

01161 2
24.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

**INFLUENCIA DE LA CARGA AXIAL EN EL COMPORTAMIENTO
DE DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO TADAS Y ADAS**

JOSÉ LUIS ÁLVAREZ RUIZ

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE

POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL

AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER

EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

(ESTRUCTURAS)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1997



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

*A mis padres **Lucia** y **José Luis** por haberme apoyado para seguir con mi preparación profesional.*

*A mis hermanos **Margarita** y **Jorge** por los consejos que me han brindado para salir adelante.*

*A **Sofía Maiya** por estar siempre a mi lado en los momentos más importantes de mi vida.*

A mis amigos y maestros

*Con cariño a la
memoria de mi abuela
Emilia Gálvez A.*

AGRADECIMIENTOS

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería por haberme permitido incrementar mis conocimientos y enriquecer mi formación profesional.

A la Dra. Sonia E. Ruiz Gómez por haberme dado la oportunidad de colaborar con ella y por los invaluable consejos que me brindó para la realización de esta tesis.

Al Instituto de Ingeniería por los recursos que me proporcionó para la elaboración esta tesis.

A todas aquellas personas que me ayudaron a culminar mi Maestría.

Índice

| | |
|--|------------|
| Introducción | 1 |
| 1. Antecedentes sobre el comportamiento de dispositivos disipadores de energía tipo TADAS | 3 |
| 1.1 Características mecánicas y dinámicas del dispositivo | 4 |
| 1.2 Pruebas pseudodinámicas de un marco con disipadores TADAS | 6 |
| 1.3 Criterios de diseño sismo resistente de marcos estructurales con dispositivos TADAS | 7 |
| 2. Antecedentes sobre el comportamiento de dispositivos disipadores de energía tipo ADAS | 11 |
| 2.1 Representaciones analíticas del dispositivo | 12 |
| 2.2 Características mecánicas y dinámicas del dispositivo | 15 |
| 2.3 Pruebas pseudodinámicas de un marco con disipadores ADAS | 16 |
| 2.4 Criterios de diseño sismo resistente de marcos estructurales con dispositivos ADAS | 17 |
| 3. Análisis paramétrico de un marco con disipadores de energía | 22 |
| 3.1 Características generales del modelo bidimensional analizado | 23 |
| 3.2 Modelado de placas TADAS y ADAS para el análisis no lineal | 26 |
| 3.3 Influencia del modelado en la respuesta estructural | 30 |
| 3.4 Análisis no lineal del marco con dispositivos TADAS | 32 |
| 3.5 Análisis no lineal del marco con dispositivos ADAS | 35 |
| 3.6 Comparación de resultados | 37 |
| 4. Análisis de esfuerzos de los dispositivos mediante el método del elemento finito | 82 |
| 4.1 Modelado de los dispositivos con elemento finito | 83 |
| 4.2 Distribución de esfuerzos en el dispositivo TADAS | 86 |
| 4.3 Distribución de esfuerzos en el dispositivo ADAS | 90 |
| 4.4 Comparación de resultados | 94 |
| 5. Conclusiones | 110 |
| 6. Referencias | 114 |
| 7. Apéndice A | 117 |

Introducción

Debido a la necesidad de realizar **diseños estructurales** mas económicos y aceptando **que** se presentará cierto nivel de **daño**, han surgido técnicas **para** brindar un mejor **comportamiento** en las estructuras, **tratando de** localizar el **daño** en puntos específicos **que** sean fácilmente reparables. Los dispositivos disipadores de energía han **ganado aceptación** en el diseño de **nuevas estructuras** y reparación de edificios existentes **debido**, entre otras cosas, a que **presentan un** comportamiento **histerético** estable en **regiones** especialmente detalladas y **diseñadas** de la estructura.

En años recientes se han **realizado** investigaciones para **aumentar** la capacidad de **disipación** de energía de los edificios a través del uso de dispositivos de placas de **acero** para agregar **amortiguamiento** y **rigidez** (ADAS). También se han realizado **estudios** sobre el **comportamiento** de **placas** de sección triangular, en donde se **presentan** características similares a las que se observan en los dispositivos ADAS. Los **resultados** han demostrado que **ambos** dispositivos pueden sostener un gran número de **ciclos** de carga sin ningún signo **de** **degradación** de rigidez o **resistencia**.

Las investigaciones realizadas a los dispositivos TADAS y ADAS han permitido conocer los parámetros más importantes que rigen su comportamiento ante carga lateral y su capacidad de disipación de energía. Sin embargo, existen otras variables que no han sido estudiadas con atención. Tal es el caso de la influencia de la carga axial en el comportamiento de los disipadores. En estudios previos realizados al dispositivo ADAS se ha observado que la presencia de carga axial puede modificar su comportamiento (Whittaker et al, 1989).

Este estudio presenta los análisis realizados a modelos de marcos con disipadores de energía tipo TADAS y ADAS. Los marcos presentan variaciones de las propiedades de rigidez de traveses y columnas.

Asimismo, se presentan los análisis de los dispositivos TADAS y ADAS modelados con elementos finitos para identificar su distribución de esfuerzos para diferentes condiciones de carga y tratar de conocer la influencia que puede tener la carga axial en el comportamiento de los dispositivos. De esta manera se determina bajo que condiciones los dispositivos cumplen ciertas hipótesis sobre las cuales se apoya su comportamiento.

Este tipo de estudios permitirán conocer mejor el comportamiento de los dispositivos TADAS y ADAS. No hay que olvidar que en la Ciudad de México existen estructuras que ya han sido rehabilitadas con dispositivos ADAS (Martínez - Romero, 1993) y aún se tienen algunas dudas sobre la manera en que se comportarán los dispositivos ante un sismo intenso en el futuro.

1. Antecedentes sobre el comportamiento de dispositivos disipadores de energía tipo TADAS

En años recientes, se han realizado investigaciones para aumentar la capacidad de disipación de energía de estructuras a través del uso de dispositivos de placas de acero de sección triangular. Al aplicar una carga transversal en el extremo de una placa triangular se produce una curvatura uniforme a lo alto del espécimen. Esta se puede deformar en el rango inelástico sin concentración de curvatura. La placa de acero de forma triangular ha sido aplicada con éxito como dispositivo disipador de energía en sistemas de tuberías de plantas nucleares.

Los resultados muestran que el dispositivo con conexiones soldadas detalladas puede sostener un gran número de ciclos de fluencia sin ningún signo de degradación de rigidez o resistencia. También se ha observado que las características del dispositivo TADAS son altamente predecibles y por ello pueden ser una alternativa prometedora para edificios ante sismos severos.

1.1 Características mecánicas y dinámicas del dispositivo

Como se muestra en la fig. 1.1, al imponer un desplazamiento finito perpendicular al plano de la placa triangular, empotrada en el extremo superior y simplemente apoyada en el inferior, la curvatura se distribuye uniformemente, ocurriendo la fluencia simultáneamente a todo lo alto de la placa sin concentración de curvatura. De acuerdo con Tsai et al (1993), suponiendo que la base de la placa está totalmente empotrada y despreciando las deformaciones por cortante, la rigidez lateral K_d del TADAS es:

$$d = \frac{NEbt^3}{6h^3} \quad (1.1)$$

donde E es el módulo de Young, N el número de placas triangulares del dispositivo, t el espesor de las placas, b y h son el ancho y altura de la placas respectivamente.

La resistencia de fluencia P_y , y la resistencia plástica P_p , del dispositivo son:

$$y = \frac{F_y N b t^2}{6h} \quad (1.2)$$

$$p = \frac{F_y N b t^2}{4h} \quad (1.3)$$

El desplazamiento de fluencia Δy , es:

$$\Delta y = \frac{F_y h^2}{Et} \quad (1.4)$$

Donde F_y representa el esfuerzo de fluencia a tensión. Si el ángulo de giro, γ , del dispositivo se define como el cociente del desplazamiento lateral entre la altura de la placa triangular, entonces se puede definir γ_y como:

$$\gamma_y = \frac{F_y h}{E t} \quad (1.5)$$

De las ecuaciones anteriores se puede observar que la relación h/t de la placa es un parámetro importante en las propiedades mecánicas del dispositivo TADAS.

Cuando se combina el dispositivo TADAS con un contraventeo en un marco, el elemento TADAS no sólo proporciona rigidez lateral adicional, sino también amortiguamiento histerético cuando se rebasa una respuesta específica del marco. Suponiendo comportamiento plástico de los miembros, la fig. 1.1 muestra el mecanismo de disipación del marco con TADAS. De la geometría del mecanismo, la demanda rotacional inelástica del dispositivo TADAS puede calcularse de la siguiente manera:

$$\gamma_p = \theta_p \frac{H}{h} \quad (1.6)$$

donde H es la altura de entrepiso y θ_p es el ángulo de giro plástico.

Por otro lado, se realizaron pruebas cíclicas a dispositivos TADAS para conocer su comportamiento ante este tipo de solicitaciones (Tsai et al, 1993). Los especímenes experimentales eran de acero A-36, articulados en la punta de la placa triangular, empotrados en el extremo opuesto mediante soldadura calificada y sujetos a la carga de un actuador hidráulico.

Al revisar el comportamiento fuerza-deformación del dispositivo se encontró que éste puede sostener un gran número de ciclos de fluencia reversible sin ningún signo de degradación de rigidez o resistencia. Además, la rigidez elástica del dispositivo es bastante predecible si se consideran solamente deformaciones por flexión.

1.2 Pruebas pseudodinámicas de un marco con dispositivos TADAS

Con el fin de evaluar la efectividad de los dispositivos TADAS en marcos localizados en zonas de alto riesgo sísmico, se han realizado pruebas de tipo pseudodinámicas con dicho propósito. Se estudió un marco plano de acero de dos niveles (Tsai et al, 1993) dotado de especímenes TADAS con características mecánicas conocidas. Se observó que al colocar los TADAS con los contravientos se redujo el periodo del primer modo en forma considerable, debido al incremento de rigidez proporcionado por el arreglo. Se apreció también que la respuesta del marco se redujo considerablemente en ambos niveles, al activarse el dispositivo TADAS.

Los resultados experimentales se compararon con la respuesta analítica del marco, modelándolo con un porcentaje del amortiguamiento crítico $\xi=0.01$. Se usó el programa de análisis no lineal DRAIN-2D (Kannan y Powell, 1973) utilizando los mismos registros. Se apreció que existe una buena aproximación entre los resultados experimentales y analíticos del modelo con lo que se puede comprobar que el dispositivo TADAS reduce la respuesta del marco ante sollicitaciones de tipo sísmico. Estos resultados analíticos se reprodujeron también durante el desarrollo de esta tesis.

1.3 Criterios de diseño sismo-resistente de marcos estructurales con dispositivos TADAS.

Se han realizado recientemente investigaciones encaminadas a conocer los parámetros que influyen determinadamente en la respuesta de marcos con dispositivos TADAS (Tsai y Chen, 1992, Tsai et al, 1993). De estas investigaciones se ha podido concluir que los parámetros que afectan de manera importante el comportamiento de marcos con dispositivos TADAS son:

1. Factor de rigidez lateral SR, siendo:

$$SR = \frac{K_a}{K_f} \quad (1.7)$$

donde K_a es la rigidez lateral del arreglo TADAS (placas triangulares mas diagonales del contraventeo) y K_f es la rigidez lateral del marco original;

2. Desplazamiento de fluencia del dispositivo TADAS y los contraventeos, Δy_1

3. Factor de resistencia U, siendo:

$$U = \frac{R_{y2}}{R_{y1}} \quad (1.8)$$

donde R_{y1} es la fuerza restauradora total del marco con TADAS al alcanzar el desplazamiento Δy_1 , y R_{y2} es la fuerza restauradora total del marco con TADAS al alcanzar el desplazamiento de fluencia del marco original, Δy_2 . En la fig. 1.2 se pueden apreciar las relaciones fuerza-defórmación del marco TADAS.

Antecedentes sobre el comportamiento de dispositivos disipadores de energía tipo TADAS

Los estudios realizados han concluido que un valor óptimo para el factor de resistencia U es de 2, y se recomienda que los valores de SR sean menores que 4 para sistemas con periodo fundamental corto y que 2 para sistemas con periodo fundamental medio a largo.

Con los resultados mencionados anteriormente e incorporando conceptos de diseño sismoresistente, se ha propuesto el siguiente procedimiento para el diseño de marcos con dispositivos TADAS (Tsai et al, 1993):

1. Establecer un sismo de diseño para el nivel de servicio y el lugar específico en donde se localizará el marco. Una aceleración máxima efectiva de 80 gals puede utilizarse en zonas de alto riesgo sísmico (Tsai et al, 1993).
2. Seleccionar un valor adecuado de SR basado en el período fundamental estimado para el marco original.
3. Diseñar el marco sin los dispositivos TADAS para que resista un mínimo del 25% de las fuerzas sísmicas. Con ello obtener la rigidez lateral (K_f) de cada entrepiso, así como el desplazamiento de fluencia del marco original (Δy_2).
4. Calcular la rigidez lateral del dispositivo TADAS (K_a) y el desplazamiento de fluencia del dispositivo (Δy_1) mediante:

$$\frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} = 1 + \frac{1 + SR}{1 + SR * SHRa} * (U - 1) \quad (1.9)$$

Donde $SHRa$ es la pendiente postfluencia del dispositivo TADAS. Se podrá diseñar el dispositivo TADAS para cada entrepiso mediante Δy_1 y la rigidez de las placas triangulares.

5. Incorporar los dispositivos TADAS en el marco original y realizar análisis dinámicos con el sismo seleccionado. Repetir los pasos 3 y 4 hasta alcanzar la resistencia y desplazamientos para el nivel de servicio.

6. Realizar revisiones por capacidad en diagonales, vigas y columnas para una fuerza del dispositivo igual a 1.5 veces la fuerza plástica P_p .

Esta metodología ya ha sido aplicada en diseño y se ha encontrado que los niveles de servicio y resistencia de diseño pueden alcanzarse adecuadamente. Sin embargo, un análisis no lineal puede ser de gran utilidad para verificar los niveles de ductilidad, elementos mecánicos y distorsiones de entrepiso.

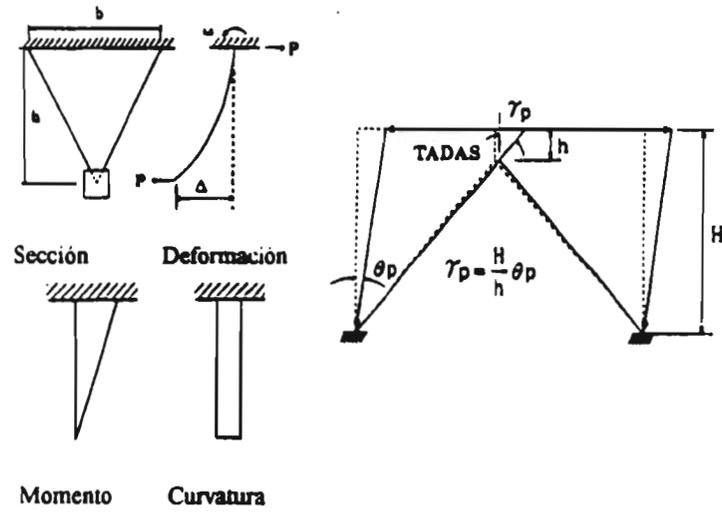


Fig. 1.1 Características mecánicas del dispositivo TADAS

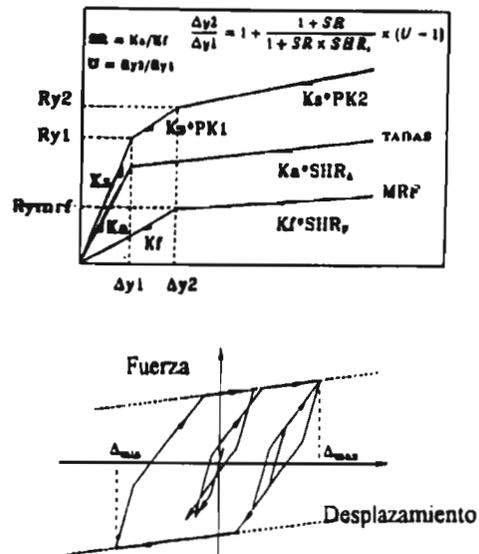


Fig. 1.2 Relaciones fuerza - deformación para marcos con TADAS

2. Antecedentes sobre el comportamiento de dispositivos disipadores de energía tipo ADAS

El dispositivo ADAS (Added Damped and Stiffness) ha sido estudiado en numerosas ocasiones debido a sus propiedades de disipación de energía. El elemento ADAS es un dispositivo mecánico diseñado para ser instalado en estructuras nuevas o existentes ya que, si se diseña y coloca adecuadamente, puede aumentar la rigidez y resistencia de marcos convencionales, y aumentar substancialmente la capacidad de disipación de energía.

El dispositivo ADAS es una placa de acero estructural con forma de X (fig. 2.1). La forma de X tiene la ventaja de que al estar empotrada en ambos extremos y al desplazarla lateralmente en la parte superior, la placa se deformará en doble curvatura permitiendo una fluencia y deformación plástica uniformemente distribuida en todo lo alto de la placa, sin presentar zonas de concentración de curvatura o esfuerzos como se obtendrían para el caso de una placa rectangular doblemente empotrada. Las investigaciones realizadas a la placa ADAS han demostrado que puede sostener un gran número de ciclos de fluencia sin ningún signo de degradación de rigidez o resistencia.

2.1 Representaciones analíticas del dispositivo

Debido a la geometría del dispositivo ADAS, han surgido idealizaciones analíticas más sencillas para poder conocer los parámetros de rigidez y resistencia del dispositivo.

Una de las más conocidas es la propuesta por Whittaker et al (1989), la cual se muestra en la fig. 2.2. Esta forma idealizada supone que: (1) la placa X está rígidamente empotrada en sus extremos; (2) la placa X se deforma en doble curvatura antisimétrica con respecto a su media altura; y (3) el ancho equivalente de la placa X en sus extremos es igual a la mitad de su altura ($b_{eq} = l/2$). La curva cortante - deformación lateral del dispositivo puede idealizarse como elasto - plástico perfecta o bilineal.

De acuerdo con el método propuesto por Whittaker et al (1989), se puede conocer el desplazamiento de fluencia de la placa X:

$$\Delta_y = \frac{3 \sigma_y l^2}{4 Et} \quad (2.1)$$

el cortante de fluencia V_y :

$$V_y = \frac{\sigma_y b_{eq} t^2}{2l} \quad (2.2)$$

y la rigidez K_{PL} correspondiente a esta placa X idealizada:

$$K_{PL} = \frac{V_y}{\Delta_y}$$

En donde σ_y es el esfuerzo de fluencia, E es el módulo de Young del acero, I la altura del dispositivo y t el espesor de la placa. Esta forma idealizada está inscrita dentro de la forma real del dispositivo ADAS y por lo tanto su rigidez y capacidad a cortante se subestiman con respecto a las reales.

Existe otro método propuesto por Tena (1996) para determinar los parámetros de rigidez y resistencia del dispositivo ADAS. Este se basa en la obtención de la matriz de rigideces de la placa como un elemento no prismático. Utiliza el método de las flexibilidades. Para ello propone la geometría de la placa similar a un reloj de arena (fig. 2.3) y utiliza funciones exponenciales para aproximarse a esa forma. Las dimensiones de la placa equivalente quedan definidas por la altura de la placa (I), el ancho de los extremos empotrados ($b_1 = 0.60I$) y el ancho de la garganta ($b_2 = 0.10I$). La propuesta anterior se asemeja mucho a la forma real del dispositivo y sólo subestima la dimensión de la placa en la garganta y los empotramientos.

