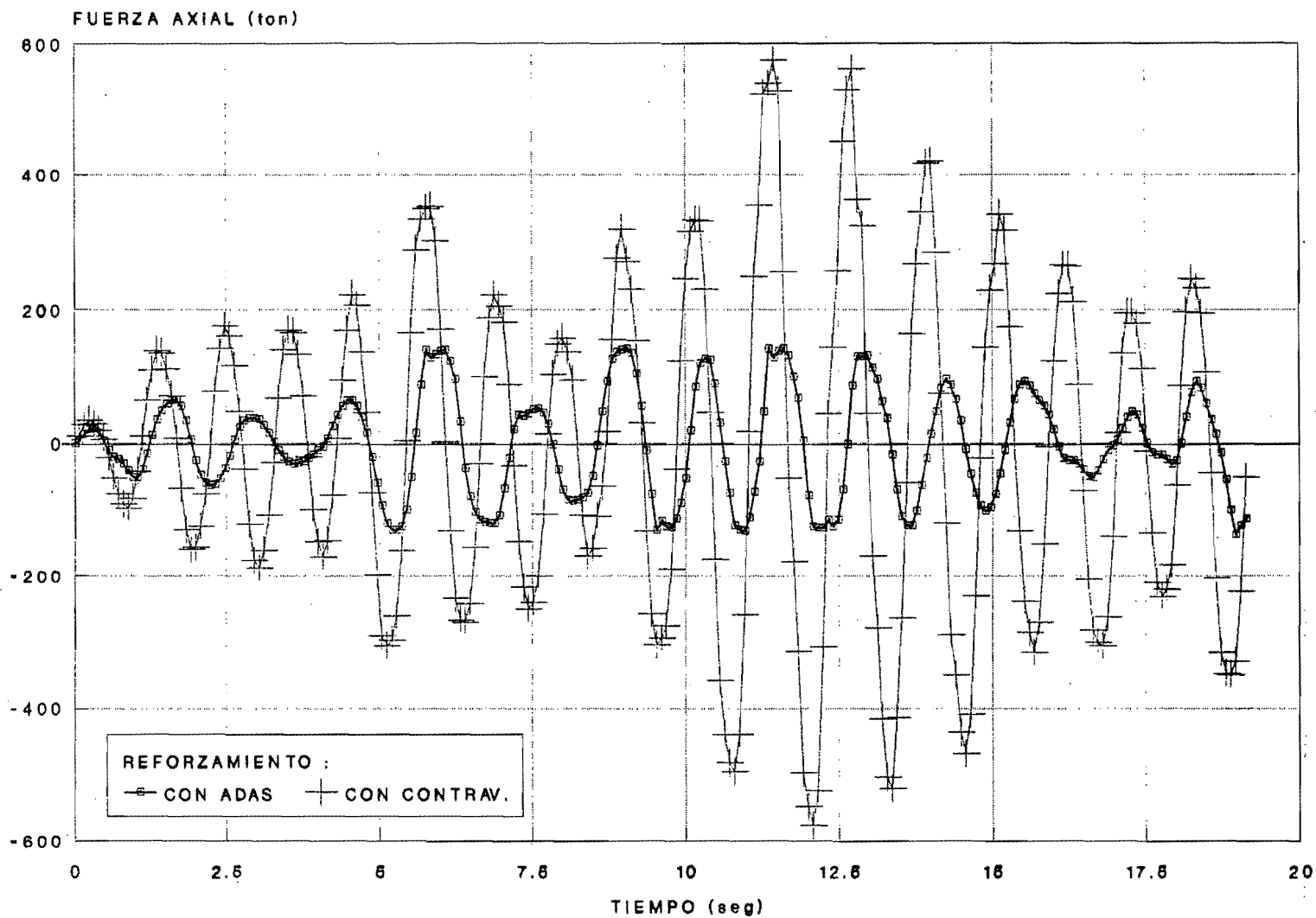
DESCARGAS A LA CIMENTACION MODELO DE 16 NIVELES