Obteniendo la matriz de flexibilidades y ensamblando posteriormente la matriz de rigideces se puede obtener la rigidez lateral de la placa ADAS:

$$K_{PL} = r_{ax} = \frac{f_{66}}{\text{Det}_x} \quad (2.4)$$

en donde

$$f_{66} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{I}{b_1 \ln(b_1/b_2)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right) \right\} \quad (2.5)$$

$$\text{Det}_x = f_{22}f_{66} - f_{26}^2 \quad (2.6)$$

$$f_{22} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{l^3}{2b_1 \ln(b_1, b_2)} \left[\frac{b_1}{b_2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{[\ln(b_1, b_2)]^2} \right) - 1 - \frac{1}{\ln(b_1, b_2)} - \frac{1}{[\ln(b_1, b_2)]^2} \right] \right\} \quad (2.7)$$

$$f_{26} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{l^2}{2b_1 \ln(b_1, b_2)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right) \right\} \quad (2.8)$$

También se puede conocer el momento plástico y el cortante plástico de la placa:

$$M_{PL} = \frac{\sigma_y t^2}{2 \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} (b_1 - b_2) \quad (2.9)$$

$$V_{PL} = \frac{\sigma_y t^2}{2l} (b_1 - b_2) \quad (2.10)$$

Para conocer el desplazamiento de fluencia de la placa idealizada basta dividir el cortante plástico entre la rigidez lateral calculada con la ecuación (2.4). Además, el método permite conocer la capacidad a carga axial de la placa ADAS mediante la ecuación:

$$P = \sigma_y t \frac{(b_1 - b_2)}{\ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} \quad (2.11)$$

Como se puede observar, este método obtiene los parámetros de rigidez y momento plástico del dispositivo ADAS a partir de una geometría mas realista y también permite conocer la capacidad a carga axial de la placa, la cual ha sido despreciada en otras investigaciones.

Las metodologías antes mencionadas (Whittaker et al. 1989; Tena, 1996) han sido comparadas con resultados experimentales y en general han mostrado ser confiables en la determinación de los parámetros de rigidez y resistencia del dispositivo ADAS.

2.2 Características mecánicas y dinámicas del dispositivo

La forma de X del dispositivo ADAS permite una distribución uniforme de esfuerzos y deformaciones plásticas cuando el dispositivo se desplaza lateralmente y se deforma en doble curvatura. Esto tiene, de acuerdo con las formulaciones analíticas, la ventaja de evitar zonas de concentración de esfuerzos.

Se han realizado estudios experimentales al dispositivo ADAS a fin de conocer su comportamiento real ante diferentes sollicitaciones (Whittaker et al, 1989). Algunos de los resultados han mostrado que sólo ciertas fibras fluyen inicialmente, concentradas en una "zona crítica", y las fibras fuera de esta zona fluirán hasta que las de la "zona crítica" hayan alcanzado el endurecimiento por deformación. Como se puede observar en la fig. 2.4, la zona crítica presenta una distribución uniforme de curvaturas mientras que el resto de la placa no ha fluido aún. Bajo estas condiciones se podría asegurar que sólo el 50% del dispositivo ADAS disipará energía (en contradicción con el 100% supuesto por las formas analíticas). También se ha observado que la rigidez de los empotramientos en los extremos del dispositivo puede afectar la resistencia, rigidez y desplazamiento de fluencia de las placas (Whittaker et al , 1989).

Los estudios realizados por Whittaker et al han incluido pruebas de carga cíclica para conocer el comportamiento histerético del dispositivo. Se ha observado que el dispositivo puede sostener un gran número de ciclos de fluencia y sufrir fuertes deformaciones plásticas sin mostrar ningún signo de degradación de rigidez o resistencia.

Sin embargo los desplazamientos de fluencia medidos pueden ser 10% a 45% mayores que los obtenidos analíticamente; esto se puede deber, como ya se mencionó, a la rigidez de los empotramientos de la placa.

También se ha observado que la presencia de carga axial en el dispositivo ADAS puede modificar su comportamiento. La influencia de la carga axial es mucho mayor cuando la placa fluye, ya que la resistencia a pandeo de la placa X es proporcional a su rigidez. A pesar de lo anterior, en general sólo se recomienda escoger un arreglo adecuado para la colocación del dispositivo y se presta poca importancia al efecto de la carga axial.

2.3 Pruebas pseudodinámicas de un marco con disipadores ADAS

Con el fin de evaluar la efectividad de los dispositivos ADAS en marcos localizados en zonas de alto riesgo sísmico se han realizado pruebas pseudodinámicas con dicho propósito. Se estudió una estructura de acero de tres niveles (Whittaker et al, 1989) dotada de especímenes ADAS con características mecánicas conocidas.

Los resultados han mostrado que la colocación de dispositivos ADAS mediante contraventeos en la estructura mejoran el comportamiento de ésta ante diferentes niveles de demanda sísmica. Los beneficios que se obtienen al disipar energía mediante la fluencia de las placas ADAS son: (1) la disipación de energía está localizada en zonas especialmente diseñadas de la estructura; y (2) un aumento considerable del amortiguamiento viscoso equivalente durante sismos pequeños, moderados y severos. Además, el arreglo de dispositivos permite que la estructura sobreviva a sismos severos, pues el daño se concentra primero en los dispositivos y posteriormente en los elementos de la estructura.

Los resultados obtenidos de estas y otras investigaciones han permitido concluir que el dispositivo ADAS puede utilizarse para reforzar marcos flexibles convencionales; o en el diseño y construcción de nuevas estructuras localizadas en zonas de alta sismicidad.

2.4 Criterios de diseño sismo-resistente de marcos estructurales con dispositivos ADAS

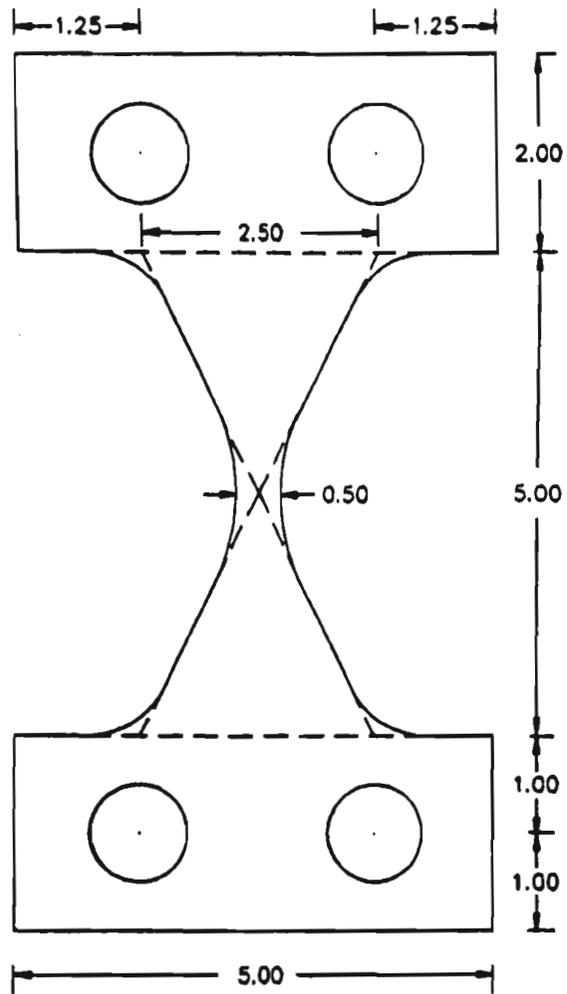
En los últimos años se han realizado varias investigaciones para conocer el comportamiento de diferentes sistemas pasivos de disipación de energía, y al mismo tiempo se ha tratado de plantear metodologías de diseño para usar estos dispositivos en estructuras nuevas. En 1992, la Asociación de Ingenieros Estructuristas del Norte de California (SEAONC) redactó un documento titulado "*Code Requirements for the Design and Implementation of Passive Energy Dissipation Systems*". Este documento es un suplemento para el código UBC (Uniform Building Code) e incluye requerimientos de diseño adicionales específicamente desarrollados para incorporar dispositivos disipadores en edificios. Los requerimientos son aplicables para dispositivos disipadores viscosos, viscoelásticos, fricción, fluencia de acero (ADAS) y forma-memoria.

A continuación se mencionan algunos de los requerimientos mas importantes contenidos en el documento antes mencionado:

1. El sistema resistente a cargas laterales deberá ser diseñado para soportar demandas sísmicas con 10% de probabilidad de excedencia en un periodo de 50 años.

2. Se colocarán mínimo dos líneas verticales de dispositivos disipadores en cada dirección principal del edificio y serán continuas desde su base.
3. Los elementos que sostienen a los dispositivos disipadores deberán ser diseñados para comportarse elásticamente, y en caso contrario se diseñaran para que trabajen de manera dúctil de acuerdo con lo estipulado en el UBC.
4. Los procedimientos de análisis podrán ser dinámicos con espectro de respuesta (UBC), historia paso a paso o con espectro de diseño específico del sitio.
5. El modelo matemático del edificio deberá incluir la distribución tridimensional de los dispositivos disipadores y la respuesta traslacional y rotacional de la estructura.
6. Los dispositivos disipadores se modelarán utilizando propiedades medidas experimentalmente en especímenes reales similares a los que se colocarán en el edificio.
7. Los elementos que soportarán a los dispositivos disipadores se modelarán con propiedades elásticas y de postfluencia.
8. El cortante basal no será menor al establecido por el UBC.
9. Las distorsiones de entrepiso no serán mayores que 0.015.

Para el análisis y revisión del resto de los elementos de la estructura y la cimentación, así como para el detallado, se utilizarán los requerimientos estipulados para tal efecto en el UBC.



Dimensiones en pulgadas

Fig. 2.1 Vista frontal de una placa ADAS típica

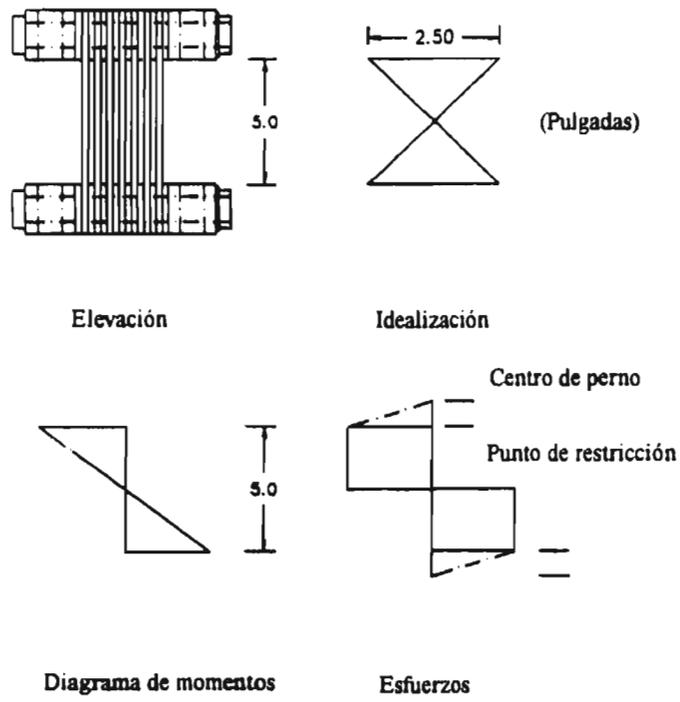


Fig. 2.2 Idealización de la placa ADAS (Whittaker et al, 1989)

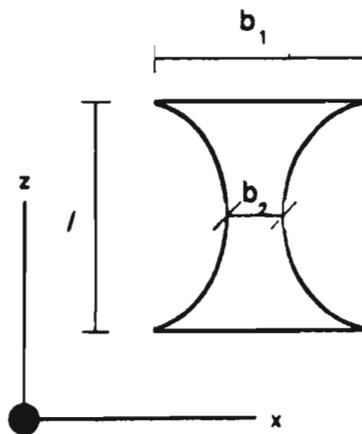
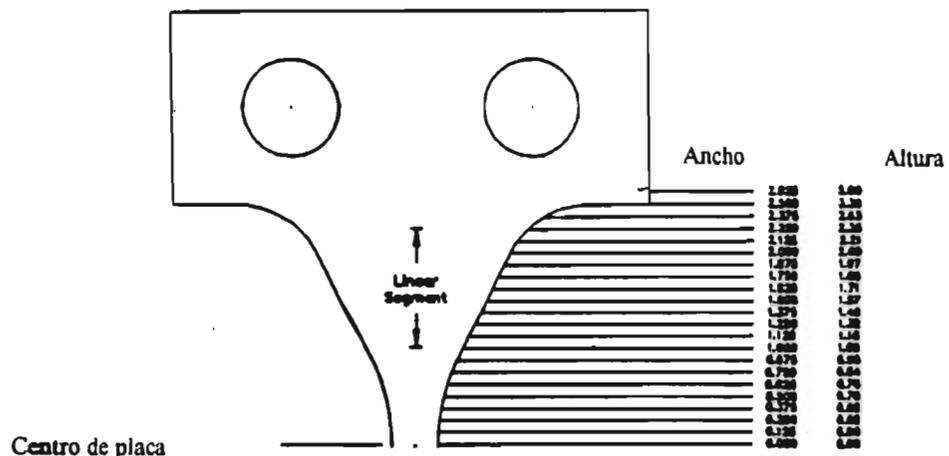
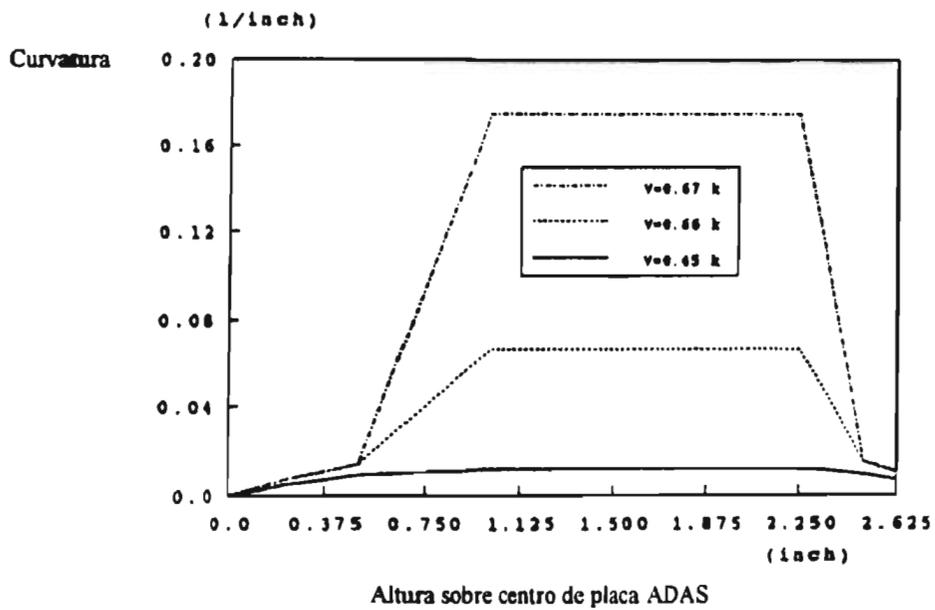


Fig. 2.3 Idealización de la placa ADAS (Tena, 1997)



a) Perfil de placa ADAS medido



b) Distribución de curvaturas

Fig. 2.4 Distribución de curvaturas en la mitad superior de una placa ADAS

3. Análisis paramétrico de un marco con disipadores de energía

En estudios analíticos previos realizados a marcos con disipadores de energía TADAS y ADAS se observaron comportamientos no esperados en dichos marcos. Uno de ellos fue la aparición de articulaciones plásticas en la viga de entrepiso cerca de la conexión disipador - viga (Ruiz et al, 1996). Por otro lado, no se tenían antecedentes sobre la manera en que la carga axial podía afectar el comportamiento de los dispositivos TADAS y ADAS, aunque en estudios realizados al dispositivo ADAS ya se había observado que la carga axial puede ser un factor importante en el comportamiento del dispositivo cuando se presentan grandes demandas de desplazamiento (Whittaker et al, 1989).

Por lo anterior, se decidió realizar el presente análisis paramétrico de un marco dotado con dispositivos (1)TADAS y 2) ADAS) a fin de poder estudiar la razón por la que aparecen las articulaciones plásticas en la zona de conexión, y al mismo tiempo observar el efecto de la carga axial en el comportamiento de los dispositivos.

Para el análisis se escogió un marco bidimensional sencillo y se estudió la forma más adecuada de modelar los dispositivos disipadores en un programa de análisis no lineal.

3.1 Características generales del modelo bidimensional analizado

Se decidió tomar el mismo modelo estudiado por Tsai et al (1993) ya que se podría partir de un sistema estudiado y probado. El marco es sencillo y se puede manejar en el diferentes variables de interés para conocer su influencia en la respuesta del marco.

El modelo analizado por Tsai se presenta en la fig. 3.1. Dicho marco está formado por perfiles de acero estructural A-36, siendo W 12x65 en columnas, W 16x36 en la trabe del primer nivel y W 16x31 en la trabe del segundo nivel. Los contravientos están formados de dos perfiles WT 13x14 y WT 13x12.5 espalda con espalda, en los niveles 1 y 2 respectivamente. Se conocen las dimensiones reales del marco, masa de entrepiso y periodos fundamentales sin los dispositivos.

Primeramente se realizó un análisis para conocer los períodos y formas modales del marco sin disipadores con el fin de comprobar que con los datos de rigidez y masa reportados por Tsai se obtuvieran los períodos descritos por el mismo. Por tanto, se modeló el marco sin dispositivos en el programa de análisis ETABS (Habibullah, 1991). Se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 1.

| Tabla 1 Períodos fundamentales del marco sin TADAS | | |
|---|------------------------------|---------------------|
| Masa por nivel | 0.019 ton-s ² /mm | |
| Periodos | Primer modo | Segundo modo |
| Tsai et al | 0.881 s. | 0.237 s. |
| ETABS | 0.881 s. | 0.268 s. |

Como se puede observar, existe una muy buena aproximación entre los valores reportados por Tsai y los obtenidos mediante el análisis en ETABS.

Posteriormente, se prosiguió a formar el modelo bidimensional para ser estudiado en el programa de análisis no lineal DRAIN-2D (Kannan y Powell, 1973).

Se trató de ajustar el modelo con el fin de reproducir los resultados que se informan en el estudio mencionado, para lograrlo se utilizó el modelo analítico de la fig. 3.2. Este modelo cuenta con los mismos elementos, masas y dimensiones que el de la fig. 3.1, considerando 1.0% de amortiguamiento crítico ($\xi = 0.01$). Como se observa en la fig. 3.2, en el detalle de la conexión disipador - viga se ha colocado un buen número de nudos, esto para poder modelar ya sea una sola placa equivalente o el arreglo completo de placas que forman el dispositivo. De esta manera se podrán comparar las respuestas con diferentes opciones de modelación del dispositivo disipador.

Para realizar el ajuste del modelo se utilizó el registro del evento El Centro (1940) escalado a 50 gals, ya que fue uno de los eventos utilizados en el estudio mencionado, y del cual se tienen resultados. En la fig. 3.3 las gráficas (a) y (b) corresponden a los desplazamientos obtenidos en el segundo y primer nivel, respectivamente, con y sin TADAS, del marco bidimensional estudiado por Tsai et al (1993). Por otro lado, las gráficas (c) y (d) son los desplazamientos obtenidos con el modelo de la fig. 3.2 sin TADAS en el segundo y primer nivel, respectivamente.

Tomando en cuenta únicamente las líneas punteadas en (a) y (b) que corresponden a la respuesta del modelo estudiado por Tsai et al (1993) sin dispositivos TADAS, se puede apreciar que son similares a las obtenidas con el modelo propuesto en este estudio sin dispositivos TADAS, únicamente el marco. Los valores de la amplitud máxima son parecidos (26 mm en el segundo nivel y 17 mm en el primer nivel, aproximadamente) y se tiene un periodo semejante.

Existen diferencias en la forma de las historias de los desplazamientos que se pueden deber a que en el estudio realizado por Tsai et al (1993) tal vez se usó un sismo recortado, sin estar seguro. Se puede concluir que hay una buena aproximación en los resultados al compararlos con los obtenidos por Tsai.

Una vez ajustado el modelo, se prosiguió a estimar la resistencia lateral del marco sin disipadores mediante el método del trabajo virtual aplicado a diferentes mecanismos de falla propuestos. La Tabla 2 muestra los resultados y en la fig. 3.4 se observan los mecanismos propuestos. El mecanismo que domina la falla es el de viga débil-columna fuerte, con un factor c (cortante basal entre peso total del marco) igual a 0.11. Este mecanismo de falla es el recomendado por las filosofías modernas de diseño, por lo tanto este modelo también servirá para comprobar que la colocación de los dispositivos disipadores de energía no cambien el mecanismo de falla propuesto por los reglamentos.

El modelo ajustado después de un buen número de análisis, será una herramienta muy importante, pues en este se analizará la influencia que tiene la variación de la rigidez de las trabes con respecto a la rigidez de las columnas en el comportamiento de los dispositivos TADAS y ADAS. Lo anterior permitirá observar la formación de las articulaciones plásticas cerca de la conexión dispositivo - viga, y al mismo tiempo analizar la influencia de la carga axial en el comportamiento de los dispositivos disipadores.

| Mecanismo | c |
|--|----------|
| Mec. reglamento (viga débil - columna fuerte). | 0.108 |
| Articulaciones en base cols. PB, parte sup. cols. N2 y viga PB | 0.127 |
| Piso suave en PB | 0.156 |

3.2 Modelado de placas TADAS y ADAS para el análisis no lineal

Partimos de que se conocen las características de las placas de acero que forman el dispositivo; dichas características se reproducen en la Tabla 3 (Tsai et al, 1993).

| Tabla 3 Características de placas TADAS del marco | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------------|--------------------|
| Nivel | t (mm) | h (mm) | b (mm) | N (n. de PL) | Δy (mm) |
| N1 | 36 | 35 | 177.6 | 9 | 4.1 |
| N2 | 36 | 35 | 178.5 | 5 | 4.1 |

En estudios previos los dispositivos disipadores (TADAS y ADAS) se habían modelado analíticamente para el análisis no lineal como elementos viga y tomando en cuenta únicamente su comportamiento a flexión. Para el análisis paramétrico del marco se decidió modelar los dispositivos TADAS y ADAS en el programa DRAIN-2D con un elemento columna prismática equivalente. De esta manera se podrá determinar la influencia de la carga axial en el comportamiento de los dispositivos.

Para el comportamiento a flexión de los dispositivos TADAS, la rigidez elástica y resistencia plástica fueron obtenidas con las expresiones de K_d (ec. 1.1) y P_p (ec. 1.3) descritas en el primer capítulo y utilizando las características geométricas mostradas en la Tabla 3. Se usaron los valores nominales del esfuerzo de fluencia (f_y) y del módulo de elasticidad ($f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ y $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$).

Por otro lado, puesto que el dispositivo TADAS se modeló como columna, fue necesario determinar la capacidad a carga axial de la placa triangular y así obtener la columna prismática equivalente.

Se requería conocer la rigidez a carga axial de la placa triangular para poder determinar el área equivalente de la columna prismática, esto es :

$$= \frac{EA}{L} \quad (3.1)$$

Al observar la fig. 3.5 podemos definir la variación del área transversal a lo largo de la placa como :

$$A = \left[\left(\frac{b-b'}{h} \right) x + b' \right] t \quad (3.2)$$

Utilizando el método de las flexibilidades se tiene que :

$$f_{11} = \int_0^L \frac{dx}{EA}$$
$$f_{11} = \int_0^L \frac{dx}{E \left[\frac{(b-b')x}{h} + b' \right] t} \quad (3.3)$$

Completando la integral y resolviéndola directamente :

$$f_{11} = \frac{1}{Et} \left(\frac{h}{b-b'} \right) \left[\text{Ln} \frac{b}{b'} \right] \quad (3.4)$$

Finalmente la rigidez a carga axial de la placa triangular es :

$$= f_{11}^{-1}$$
$$= \frac{Et(b-b')}{h(\text{Ln}b - \text{Ln}b')}$$

Con la ecuación anterior es posible determinar la rigidez axial de la placa triangular, para posteriormente igualarla con la ecuación (3.1), despejar el área de una sección transversal equivalente para conocer la capacidad a carga axial y así poder modelarla como una columna prismática equivalente en el programa DRAIN-2D.

Para el caso del dispositivo ADAS, primeramente se determinó la geometría del dispositivo de tal manera que tuviera la misma rigidez lateral que la placa TADAS y así asegurar que se tendrían los mismos efectos observados en el marco con TADAS al colocar los dispositivos ADAS.

La determinación de las características del dispositivo ADAS se realizó utilizando las expresiones analíticas propuestas por Tena (1996). Conocida la rigidez lateral de las placas TADAS, esta se igualó a la ecuación (2.4) de la rigidez lateral del dispositivo ADAS y conocidas las dimensiones de altura, ancho de base y ancho de garganta de la placa ADAS, sólo se despejó para conocer el espesor de las placas. Una vez conocidas las dimensiones de los dispositivos ADAS, se aplicaron las expresiones (2.9), (2.10) y (2.11) para conocer el momento plástico, cortante y capacidad a carga axial del dispositivo, y de esta manera se podía modelar completamente el dispositivo en el programa de análisis. Para obtener la rigidez a carga axial del dispositivo ADAS se utilizó la siguiente expresión:

$$r_{ax} = \frac{1}{f_{11}} \quad (3.6)$$
$$f_{11} = \frac{l}{Eb_1 t \ln(b_1/b_2)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right)$$

En la Tabla 4 se muestran las características de las placas TADAS y ADAS utilizadas en el análisis no lineal del marco. En la fig. 3.6 se puede observar las dimensiones de los dispositivos.

| Tabla 4 Características geométricas y mecánicas de los dispositivos TADAS y ADAS | | | | | | | | | | |
|---|--------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| Disp. | Nivel | l cm | b₁ cm | b₂ cm | t cm | K kg/cm | Δy cm | M_p Ton-m | V Ton | P Ton |
| TADAS | N1 | 35 | 18 | - | 3.6 | 8448 | 0.41 | 1.616 | 3.46 | 79.97 |
| | N2 | 35 | 18 | - | 3.6 | 8491 | 0.41 | 1.625 | 3.46 | 80.22 |
| ADAS | N1 | 35 | 21 | 3.5 | 2.39 | 8448 | 0.38 | 0.706 | 3.25 | 68.92 |
| | N2 | 35 | 21 | 3.5 | 2.40 | 8491 | 0.38 | 0.712 | 3.25 | 69.11 |

P : Carga axial resistente.

De la tabla anterior se puede observar que los dispositivos TADAS y ADAS mantienen dimensiones similares y prácticamente no varía su rigidez lateral, por otro lado, aunque los dispositivos tienen diferente capacidad de momento plástico, el cortante que soportan difiere en 10%. Lo anterior permite concluir que el comportamiento a carga lateral de los dispositivos es aproximadamente similar.

En cuanto al comportamiento a carga axial de los dispositivos se ve lo siguiente: si dividimos la rigidez axial de las placas TADAS entre la rigidez axial de las placas ADAS podemos observar que la placa TADAS es 16% más rígida que la placa ADAS. Lo anterior permite concluir que para dos dispositivos TADAS y ADAS, con dimensiones similares y la misma rigidez lateral, el dispositivo TADAS tiene mayor rigidez axial que el dispositivo ADAS. Por otro lado, en la fig. 3.7 se muestran los diagramas de interacción carga axial - momento flexionante de las placas TADAS y ADAS, y se observa que el dispositivo TADAS tiene un diagrama con mayor área que el mostrado para el dispositivo ADAS. Estas observaciones están basadas únicamente en las expresiones analíticas de ambos dispositivos y se comprueban durante el análisis lineal y el estudio con el método del elemento finito.

3.3 Influencia del modelado en la respuesta estructural

Una vez definido el modelo bidimensional y habiendo determinado la columna prismática equivalente para modelar a los dispositivos TADAS y ADAS, se prosiguió a realizar los análisis no lineales del marco con los dispositivos en el programa DRAIN-2D.

Para poder estudiar la formación de articulaciones plásticas cerca de la conexión dispositivo - viga y la influencia de la carga axial en el comportamiento de los dispositivos disipadores, se decidió modificar la rigidez de las traveses de entrepiso.

Se propusieron 14 perfiles de sección W con las propiedades mostradas en la tabla 5, los cuales incluyen perfiles que pueden ser colocados en el marco sin cambiar mucho su comportamiento, hasta perfiles muy pequeños que lo vuelven muy flexible ante carga lateral.

En la conexión TADAS - viga, se tomó en cuenta la placa de asiento de los dispositivos para el cálculo de las propiedades mecánicas de esa zona, ya que esta tiene mayor rigidez y capacidad a momento que el resto de la viga de entrepiso.

Para el análisis no lineal se utilizó el registro de El Centro (1940) sin escalar, es decir, con la aceleración máxima de 341.7 gals. Se decidió seguir utilizando este registro ya que la estructura fue diseñada para soportar sismos similares al mencionado.

Dentro de los análisis inelásticos realizados se compararon los resultados obtenidos con el modelo bidimensional y el arreglo completo de placas, con el modelo tradicional utilizando una sola placa equivalente para modelar todo el arreglo de los dispositivos (fig. 3.8).

| Tabla 5 Propiedades de perfiles estudiados | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Perfil | I cm ⁴ | Z cm ³ | Mp Ton - m |
| W 14 x 82 | 36711 | 2278 | 57.63 |
| W 16 x 67 | 34708 | 2130 | 53.89 |
| W 16 x 57 | 31550 | 1721 | 43.54 |
| W 16 X 50 | 27430 | 1508 | 38.15 |
| W 16 X 45 | 24391 | 1349 | 34.13 |
| W 16 X 36 | 18647 | 1049 | 26.54 |
| W 16 X 31 | 15609 | 885 | 22.39 |
| W 14 X 30 | 12112 | 775 | 19.61 |
| W 14 X 22 | 8283 | 544 | 13.76 |
| W 10 X 26 | 5944 | 513 | 12.98 |
| W 8 x 21 | 3134 | 334 | 8.45 |
| W 6 x 16 | 1336 | 192 | 4.86 |
| W 6 x 12 | 920 | 136 | 3.44 |
| W 6 x 9 | 683 | 102 | 2.58 |

I = Momento de inercia con respecto al eje mayor

Z = Módulo de sección plástica

Mp = Momento plástico

Para realizar las comparaciones se utilizó el modelo bidimensional dotado con los dispositivos TADAS y los perfiles W 6x9, W 6x12, W 6x16 y W 8x21. Al revisar el comportamiento se observó que para los modelos con los perfiles W 6x9 y W 6x12 el marco presentaba articulaciones plásticas en la viga, cerca de la zona de la conexión TADAS - viga (fig. 3.13a) provocando la respuesta de la placa equivalente que se observa en las figs. 3.9 y 3.10. Esta respuesta se debe a que por el mecanismo mostrado en la fig. 3.13a la placa equivalente no fluye y se desplaza con el resto del marco sin disipar energía.

Lo anterior contradice los resultados del modelo con el arreglo completo, el cual muestra que las placas trabajan en forma adecuada. Para los perfiles W 6x16 y W 8x21 (figs. 3.11 y 3.12) existen resultados similares entre ambos modelos.

Se puede concluir que el modelo tradicional puede subestimar el comportamiento de los dispositivos para relaciones de inercia trabe - inercia columna (I_t/I_c) muy bajas. Lo anterior deberá considerarse cuando se realicen modelos de estructuras que vayan a ser rehabilitadas con dispositivos disipadores de energía tipo TADAS o ADAS, en las cuales se podrían presentar estas relaciones I_t/I_c bajas.

3.4 Análisis no lineal del marco con dispositivos TADAS

Para modelar las placas TADAS en el marco bidimensional se colocó el arreglo original de placas descrito por Tsai, esto es, se colocaron 9 placas TADAS en el nivel uno y 5 placas en el nivel dos. A cada placa se le asignó un número para saber su localización en el arreglo y posteriormente poder comparar las respuestas de diferentes localizaciones y modelos. De esta manera el TADAS 1 corresponde a la placa en el extremo izquierdo del arreglo del nivel 1 y el TADAS 5 a la placa del centro del mismo arreglo. De igual manera el TADAS 10 y TADAS 12 corresponden a las placas del extremo izquierdo y centro del arreglo del nivel 2, respectivamente (ver fig. 3.14).

En las figs. 3.15 a 3.28 se muestran los ciclos histeréticos de los dispositivos TADAS (desplazamiento relativo del dispositivo - cortante incidente) para los 14 perfiles estudiados en el modelo con el arreglo completo de disipadores. Se puede observar que a medida que la rigidez de la trabe descende, los desplazamientos máximos en los dispositivos aumentan. Es más notable este efecto en el dispositivo del primer nivel. Se ve que se presentan ciclos normales de histéresis, con una razonable disipación de energía.

A pesar de que se forman articulaciones plásticas inmediatamente después de la zona de conexión TADAS - viga de los modelos con los perfiles W 6x12 y W 6x9, los dispositivos presentan un comportamiento estable sin incrementos notables en los desplazamientos máximos.

Se pueden llegar a formar articulaciones plásticas en ambos lados de la conexión TADAS - viga, sin que esto se traduzca en una disminución de la disipación de energía del dispositivo. Lo anterior contradice lo mostrado en el tema anterior por el modelo tradicional, en el cual, se forman articulaciones plásticas en la conexión del disipador con la viga, provocando que el dispositivo no fluya y no se logre la disipación de energía deseada. Por lo tanto, al igual que para el caso ADAS, se debe tener cuidado en estructuras en donde se utilice el modelo tradicional y bajas relaciones de inercia trabe - inercia columna (I_t/I_c).

Al revisar el comportamiento histerético de los dispositivos se observó que al aumentar la rigidez de las vigas se presenta una disminución de la capacidad a cortante, la cual coincide con un aumento en la carga axial en la placa. Esto se debe a que al aumentar la rigidez de las vigas, y considerando que los contraventeos son muy rígidos axialmente, los dispositivos participan en la respuesta del marco tomando también carga axial. Para entender mejor este efecto se obtuvo la fig. 3.29 en donde se representa el factor inercia de trabe entre inercia de columna (I_t/I_c) y carga axial actuante entre carga axial máxima de la placa (P/P_{max}). También se presentan en tres esquemas la localización de las articulaciones plásticas en el marco para diferentes rangos del factor I_t/I_c .

De la gráfica 3.29 se puede afirmar que a medida que aumenta la inercia de los travesaños, aumenta también la carga axial sobre la placa. Esto se traduce en una disminución de la capacidad a cortante de la placa (fig. 3.15, TADAS 1).

La disminución comienza a ser importante a partir de relaciones I_t/I_c mayores que 0.6, pudiendo llegar a reducirse la capacidad a cortante del orden de 20% con respecto a la capacidad original (fig. 3.18, TADAS 10). Este decremento de la capacidad a cortante debida al aumento en la carga axial puede ser importante pues los ciclos histeréticos serán mas pequeños, lo que se traduce en menos energía disipada por los TADAS. La energía tendrá que ser disipada por medio de articulaciones plásticas en vigas y columnas. Por otro lado, los altos niveles de carga axial sobre los dispositivos TADAS pueden provocar su falla por pandeo, la cual iniciaría con los elementos extremos del arreglo (los mas cargados) hacia el centro.

En la misma gráfica 3.29 los últimos dos puntos a la derecha de cada curva corresponden a perfiles que cambian el mecanismo de falla del modelo, por lo que son poco representativos (ver en la misma fig. 3.29 la localización de las articulaciones plásticas en esquema del marco bidimensional).

Lo anterior permite concluir que la carga axial puede disminuir hasta en un 20% la capacidad a cortante de los dispositivos TADAS, por lo que se deben cuidar las relaciones de inercia de trabe a inercia de columna para evitar el incremento de la carga axial. Aunque físicamente se puede evitar la carga axial en los dispositivos TADAS mediante agujeros oblongos en las articulaciones, los resultados dan una idea del problema que se puede presentar en los dispositivos ADAS, en donde la carga axial es imposible de evitar por las condiciones de empotramiento en ambos extremos del dispositivo y por la disposición del contraviento, a menos que se cambie el diseño de los dispositivos hasta la fecha publicados en la literatura.

3.5 Análisis no lineal del marco con dispositivos ADAS

Con el fin de modelar las placas ADAS en el marco bidimensional, se decidió colocar el arreglo original de placas descrito anteriormente, esto es, se colocaron 9 placas ADAS en el primer nivel y 5 en el segundo nivel. A cada placa se le asignó un número para saber su localización en el arreglo y poder comparar las respuestas. De esta manera el ADAS 1 corresponde a la placa en el extremo izquierdo del arreglo del nivel uno y el ADAS 5 a la placa del centro del mismo arreglo. De igual manera el ADAS 10 y ADAS 12 corresponden a las placas del extremo izquierdo y centro del arreglo del nivel dos, respectivamente.

Utilizando el modelo con el arreglo completo de dispositivos se obtuvieron los ciclos histeréticos de los dispositivos ADAS (desplazamiento relativo del dispositivo - cortante incidente) para los 14 perfiles estudiados (figs. 3.30 a 3.43). Al igual que para los dispositivos TADAS, a medida que la rigidez de la trabe descende, los desplazamientos máximos en los dispositivos aumentan, siendo mas notable el efecto en el dispositivo del primer nivel. Se presentan ciclos normales de histéresis con una razonable disipación de energía. A pesar de que se forman articulaciones plásticas inmediatamente después de la zona de conexión ADAS - viga de los modelos con los perfiles W 6x12 y W 6x9, los dispositivos presentan un comportamiento estable sin incrementos notables en los desplazamientos máximos.

Para relaciones I_t/I_c bajas, el comportamiento de los dispositivos ADAS es similar al descrito anteriormente para los dispositivos TADAS, lo cual comprueba que el dispositivo ADAS tiene una rigidez lateral similar al estudiado por Tsai. También se observó que a medida que baja la rigidez de la trabe, aumenta la demanda de ductilidad en el dispositivo, y se puede llegar al caso en que se formen articulaciones plásticas fuera de la conexión ADAS - viga, sin que esto se traduzca en una disminución de la disipación de energía del dispositivo.

Se observó que al aumentar la rigidez de las vigas, se presenta una disminución de la capacidad a cortante del dispositivo, la cual coincide con un aumento en la carga axial en la placa. Dicha disminución en la capacidad a cortante es mucho más crítica que la observada en el comportamiento de los dispositivos TADAS (fig. 3.30 a 3.37), aun cuando la diferencia de carga axial actuante en los dispositivos ADAS y TADAS es de $\pm 8\%$. Se puede considerar que las cargas axiales actuantes en los dispositivos son similares. En la fig. 3.44 se muestra la relación entre la inercia de la trabe y la inercia de columna (I_t/I_c), contra el factor de carga axial actuante entre carga axial máxima de la placa (P/P_{max}). Además se muestran la localización de las articulaciones plásticas en el marco bidimensional de acuerdo al valor del factor I_t/I_c .

A partir de la gráfica 3.44 se puede afirmar que los dispositivos ADAS están sujetos a niveles de carga axial similares a los observados en los dispositivos TADAS, y que a medida que aumenta la inercia de la trabe, aumenta también la carga axial sobre la placa, lo que se traduce en una disminución de la resistencia a cortante. La disminución comienza a ser importante a partir de relaciones I_t/I_c mayores a 0.6, pudiendo llegar a ser del orden de 80% de la capacidad original. La disminución de la capacidad a cortante debida al aumento en la carga axial puede ser importante pues el área bajo los ciclos histeréticos serán más pequeña y la energía tendrá que ser disipada por medio de articulaciones plásticas en vigas y columnas. Un aspecto importante es el hecho de que los altos niveles de carga axial sobre los dispositivos provocarán la falla por pandeo, y no hay que olvidar que el dispositivo ADAS ya ha mostrado evidencias de falla por pandeo en estudio experimentales (Whittaker et al, 1989). Los últimos dos puntos de la derecha de cada curva de la fig. 3.44 corresponden a perfiles que cambian el mecanismo de falla del modelo, por lo que son poco representativos.

Los resultados obtenidos para los dispositivos ADAS son similares a los mostrados por los dispositivos TADAS.

3.6 Comparación de resultados

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente para los dispositivos TADAS y ADAS, se puede comprobar que ambos tienen rigideces laterales similares y que están sujetos a los mismos niveles de cortante y desplazamiento. Ambos dispositivos muestran ciclos de fluencia estables con ductilidad y disipación de energía razonables para valores de relaciones l_t/l_c menores a 0.6 pero arriba de este valor, la influencia de la carga axial comienza a ser importante pues aparecen disminuciones del orden del 20% de la capacidad a cortante de los dispositivos.