ACELEROGRAMA EST.44 ESCALADO

Figura IV.11

FUERZA AXIAL EN DIAGONAL D22 MODELO DE 16 NIVELES



101

ACELEROGRAMA EST. 44 ESCALADO

Figura IV.12

FUERZA AXIAL EN LA COLUMNA C76 MODELO DE 16 NIVELES

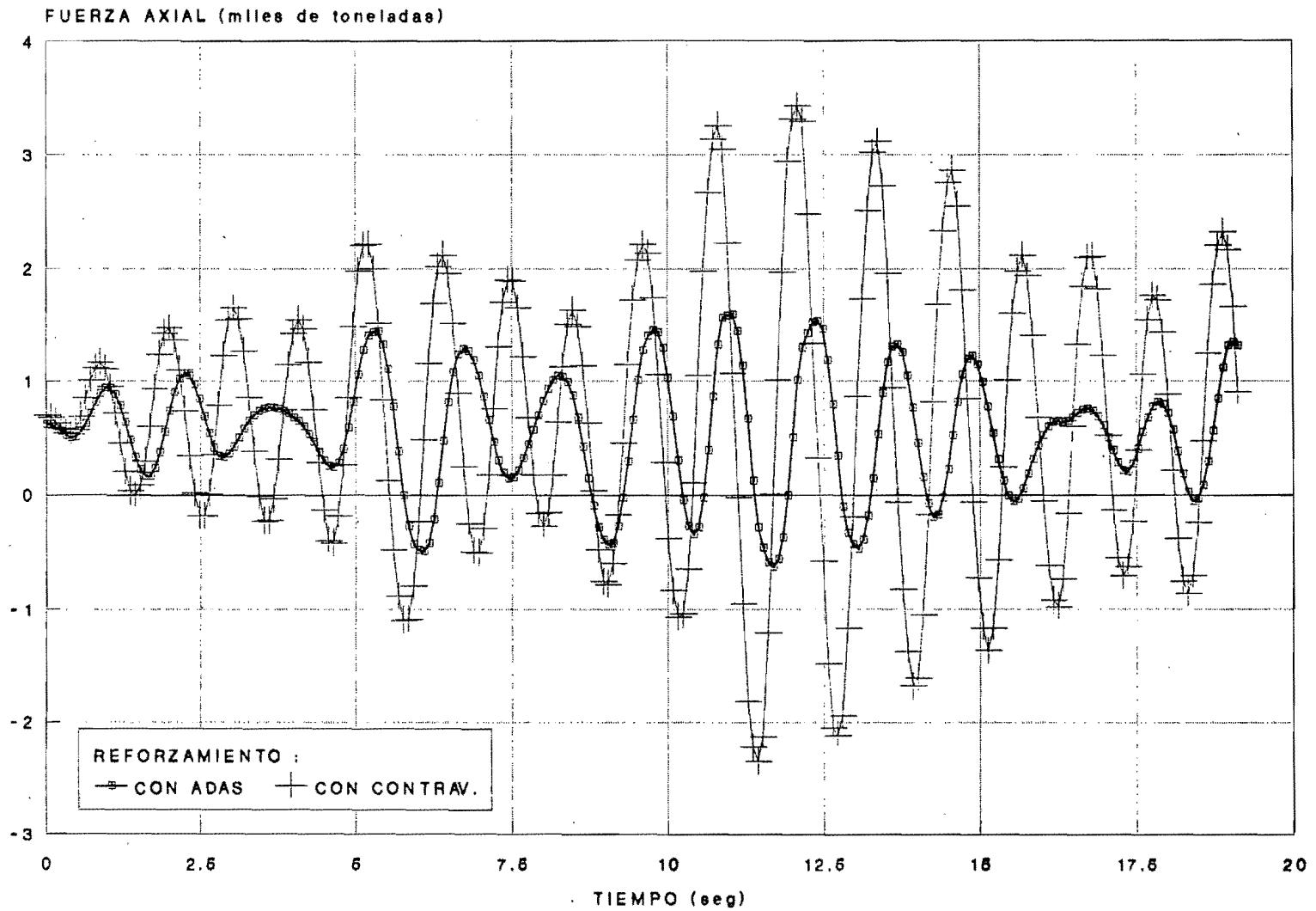
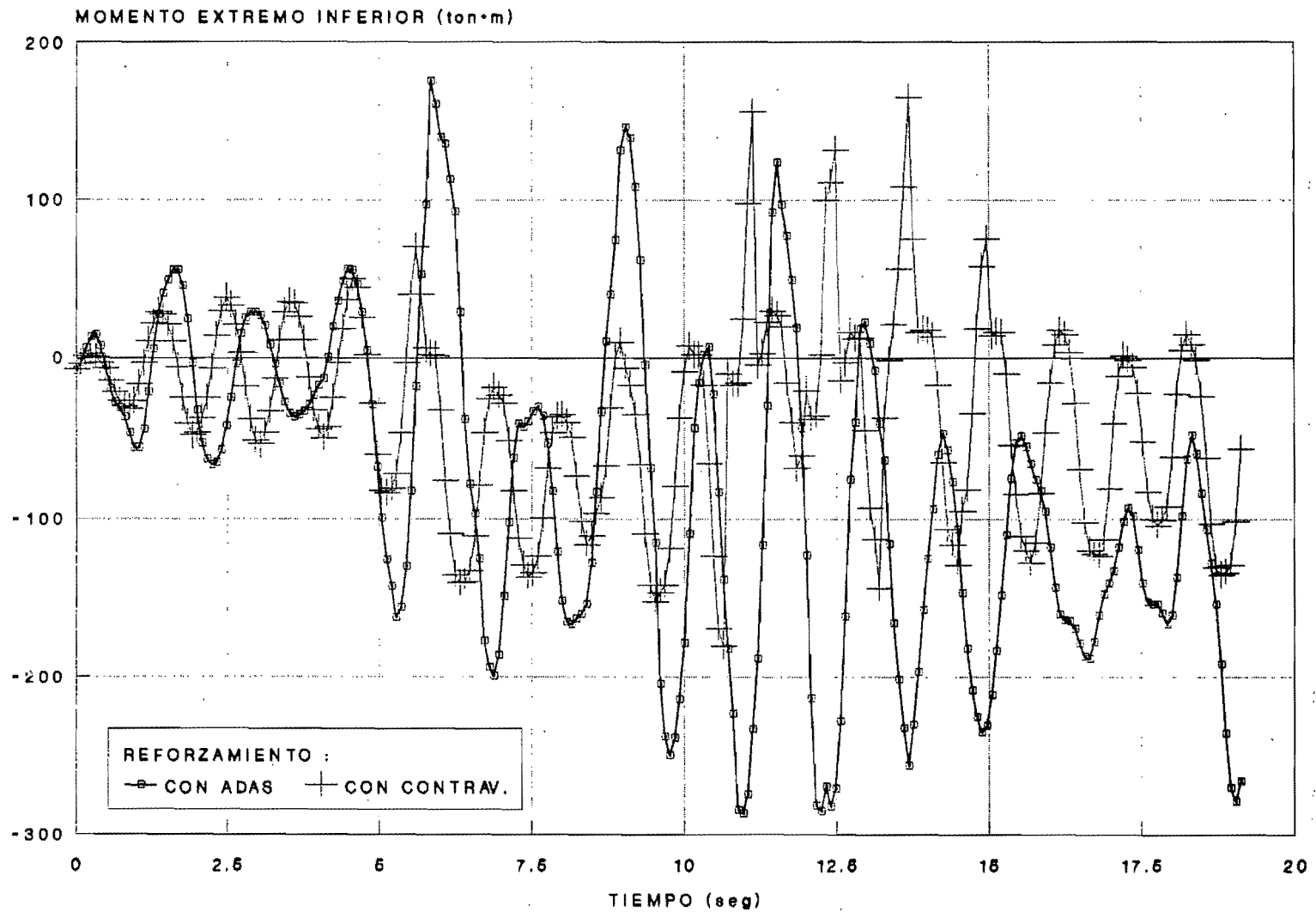