Para ambos dispositivos, la presencia de carga axial provoca que los ciclos histeréticos sean de menor área debido a la disminución de la capacidad a cortante, sin embargo, esta disminución es más importante para el dispositivo ADAS. En ambos casos, la disminución de la capacidad de disipación de energía se traducirá en mayor daño que tendrá que soportar el marco original.

Se revisaron los niveles de carga axial actuante en ambos dispositivos y las variaciones fueron menores a 10%. Por otro lado la capacidad a carga axial es menor para el dispositivo ADAS que para el TADAS, esto es debido a que la rigidez axial del TADAS es 16% mayor que la del ADAS.

De las figs. 3.29 y 3.44, podemos observar que para el rango de valores $0.6 \leq l_t/l_c \leq 1.2$ (valores de la relación l_t/l_c que no cambian el mecanismo de falla original del marco) los dispositivos TADAS soportan una carga axial máxima promedio de $0.30P_{max}$, mientras que el dispositivo ADAS soporta $0.35P_{max}$. Lo anterior indica que, aunque los dispositivos estén sujetos al mismo nivel de carga axial, el dispositivo ADAS se ve más afectado y sufre mayores decrementos de la capacidad a cortante.

En estudios previos realizados a dispositivos ADAS se había observado que la carga axial puede ser un factor importante en su comportamiento (Whittaker et al, 1989). Los resultados obtenidos en el análisis no lineal del marco corroboran esas observaciones y además muestran que la carga axial, tanto en dispositivos TADAS y ADAS, provocan una disminución de la capacidad de disipación de energía de los dispositivos.

Por otro lado, existe una manera física de evitar la carga axial en los dispositivos TADAS: mediante agujeros oblongos en la zona articulada, permitiendo que la placa se desplace verticalmente de manera libre sin apoyarse en ningún otro elemento. Para el caso del dispositivo ADAS, no existe alguna forma para evitar la carga axial debido a el doble empotramiento del dispositivo; y aún cuando se encontrará la forma de evitar la carga, habría que asegurar que no se alterará la rigidez del empotramiento, pues el dispositivo ADAS es muy sensible a esta rigidez.

Lo anterior hace concluir que, en el refuerzo o diseño de una estructura con elementos disipadores, el dispositivo TADAS puede ser una opción mas apropiada que el dispositivo ADAS pues se puede obtener la misma rigidez y disipación de energía, con la ventaja de poder evitar la participación de la carga axial en el comportamiento histerético del dispositivo.

Estas conclusiones son el resultado del análisis no lineal y se complementan con los resultados del análisis con elementos finitos de los dispositivos que se describen en el siguiente capítulo.

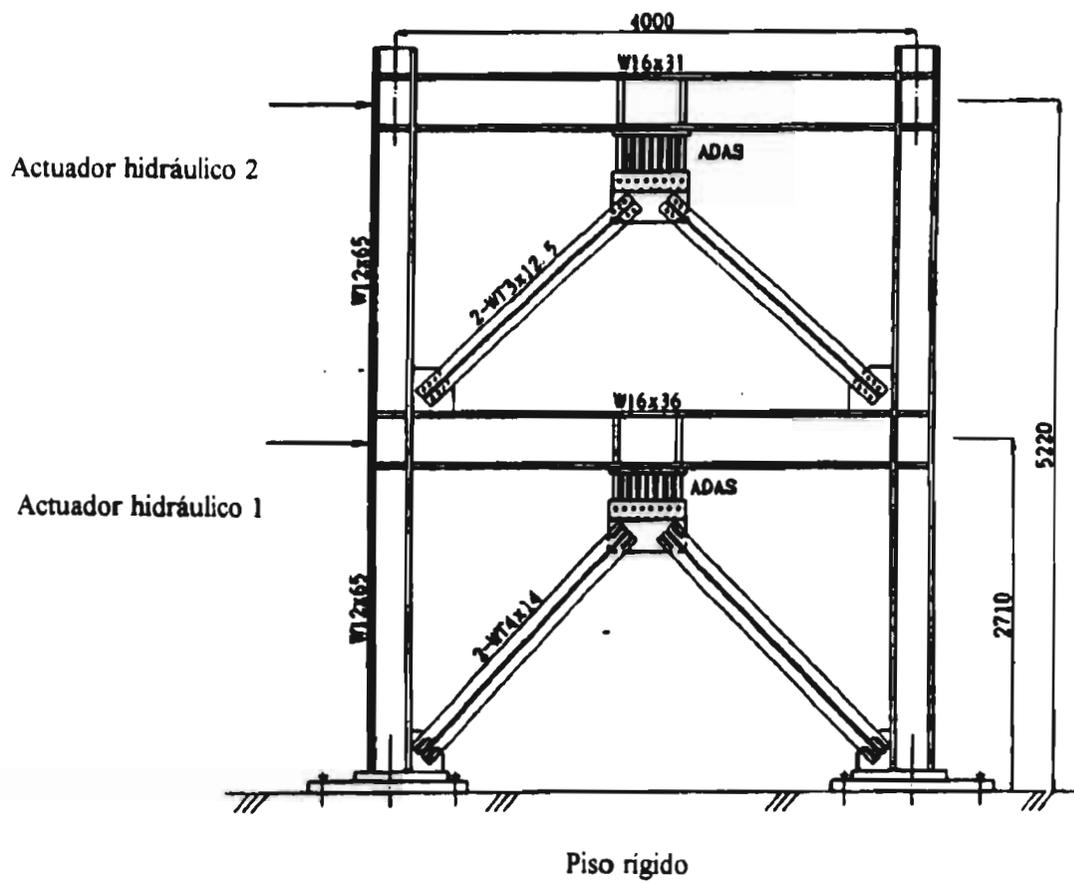


Fig. 3.1 Marco de dos niveles utilizado por Tsai et al (1993)

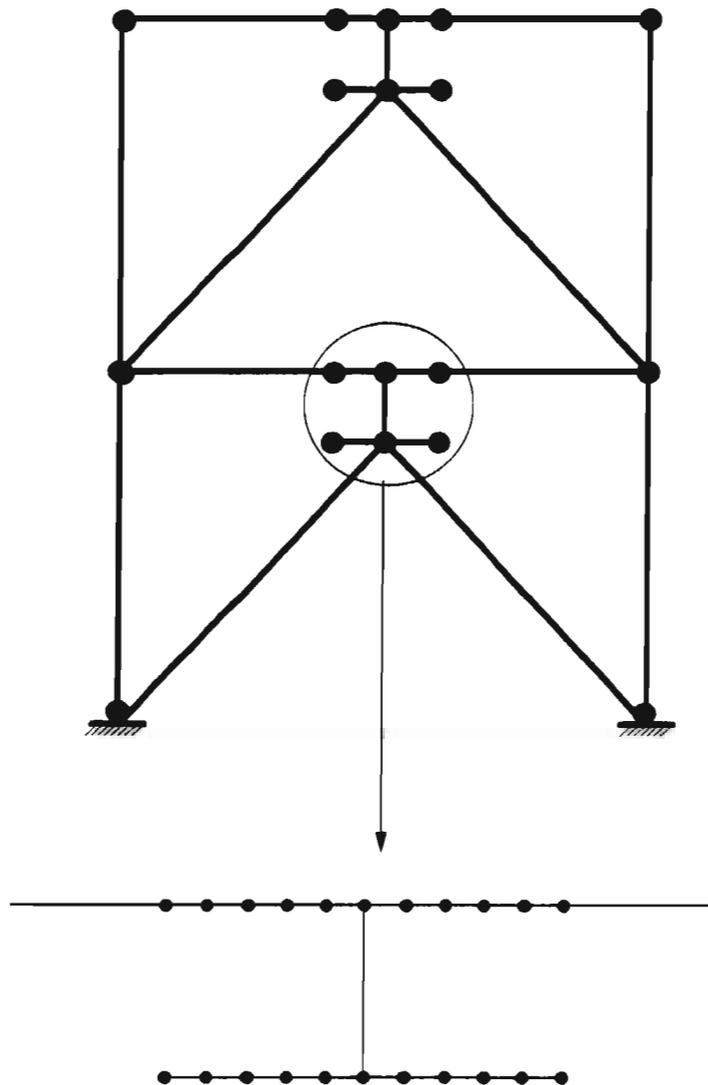


Fig. 3.2 Modelo analítico y detalle de conexión disipador - viga

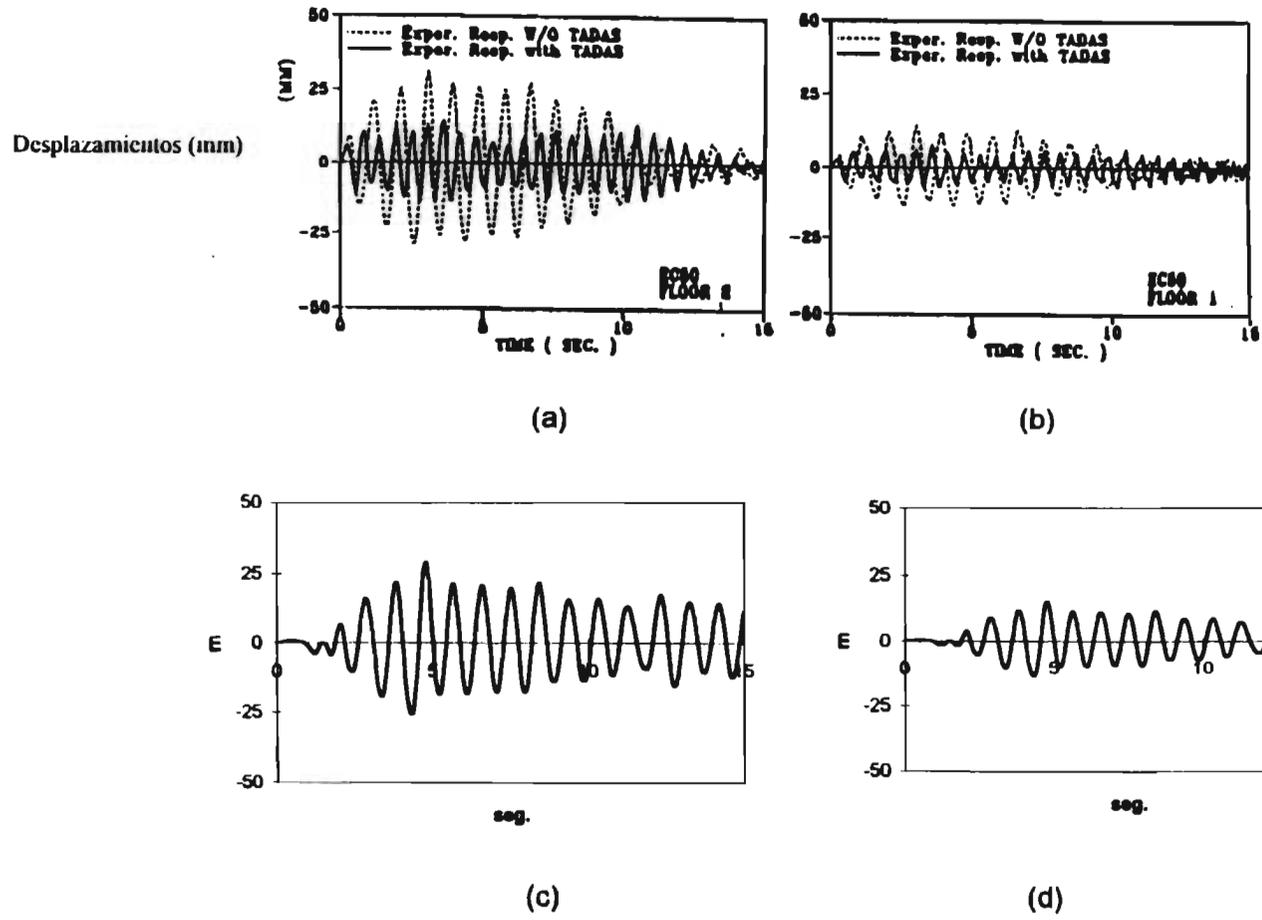
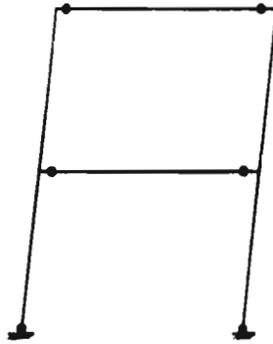
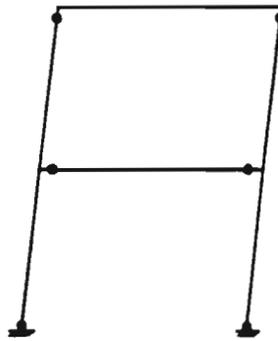


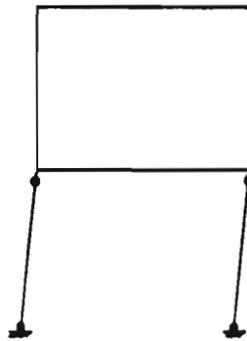
Fig. 3.3 Comparación entre el modelo bidimensional y el estudiado por Tsai et al (1993)



Mecanismo viga débil - columna fuerte



Mecanismo con articulaciones en columnas y viga primer nivel



Mecanismo piso suave en PB

Fig. 3.4 Mecanismos de falla propuestos

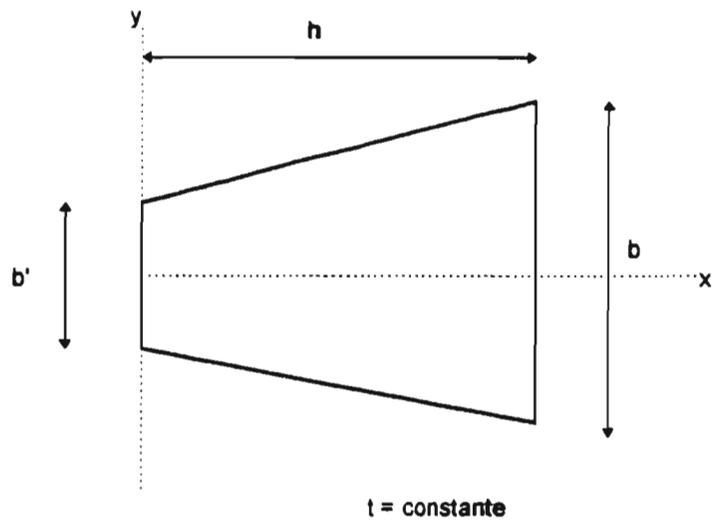


Fig. 3.5 Variación de sección transversal en placa TADAS

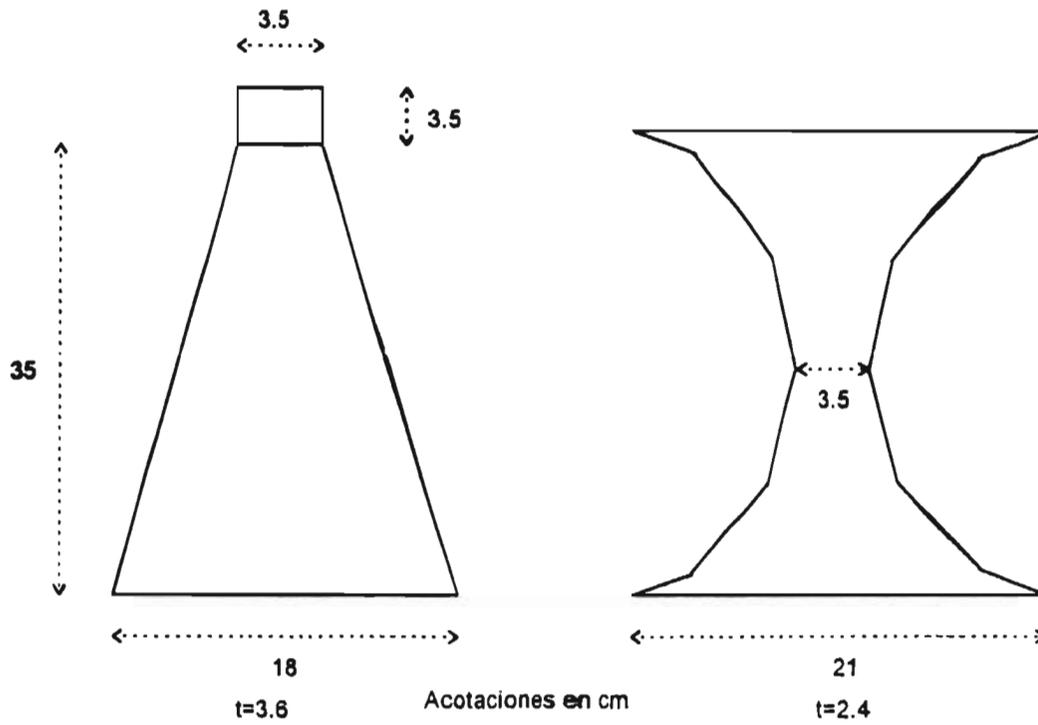


Fig. 3.6 Placas TADAS y ADAS

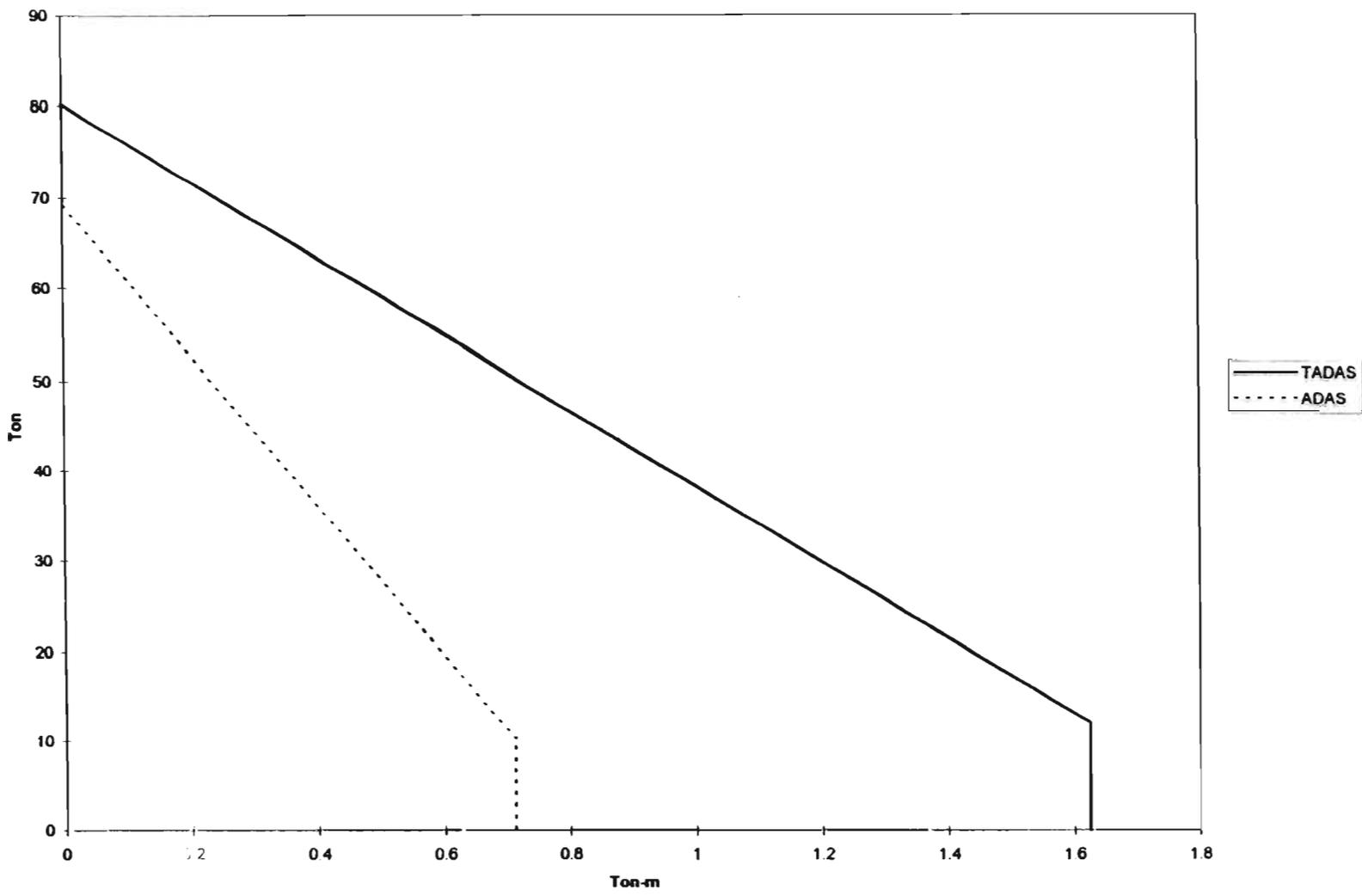
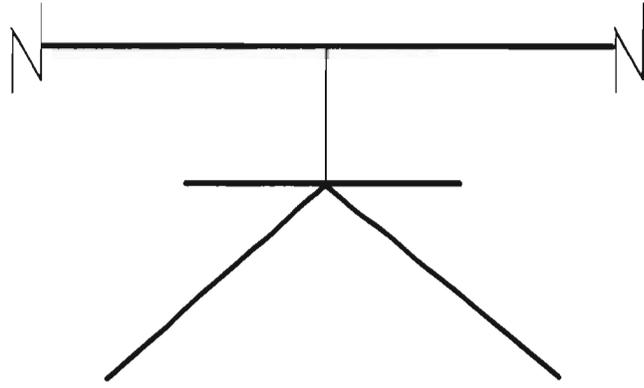
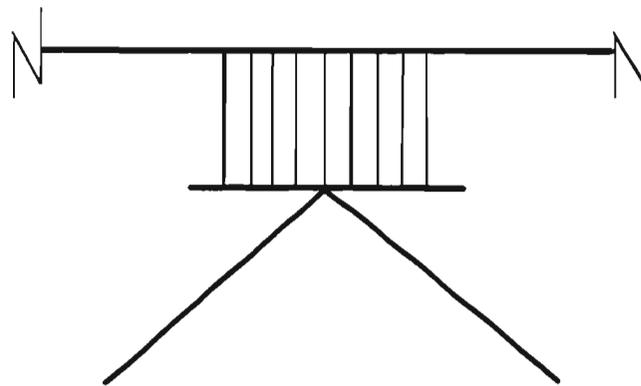


Fig. 3.7 Diagramas de Interacción de placas TADAS y ADAS



a) Modelo tradicional



b) Modelo con arreglo completo de dispositivos

Fig. 3.8 Modelos bidimensionales comparados en el estudio

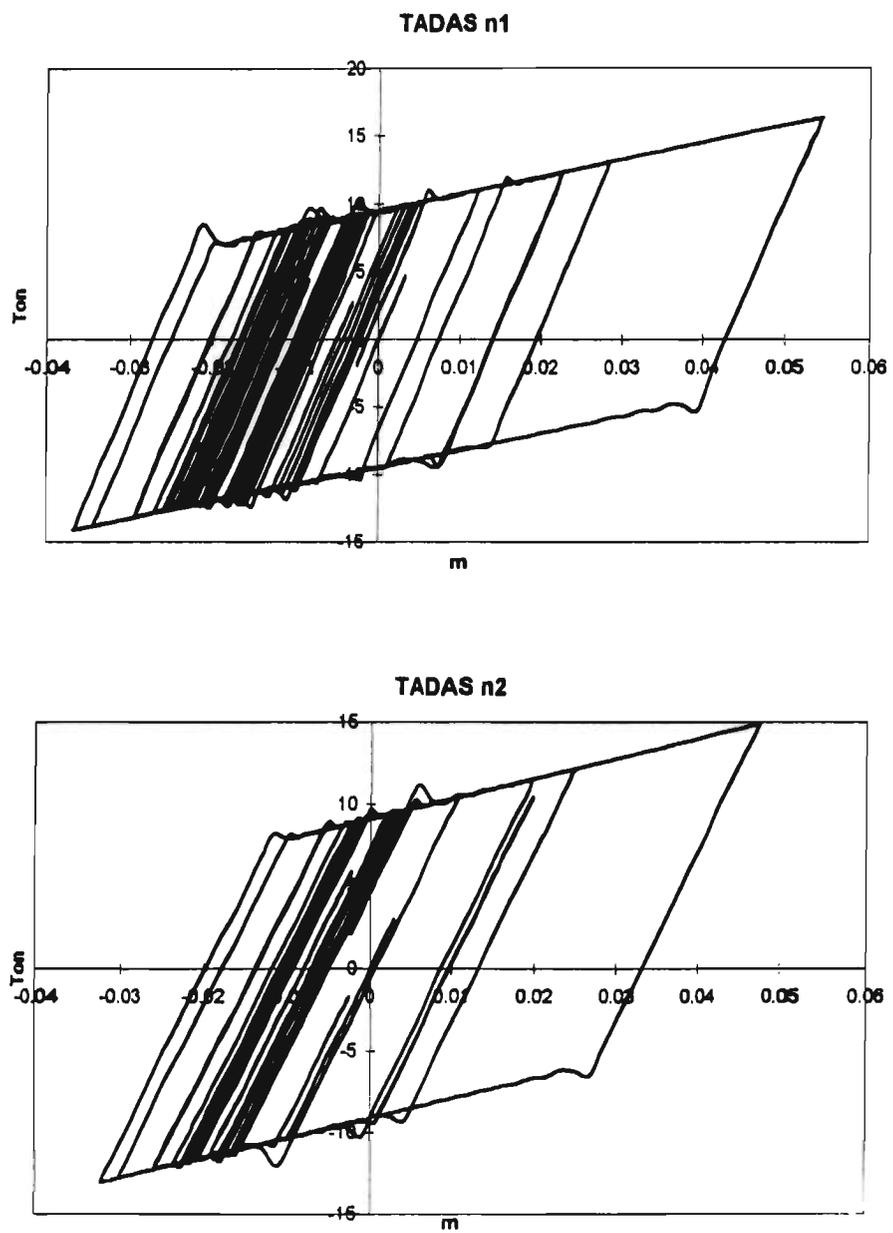
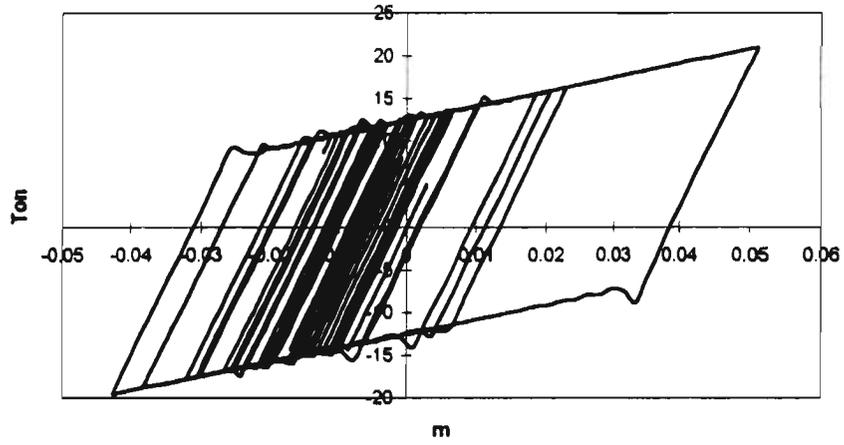


Fig. 3.9 Perfil W 6 x 9, modelo tradicional

TADAS n1



TADAS n2

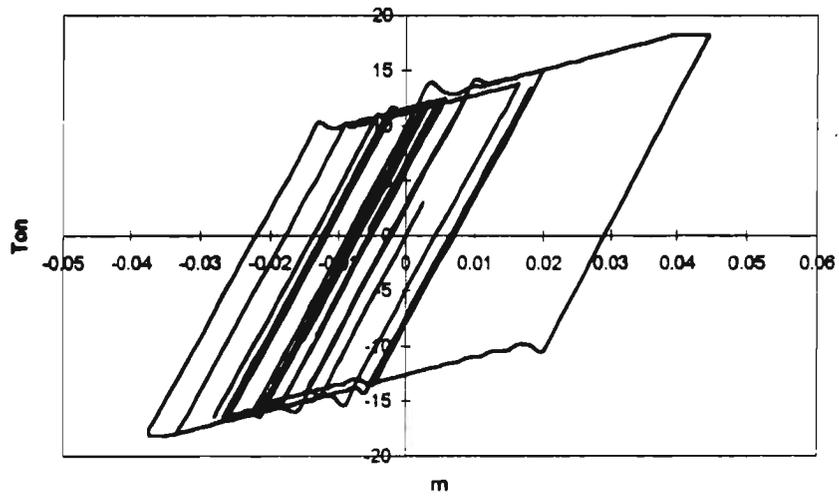


Fig. 3.10 Perfil W 6 x 12, modelo tradicional

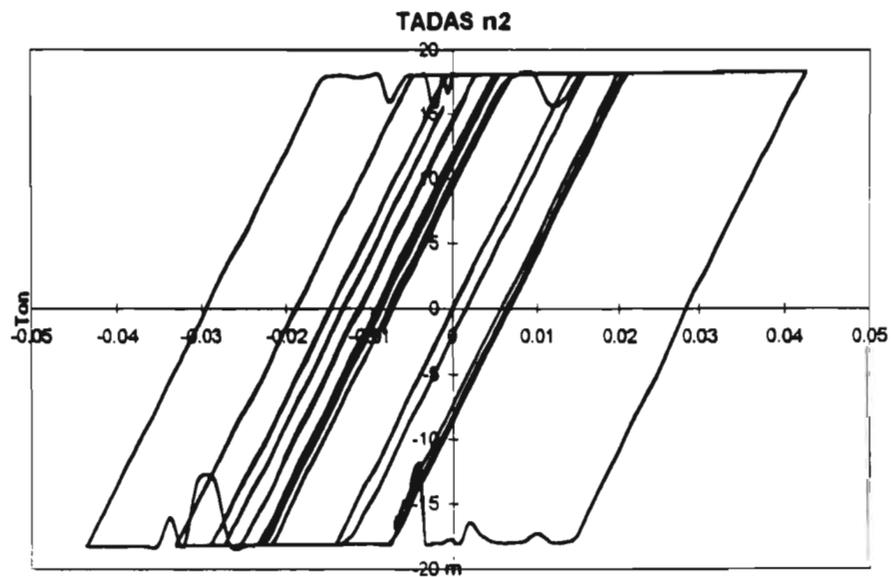
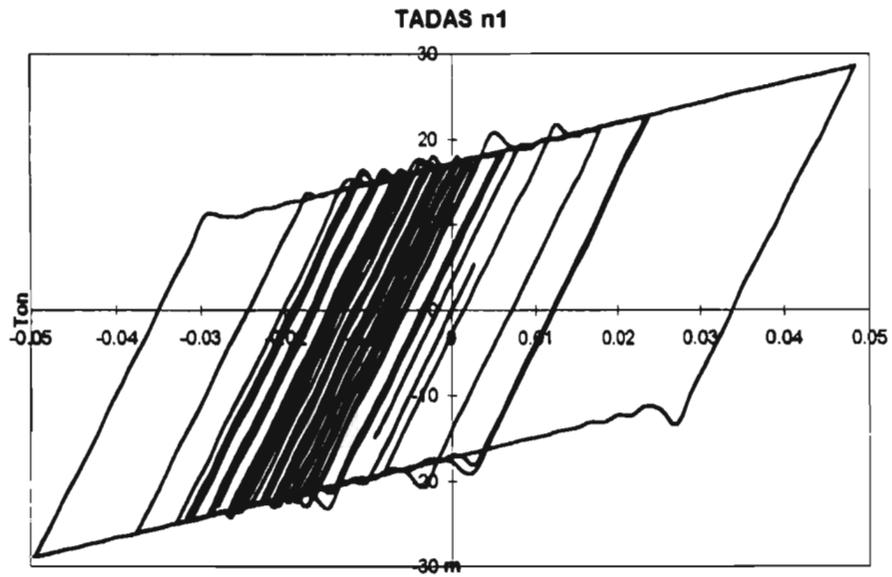


Fig. 3.11 Perfil W 6 x 16, modelo tradicional

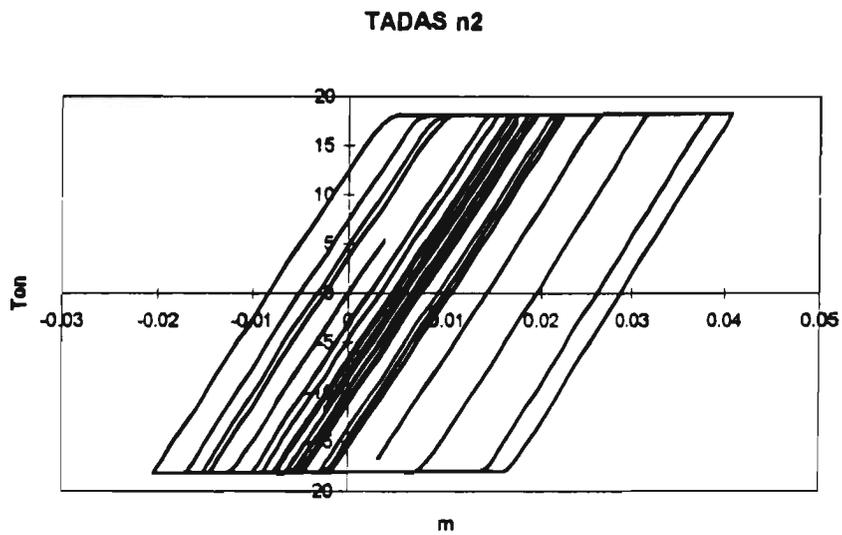
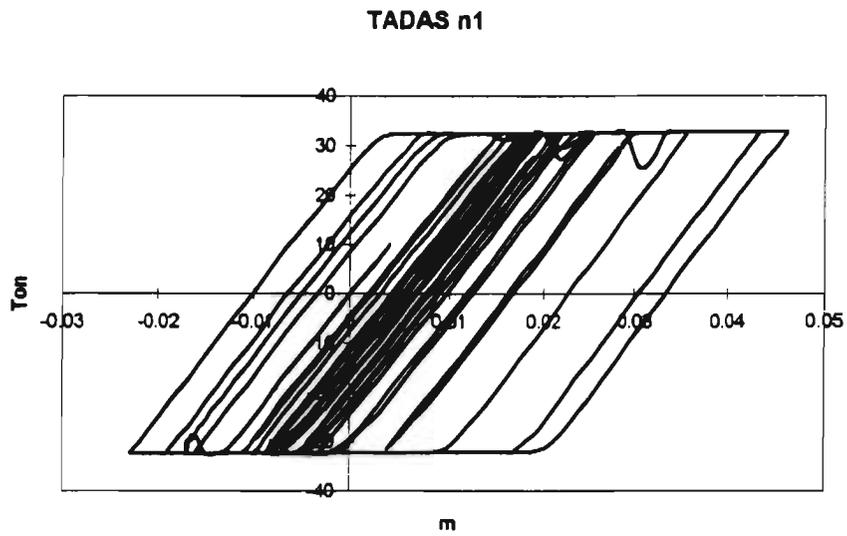
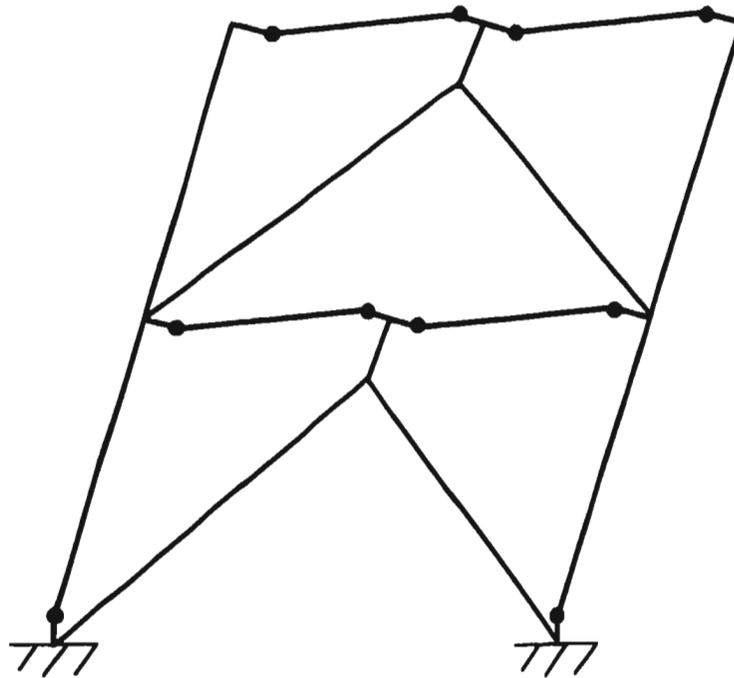
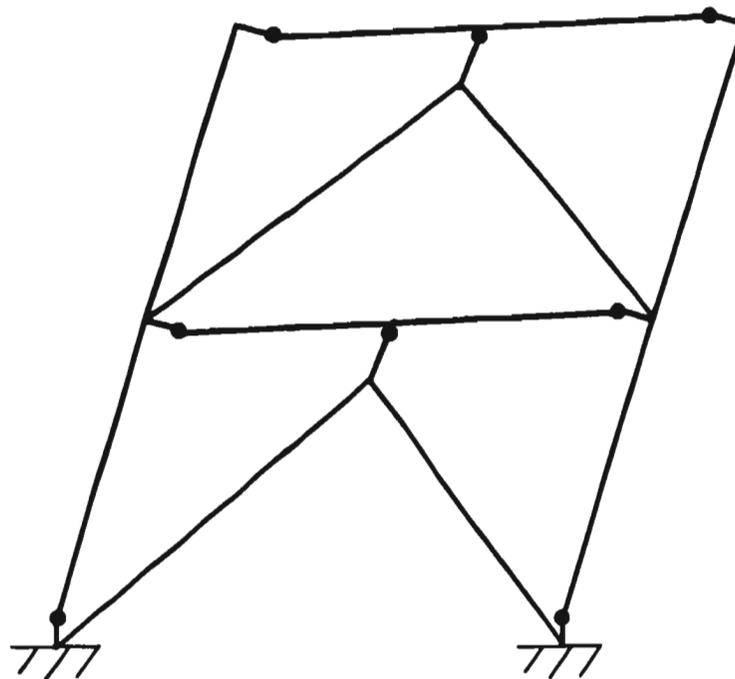