Figura IV.13

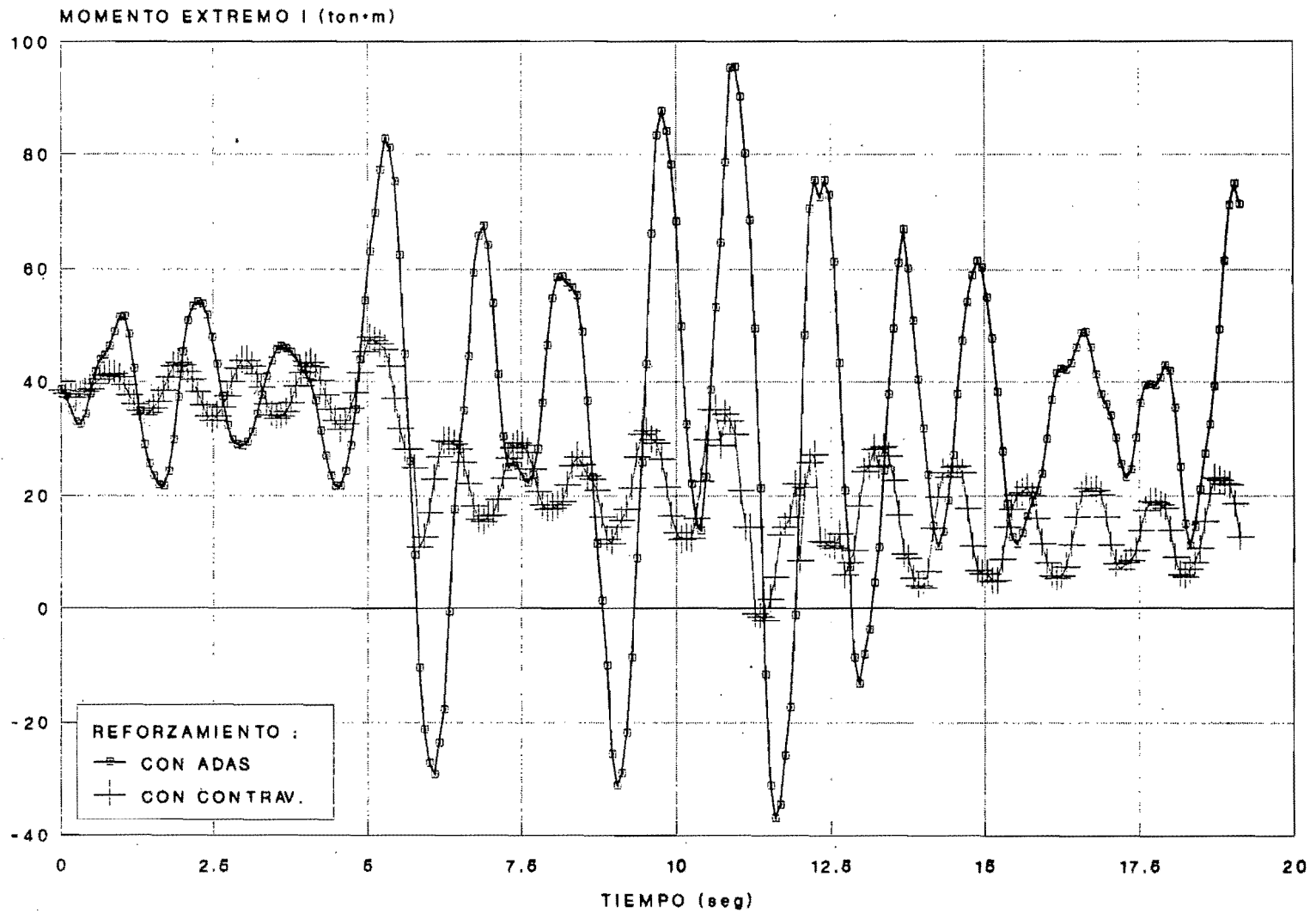
MOMENTO EN LA COLUMNA C76 MODELO DE 16 NIVELES



ACELEROGRAMA EST.44 ESCALADO

Figura IV.14

MOMENTOS EN LA TRABE T16 MODELO DE 16 NIVELES



ACELEROGRAMA EST.44 ESCALADO

Figura IV.15

nas.