Fig. 3.12 Perfil W 8 x 21, modelo tradicional

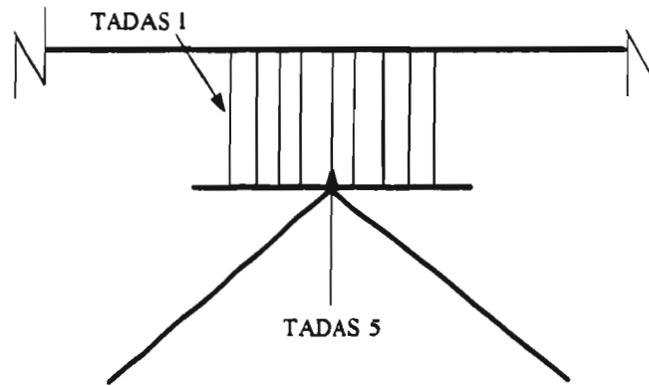


a) Para l/l_c bajas

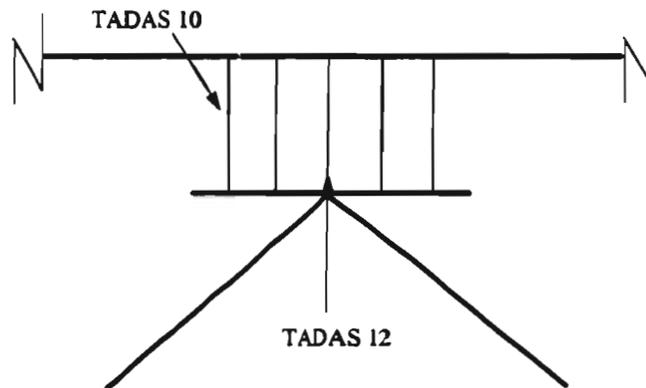


b) Para l/l_c altas

Fig. 3.13 Posibles localizaciones de articulaciones plásticas



a) Arreglo N1



b) Arreglo N2

Fig. 3.14 Nomenclatura utilizada en los dispositivos de cada arreglo

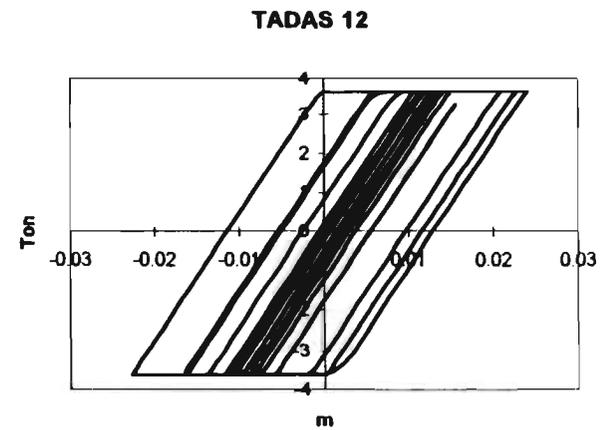
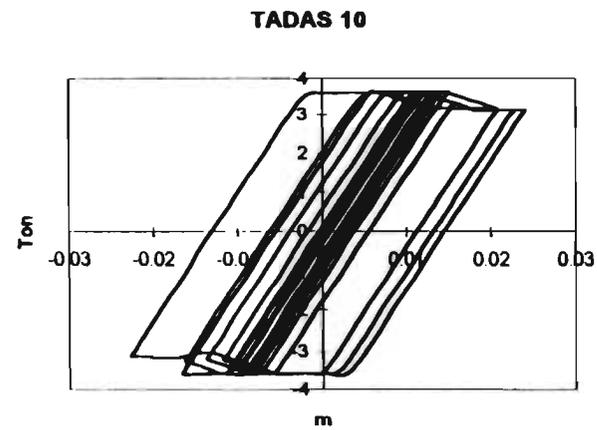
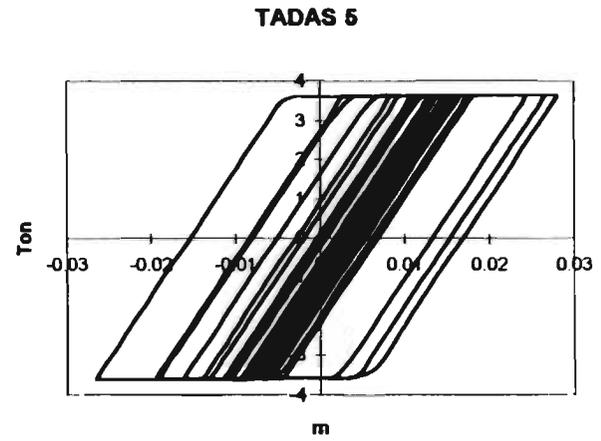
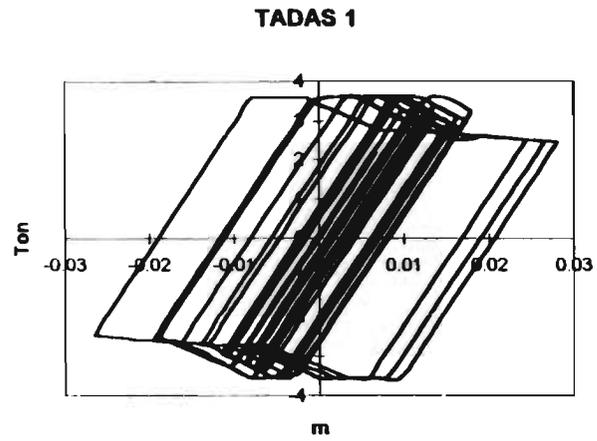


Fig. 3.15 Perfil W 14 x 82

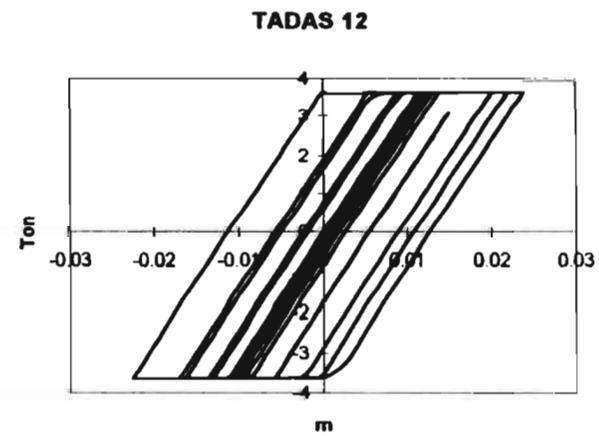
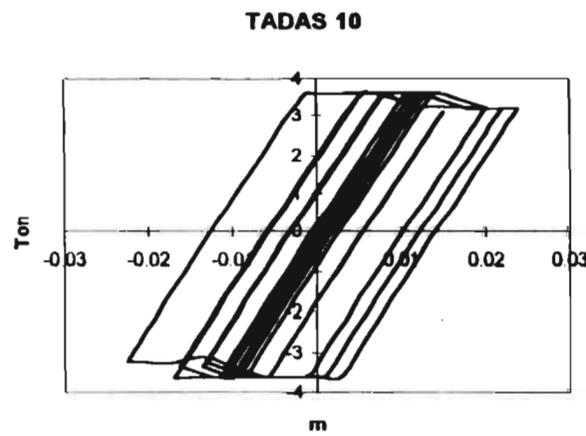
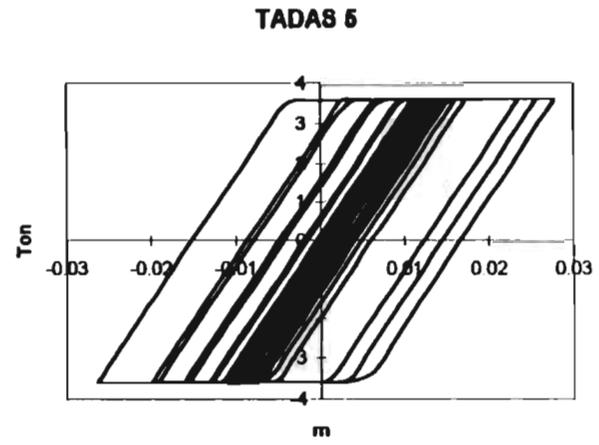
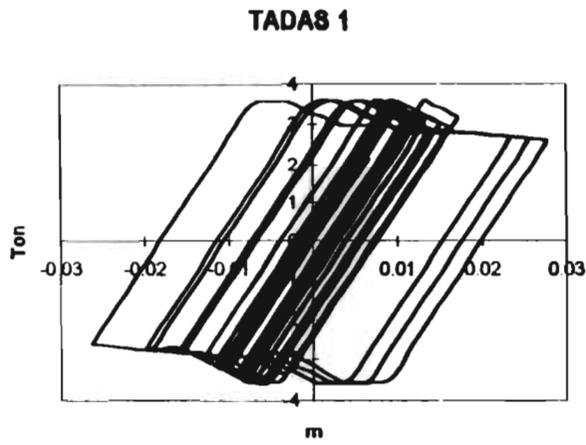


Fig. 3.16 Perfil W 16 x 67

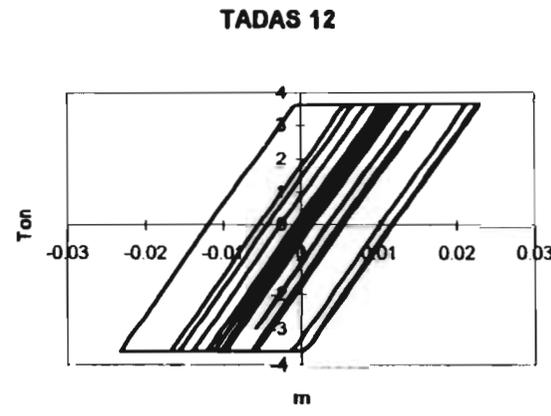
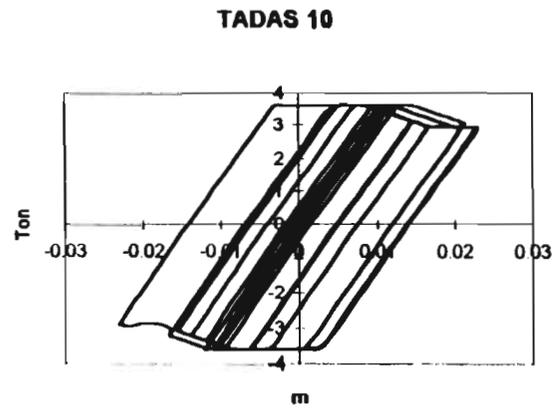
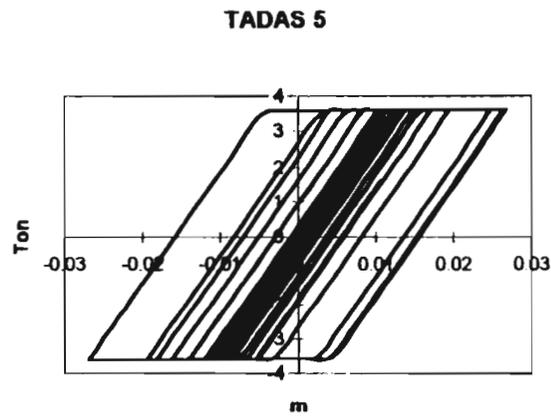
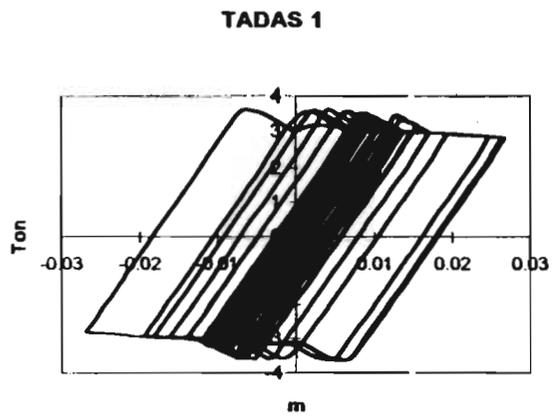


Fig. 3.17 Perfil W 16 x 57

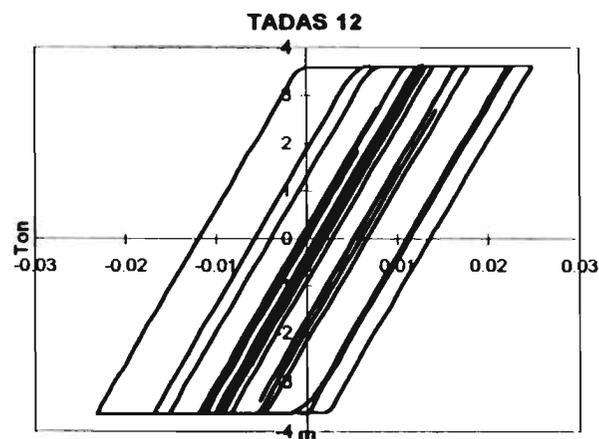
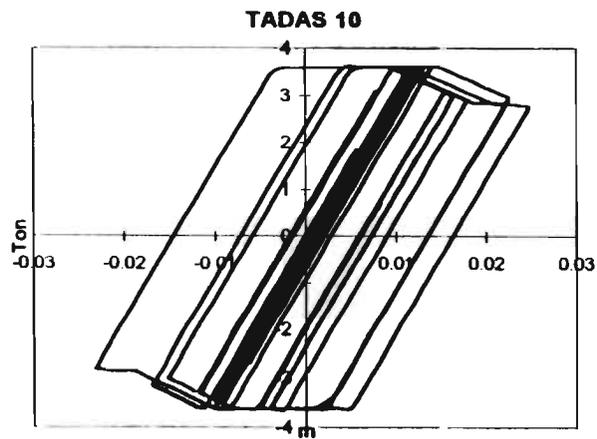
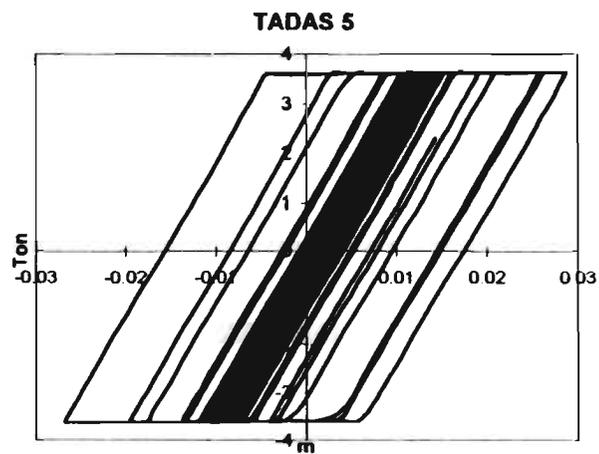
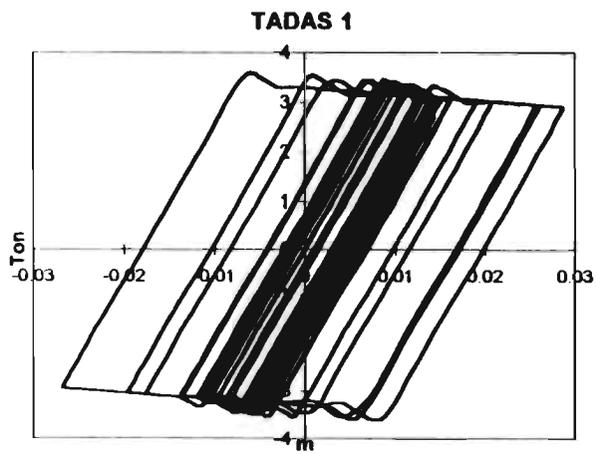


Fig. 3.18 Perfil W 16 x 50

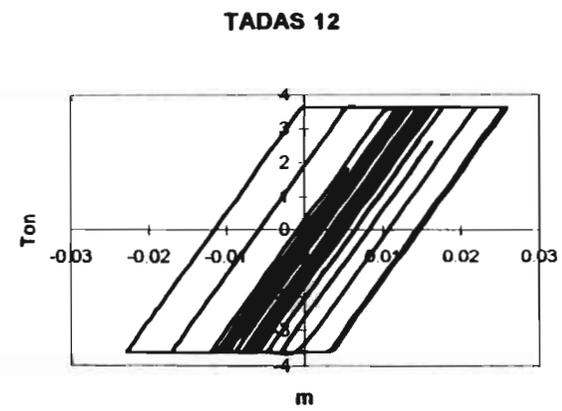
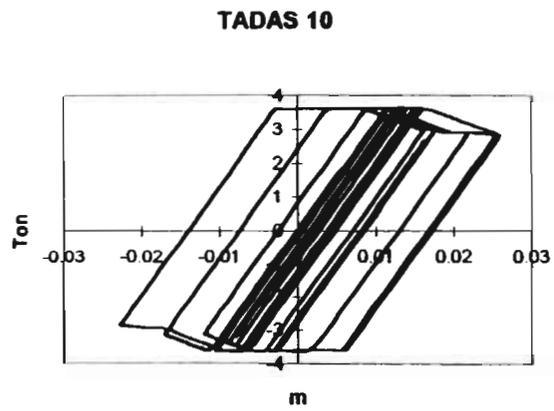
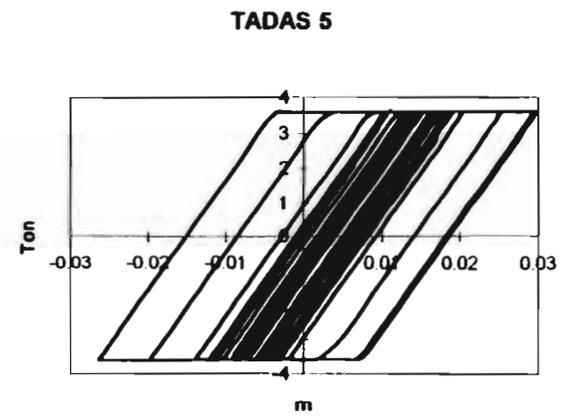
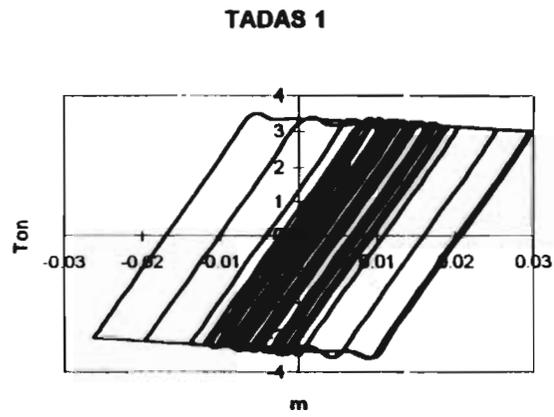


Fig 3.19 Perfil W 16 x 45

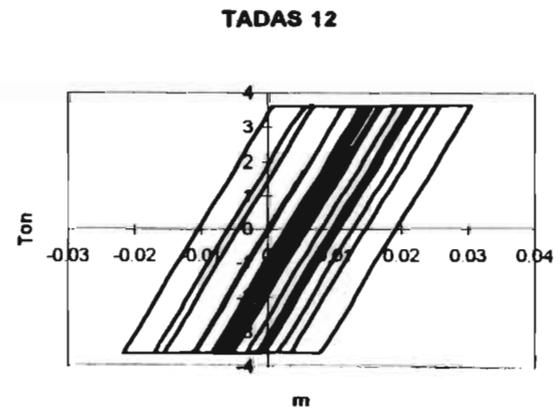
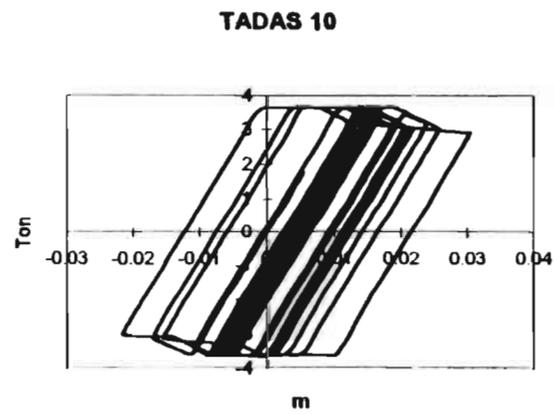
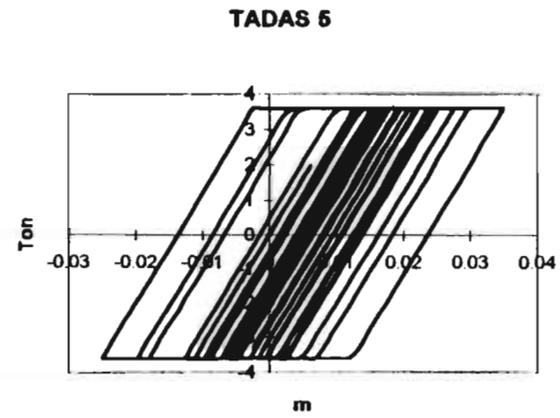
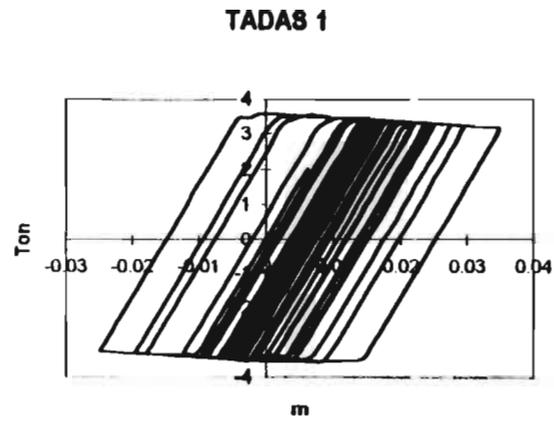
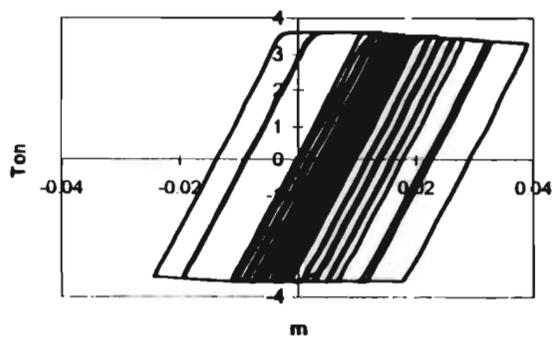
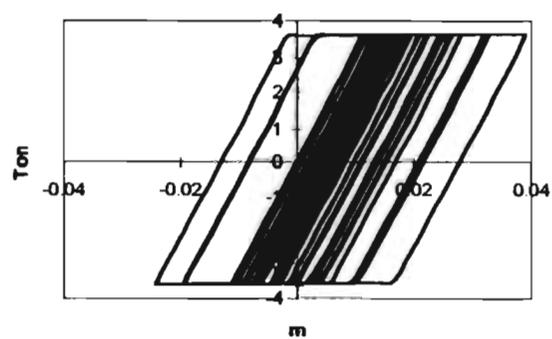