Además del sistema de diagonales, los amortiguadores requieren de una pequeña trabe que los conecta con los contraventeos y de otra, colocada entre ellos y la trabe existente, para reforzarla. Se hizo el diseño de las trabes de conexión adicionales para el nivel de esfuerzos promedio y se supuso que los demás niveles tendrían la misma sección. El peso de las trabes pequeñas abajo de los amortiguadores resulta ser de 7.3 ton. Las trabes de refuerzo sobre los amortiguadores tienen un área de 120 cm², lo que significa un peso de:

$$W_{ts} = 0.0120 * 8m * 2 * 16 \text{ niveles} * 7850 = 24.1 \text{ ton}$$

que se traduce en un total de 56 toneladas de refuerzo. En la reparación de uno de los edificios que se está amortiguando en la Ciudad de México, el precio de fabricación y montaje por kilogramo de acero fué de \$ 4,000 pesos. Con este precio y considerando 15% adicional por conexiones, se estima un costo por trabajos en acero de 258 millones de pesos.

El precio de los amortiguadores depende del tipo de acero usado, el tamaño y longitud de sus tornillos de sujeción, el número, espesor y dimensión de placas en el amortiguador. Pero, como los amortiguadores del ejemplo resultaron similares a los usados en la reparación de algunos edificios, se estima que su

costo debe ser 107.5 millones de pesos. Para tener una idea del precio de los amortiguadores se puede calcular considerando 12,500 pesos por kilogramo de amortiguador, incluyendo placas separadoras, bloques y tornillos para fijación.

De acuerdo a las reacciones reportadas por el modelo matemático, se requiere de 4 pilotes adicionales en las columnas extremas y 3 en las interiores adyacentes al contraventeo. Se estima que cada pilote debe costar alrededor de 6.5 millones de pesos, o sea, 65 millones de pesos por pilotes nuevos en la recimentación.

En consecuencia, el costo de reparación del sistema amortiguado será aproximadamente de 431 millones de pesos.

2.- Refuerzo con contraventeo.

De acuerdo a las áreas de acero necesarias para el refuerzo de la estructura (ver tabla IV.2), se calculó un peso de acero de 70.7 toneladas de diagonales y 16 toneladas en columnas, lo que significa un costo de 381 millones de pesos.

Para reforzar la cimentación con los pilotes propuestos se necesitarían 12 pilotes en las columnas exteriores, y 11 pilotes en las interiores en crujiás contraventeadas. Lo que repre-

sentaría un costo de pilotes de 299 millones de pesos, si fuera físicamente posible colocar esa cantidad de pilotes.

Con estos precios se determinaría un costo de reparación de 680 millones de pesos, casi 1.6 veces mayor que con amortiguamiento. Se puede ver que el costo de la reparación sin incluir la cimentación es solamente ligeramente menor con el sistema amortiguado, y que el gran ahorro se logra en la cimentación.

Un factor adicional, determinante para la decisión del tipo de refuerzo en la estructura, es el grado de refuerzo que puede llevarse a cabo en la cimentación. En la estructura propuesta, el número de pilotes requeridos es demasiado elevado, por lo que no podrá llevarse a cabo el refuerzo aquí propuesto. La solución para el sistema contraventeado, deberá ser rigidizar aún mas la estructura o demoler algunos niveles, para disminuir su ordenada espectral y reducir de esa forma las descargas a la cimentación lo necesario para que pueda ser factible su reparación.

En el diseño propuesto de la cimentación se supuso que los pilotes, existentes y de refuerzo, serían capaces de soportar a tensión lo mismo que a compresión, pero esta suposición en general no es válida.

En el ejemplo propuesto claramente se vé como el amortiguamiento reduce mucho la respuesta de la estructura. Es importante recordar que la estructura se escogió para que se obtuvieran estas grandes diferencias, pero si la estructura tuviera otras características los resultados serían diferentes. Se debe recalcar el hecho de que en el ejemplo no se incorporó la interacción Suelo-Estructura para simplificar el diseño, pero que en una estructura real sí debe tomarse en cuenta.

CAPITULO V

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.

Los disipadores de energía ADAS, descritos y analizados en este trabajo, reducen las solicitaciones sísmicas de estructuras mediante comportamiento inelástico de placas flexionadas en doble curvatura.

Estos dispositivos han sido probados ampliamente en laboratorio, pero hasta la fecha no existe ninguna estructura real en la que se hayan aplicado. El primer edificio que se reforzará con este sistema será el ubicado en José María Izazaga No. 38 en la Ciudad de México, el cual estará terminado a principios del año próximo. Por tratarse del primer edificio en el mundo reforzado con este sistema, la Fundación Javier Barros Sierra, el despacho de cálculo Enrique Martínez Romero S.A. y las compañías con la patente: Bechtel Power Corporation Y CouterQuake Corporation, están haciendo los tramites necesarios para instrumentar al edificio, a efecto de realizar mediciones de su comportamiento futuro.

A la fecha, los estudios para amortiguar otros dos edificios en la Ciudad de México se han concluido ya, sin embargo en ninguno de estos se han iniciado todavía los trabajos de reparación. De estos dos edificios, el ubicado en Diagonal 20 de noviembre

(antiguo edificio de policía y tránsito), presenta un problema serio de hundimientos diferenciales, y el cliente ha pedido se estudie nuevamente la solución con amortiguadores demoliendo algunos niveles para reducir las descargas a la cimentación. La otra estructura diseñada con amortiguadores es el edificio viejo de cardiología en el centro médico Siglo XXI.

El Instituto Mexicano del Seguro Social se ha mostrado muy interesado en el sistema de refuerzo con disipación de energía y ha solicitado se estudie la posibilidad de reparar con este sistema los tres edificios de oficinas centrales ubicados en la avenida Paseo de la Reforma.

En estas construcciones, los amortiguadores han sido diseñados con acero A-36, y para abaratar su costo, éstos están siendo fabricados y ensamblados en México.

En los Estados Unidos, se han hecho estudios para amortiguar el edificio de Bechtel Power Corp. en la ciudad de San Francisco, y algunos tramos de las autopistas elevadas que resultaron dañados en el temblor de 1989. A la fecha estos trabajos no se han iniciado.

Por tratarse de dispositivos que no han sido probados en

estructuras reales, su aplicación se ha limitado al refuerzo de edificios dañados, en donde un refuerzo tradicional implicaría trabajos de recimentación excesivos. Seguramente, una vez probados los amortiguadores en estructuras reales, el siguiente paso será el de usarlos en diseños de estructuras nuevas. Es probable que para el diseño del edificio Marriott en Acapulco se usen estos disipadores.

De los estudios realizados en este trabajo, podemos concluir que los disipadores de energía reducen las solicitaciones sísmicas en estructuras y esta reducción es mayor en estructuras con periodo fundamental similar al del suelo, es decir, cerca de la resonancia.

Si se le añaden amortiguadores a un sistema contraventeado se reduce la rigidez del sistema. Esto ocasiona que los elementos de la estructura original estén más solicitados, como porcentaje del total, que si sólo existieran los contravientos. Este hecho no es de trascendencia si el dispositivo reduce lo suficiente las solicitaciones en el sistema.

La combinación de los dos párrafos anteriores nos indica el rango de mayor eficiencia del amortiguamiento: en estructuras con periodos un poco mayores al correspondiente a la ordenada máxima

del espectro. En este planteamiento se deben considerar los efectos de la interacción Suelo-Estructura.