Fig. 3.20 Perfil W 16 x 36

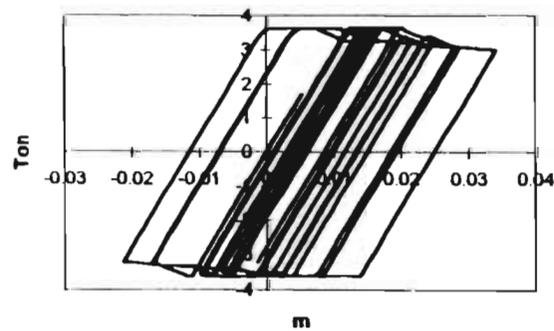
TADAS 1



TADAS 5



TADAS 10



TADAS 12

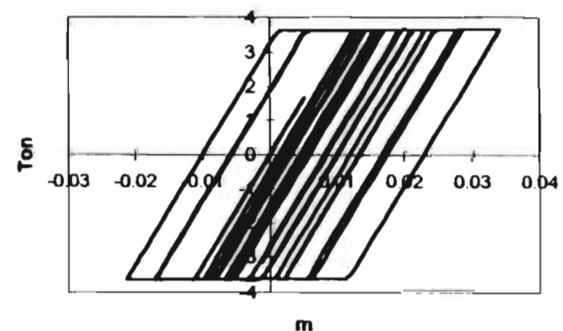


Fig. 3.21 Perfil W 16 x 31

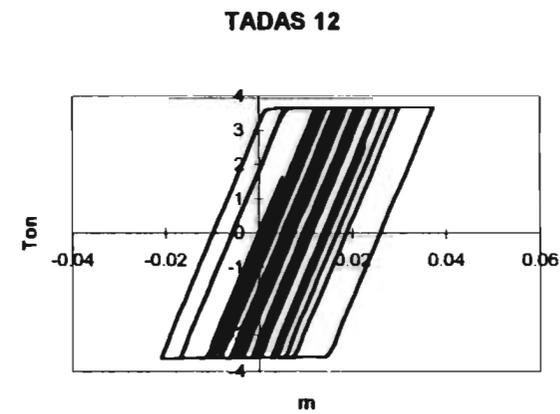
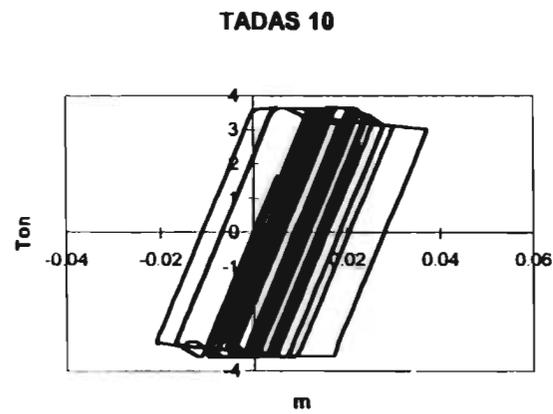
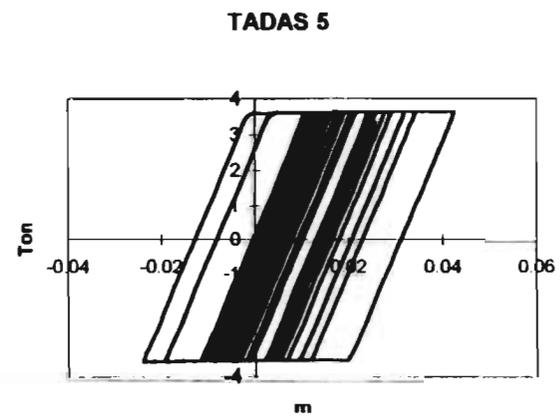
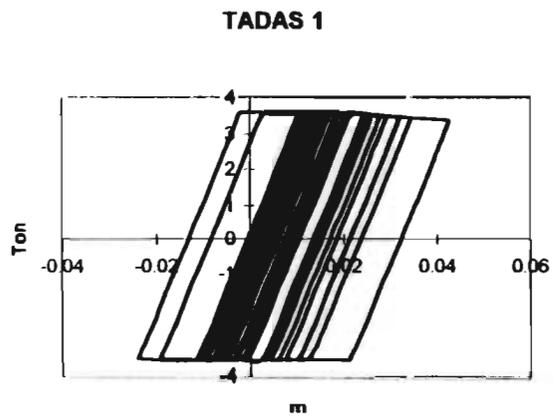


Fig. 3.22 Perfil W 14 x 30

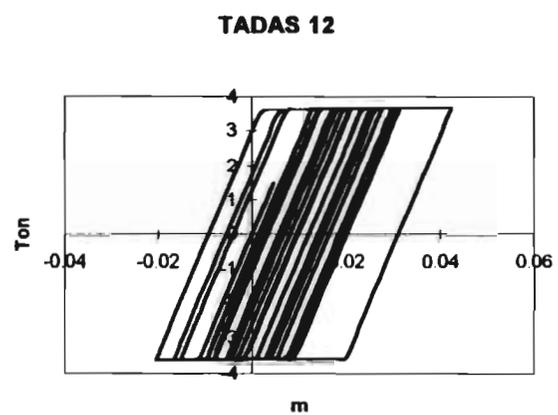
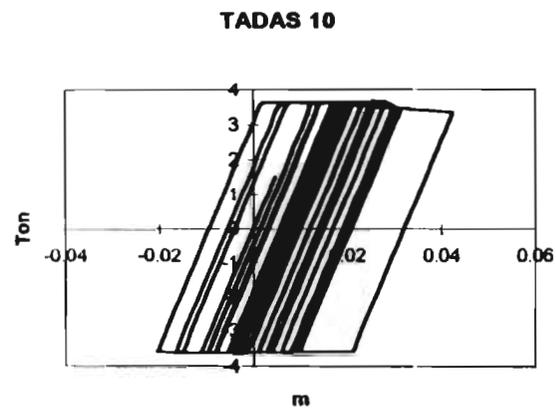
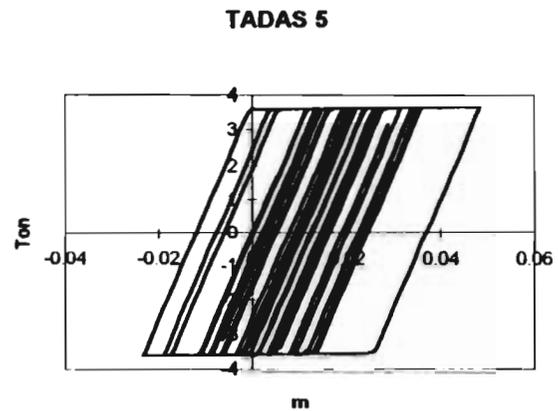
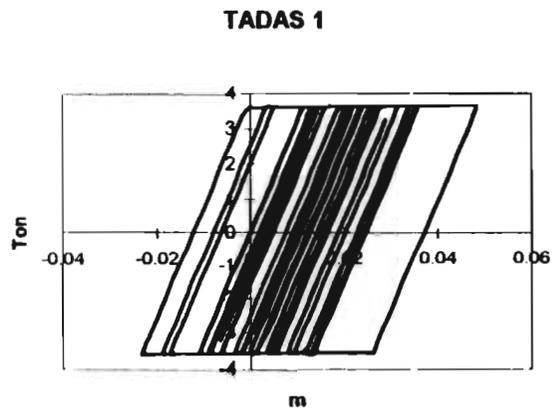


Fig. 3.23 Perfil W 14 x 22

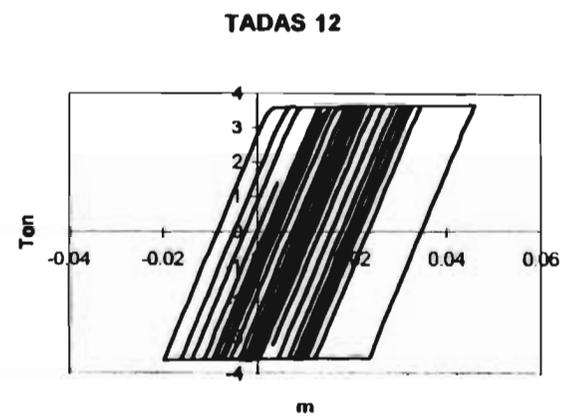
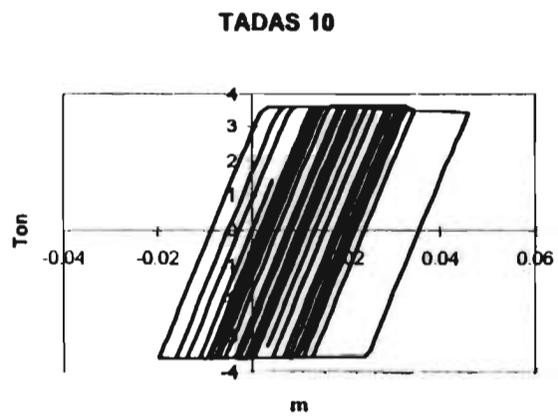
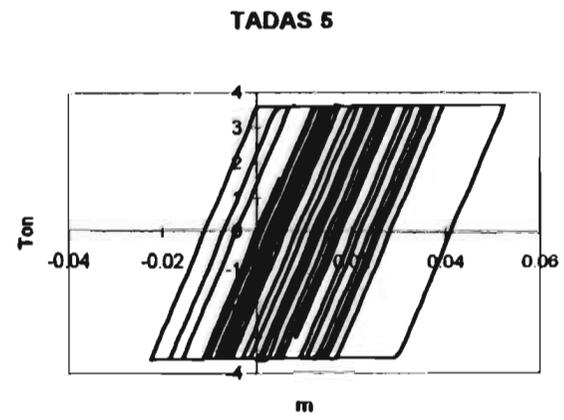
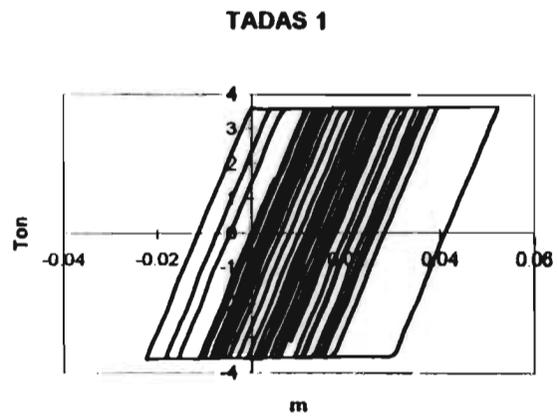


Fig. 3.24 Perfil W 10 x 26

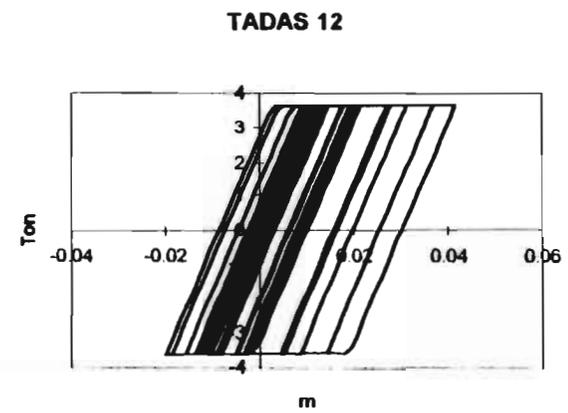
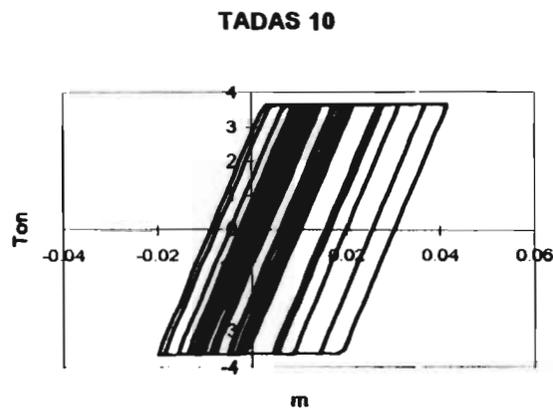
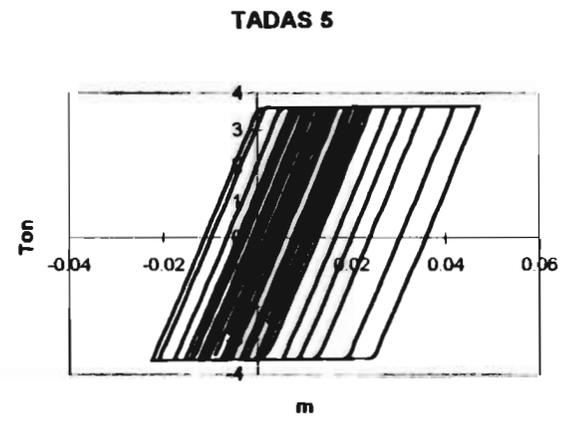
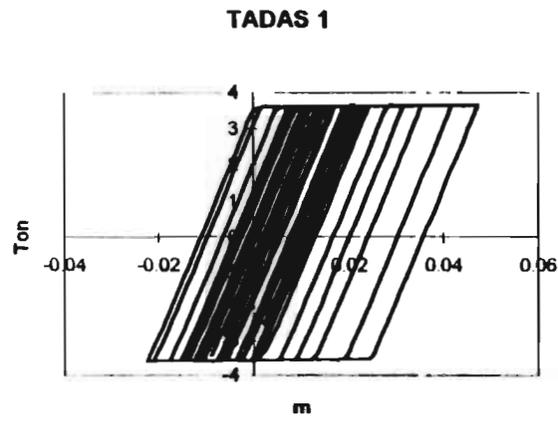


Fig. 3.25 Perfil W 8 x 21

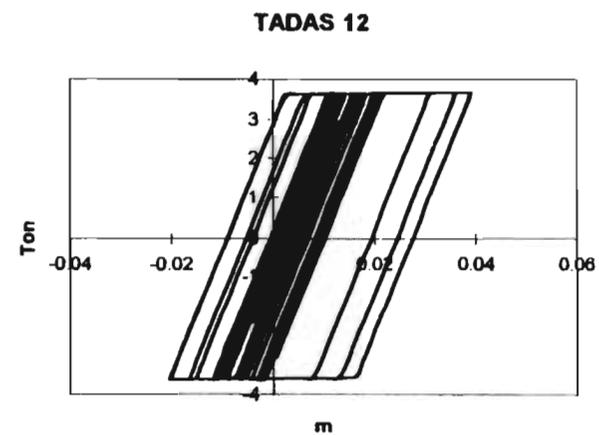
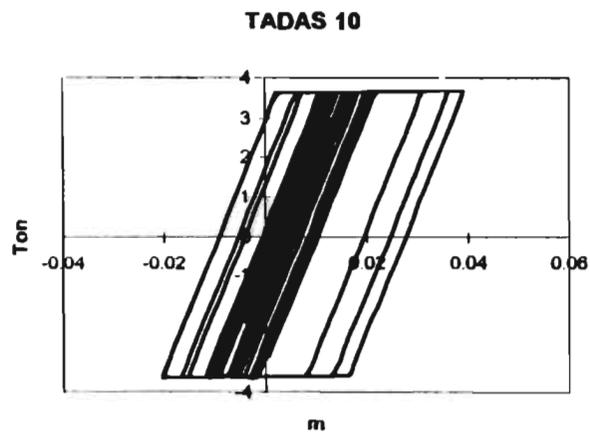
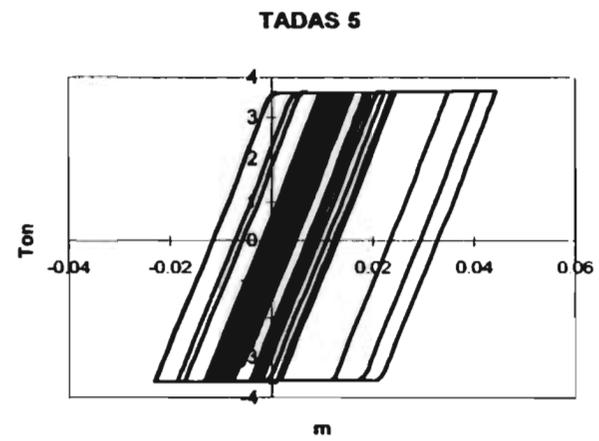
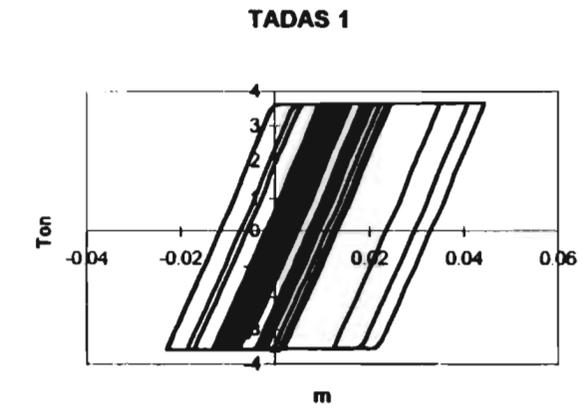


Fig. 3.26 Perfil W 6 x 16

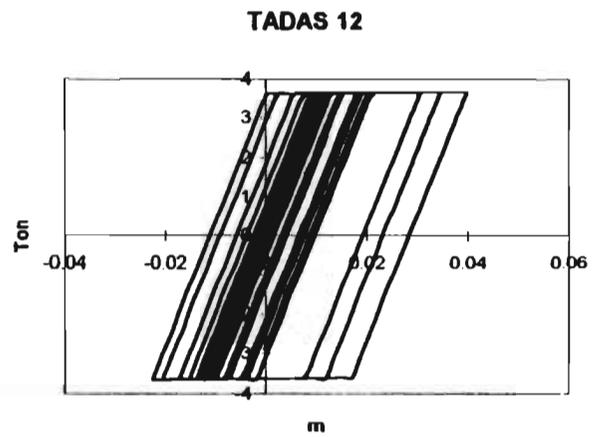
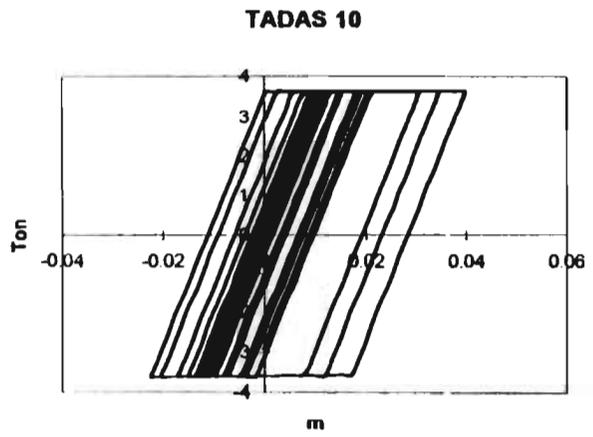
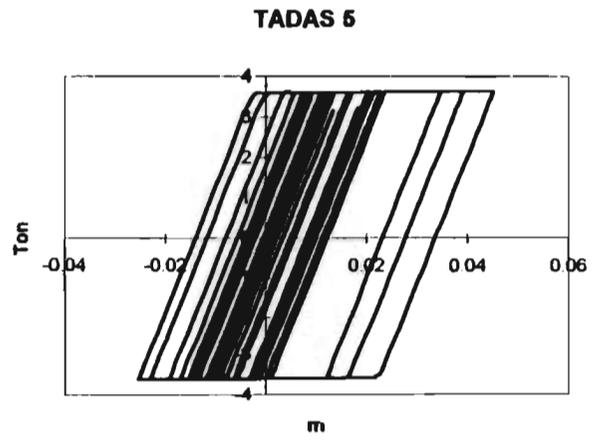
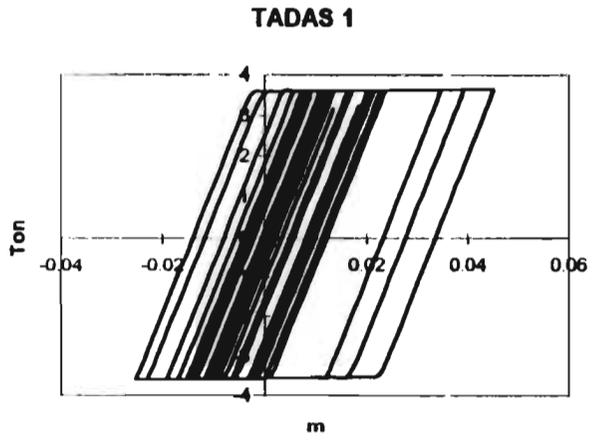