Mientras mayor sea la rigidez del sistema de contraventeo, las fuerzas en la estructura serán menores. Esta variación no es grande, y la reducción no es económica. El incremento del valor de la ductilidad desarrollada por los ADAS también reduce la respuesta, este hecho constituye un factor de seguridad adicional.

De la comparación de costos de reparación, hecha para una estructura de 16 niveles, se puede concluir que el costo del reforzamiento de la estructura con ambos sistemas es similar, pero la diferencia en el costo de la reparación en la cimentación es grande. El reforzamiento con disipación de energía se traduce en descargas menores a la cimentación, factor que es sumamente importante en una gran cantidad de edificios dañados y razón por la cual tienen un gran campo de aplicación en la Ciudad de México.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Alonso J., Bertero V., Thompson C., Wittaker A., Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC/-89/02, College of Engineering, University of California at Berkeley, 1989.
- 2.- Ashour S., Hanson R., Scholl R., Effect of supplemental damping on earthquake response, Proceedings of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Energy Dissipation, Applied Technology Council, 1986.
- 3.- Chávez J., González R., Efecto de dos tipos de amortiguadores externos en la respuesta de una estructura metálica de dos niveles, Memorias del VIII Congreso Nacional de Ing. Sísmica y VII Congreso Nac. de Ing. Estructural, Acapulco Gro., 1989.
- 4.- Clough R., Penzien J., Dynamics of Structures, 1º ed., Ed. MacGraw-Hill, Singapore, 1986.
- 5.- Departamento del Distrito Federal, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 1987, publicado en la Gaceta Oficial del D.F. el 6 de julio de 1987, México, 1987.
- 6.- Departamento del Distrito Federal, Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, publicado en la Gaceta Oficial del D.F. el 5 de noviembre de 1987, México, 1987.
- 7.- Departamento del Distrito Federal, Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, publicado en la Gaceta Oficial del D.F. el 12 de noviembre de 1987, México, 1987.
- 8.- Habibullah A., ETABS-Three Dimensional Analysis of Building Systems, Computer and Structures Inc., 1986.
- 9.- Hanson R., Basic Concepts and Potential Applications of Supplemental Mechanical Damping for improved Earthquake Resistance, Proceedings of a Seminar and

Workshop on Base Isolation and Energy Dissipation,
Applied Technology Council, 1986.

- 10.- Hanson R., Su Y., Seismic Response of Building Structures with Mechanical Damping Devices, Department of Civil Engineering, Report UMCE 90-2, University of Michigan, 1990.
- 11.- Instituto de Ingeniería, Acelerograma en el centro SCOP de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sismo del 19 de septiembre de 1985, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., Informe IPS-10B, 1985.
- 12.- Instituto de Ingeniería, Sismo del 25 de Abril de 1989, Acelerogramas en Ciudad Universitaria, Viveros, Colonia Roma y Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., Informe IPS-12-A, 1989.
- 13.- Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, Manual de Construcción en Acero, Tomo I, 1º ed., Ed. Limusa, México, 1987.
- 14.- Kanaan A., Powell G., General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley, 1973.
- 15.- Martínez I., Navarro A., Cenizeros J., Dinámica Estructural, 1º ed., Editorial Universitaria, Universidad Autónoma de Zacatecas, México, 1983.
- 16.- Martínez E., Scholl R., Earthquake Retrofit Design of a 12 story building using Structural Dampers, Proceedings of the Second International Engineering and Technology Conference, México City, México, August 20-22, 1986.
- 17.- Park R., Paulay T., Estructuras de Concreto Reforzado, 1º ed., Editorial Limusa, México, 1986.
- 18.- Powell G., DRAIN-2D User's Guide, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1973.
- 19.- Scholl R., Improve the Earthquake Performance of Structures with Added Damping and Stiffness Elements,

Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, May 20-24, 1990.

- 20.- Scholl R., White W., Elemento Adicionador de Amortiguamiento y Rigidez para mejorar el Desempeño Sísmico de Estructuras, Memorias del VIII Congreso Nacional de Ing. Sísmica y VII Congreso Nac. de Ing. Estructural, Acapulco Gro., 1989.