Fig. 3.27 Perfil W 6 x 12

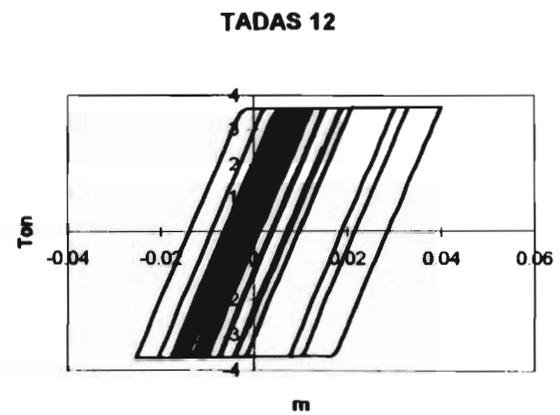
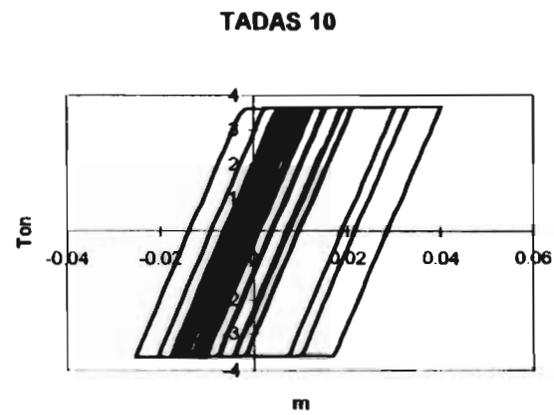
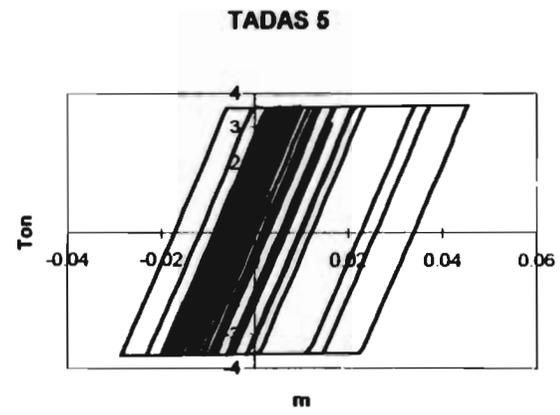
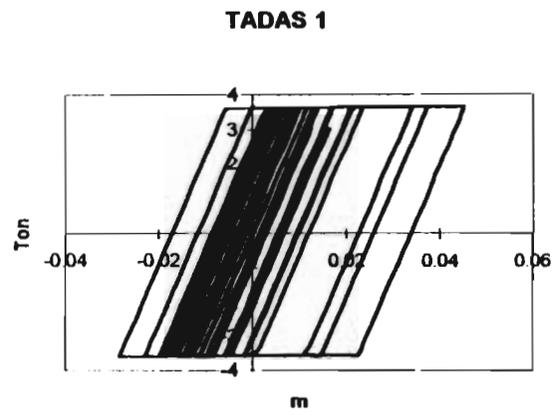


Fig. 3.28 Perfil W 6 x 9

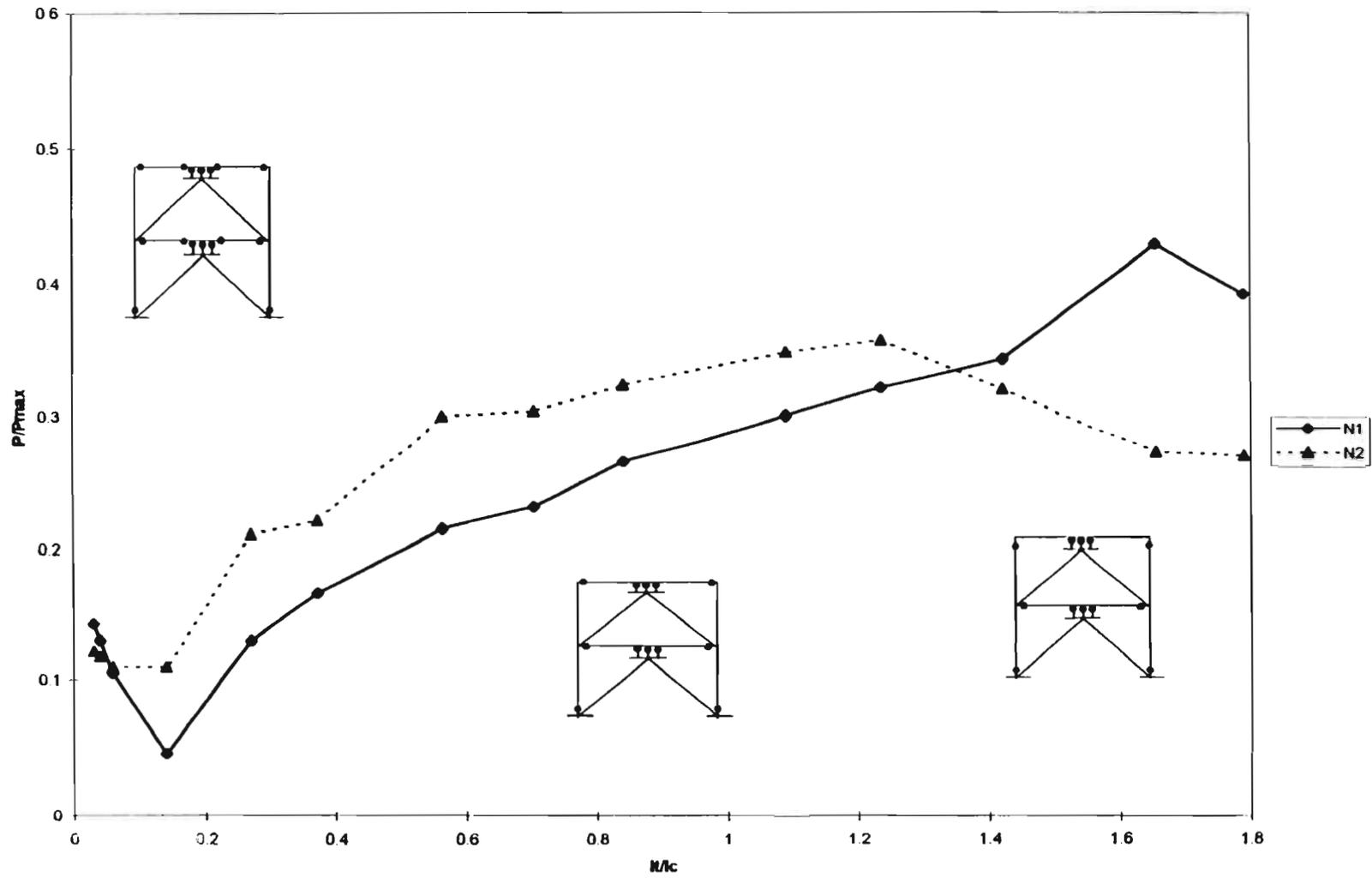


Fig. 3.29 Relación de inercias vs carga axial en marcos con dispositivos TADAS

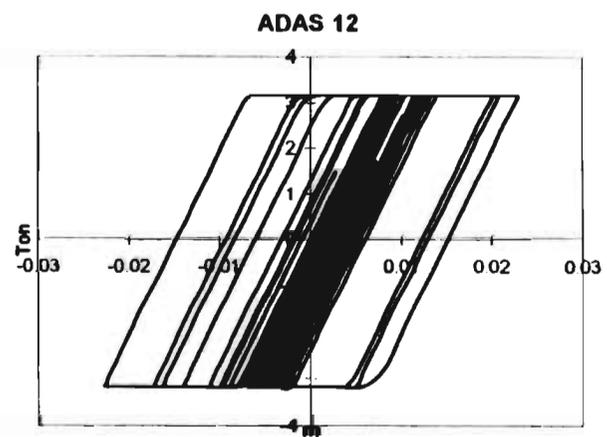
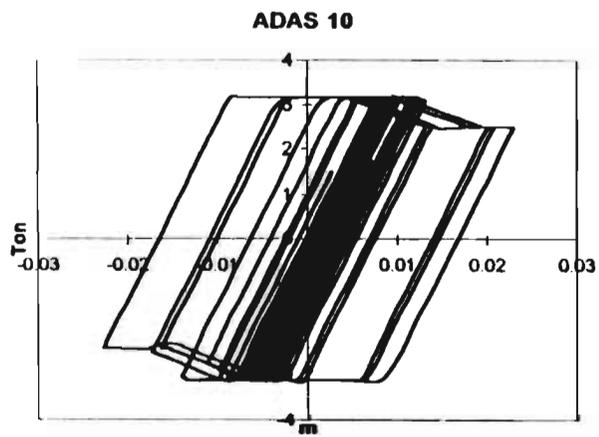
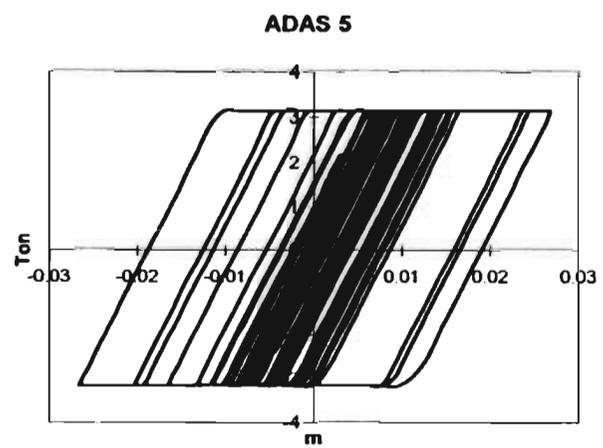
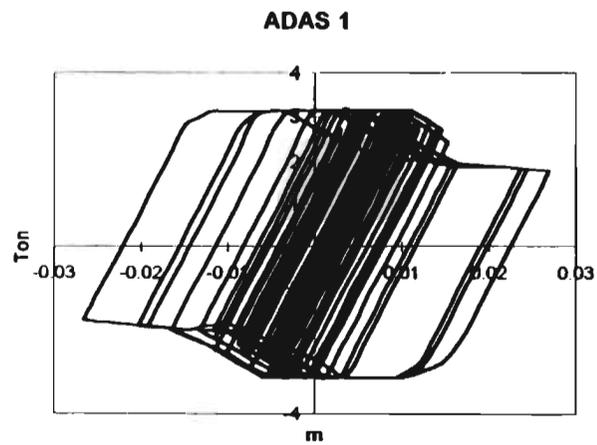


Fig. 3.30 Perfil W 14 x 82

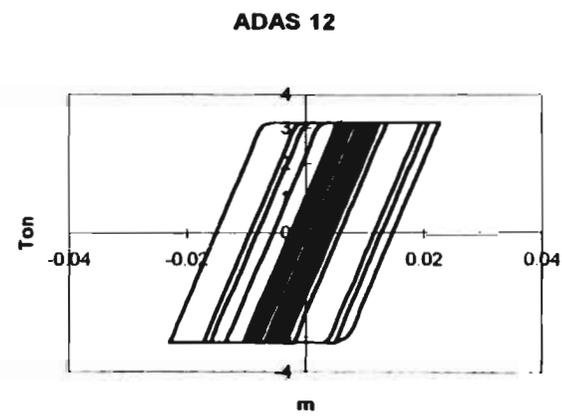
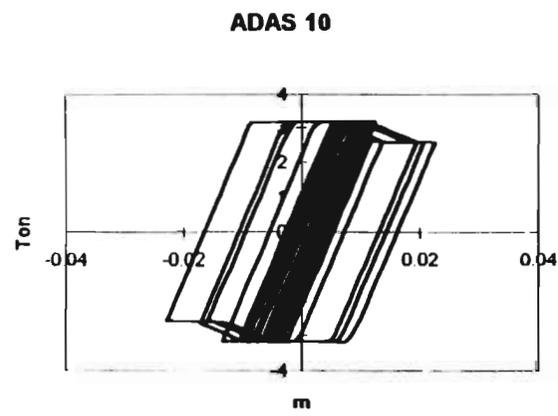
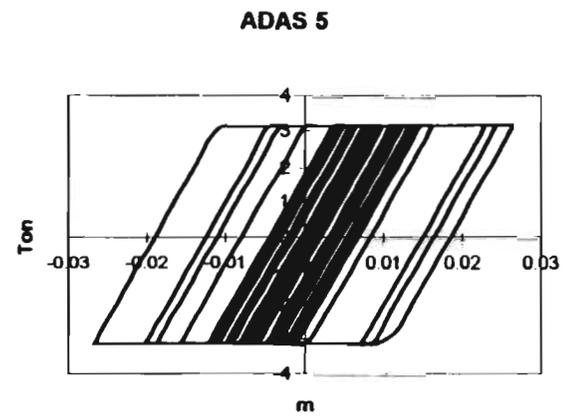
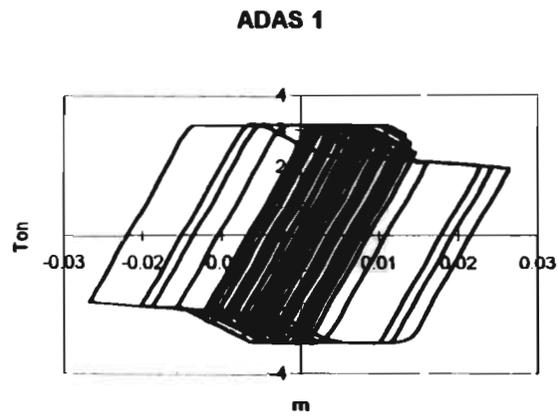


Fig. 3.31 Perfil W 16 x 67

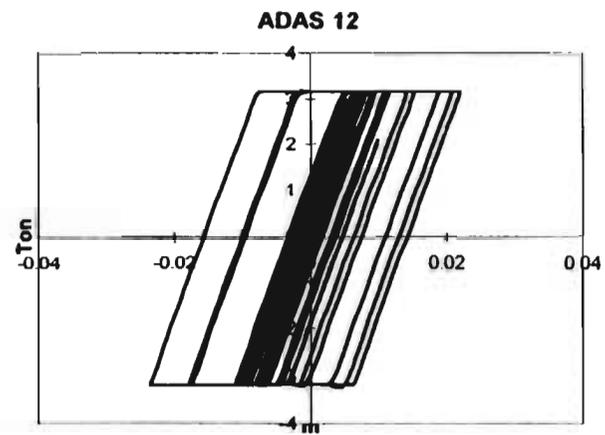
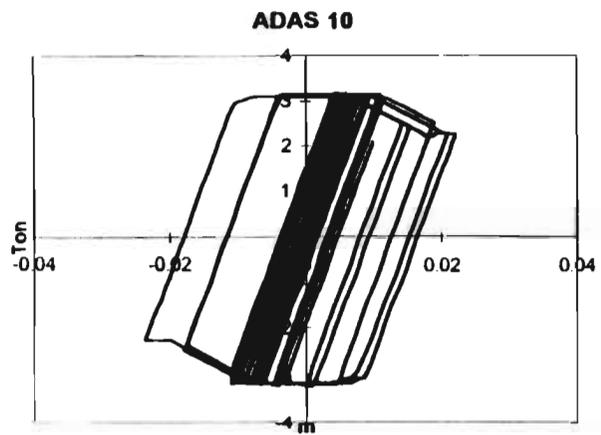
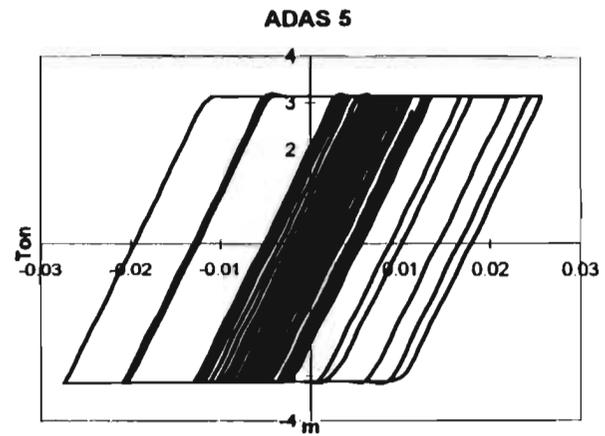
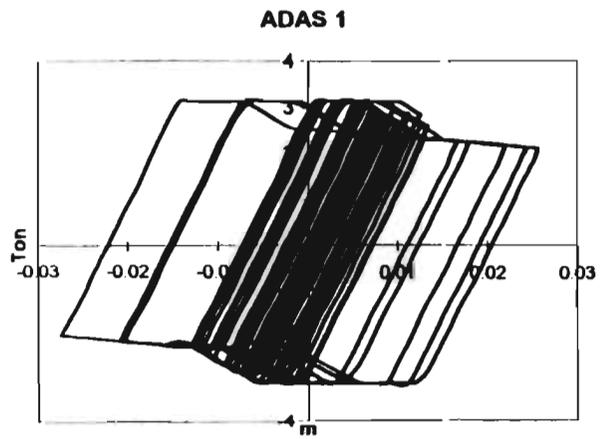


Fig. 3.32 Perfil W 16 x 57

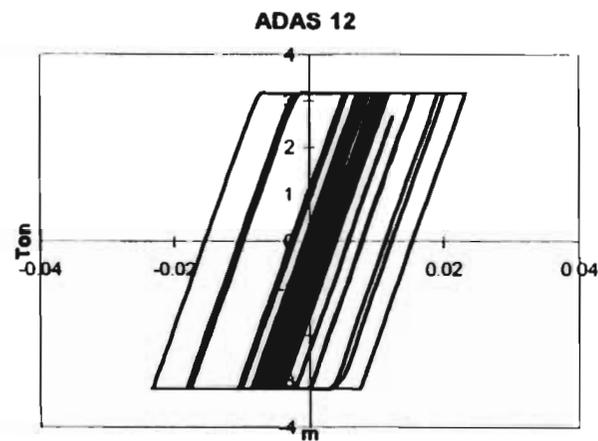
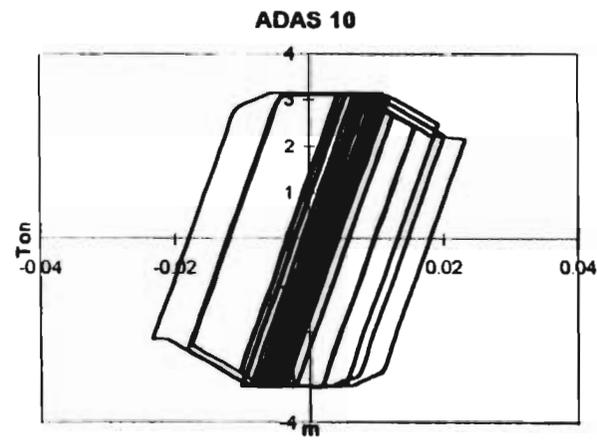
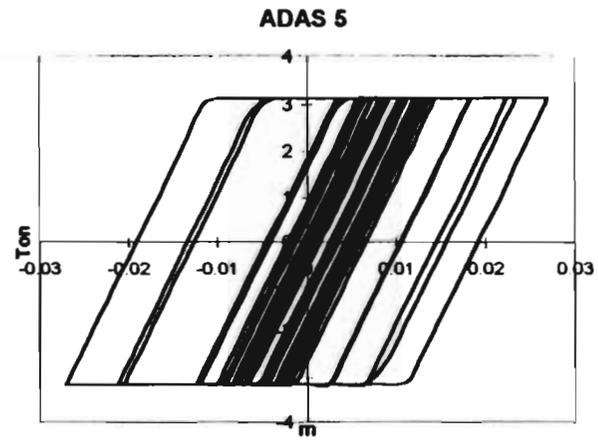
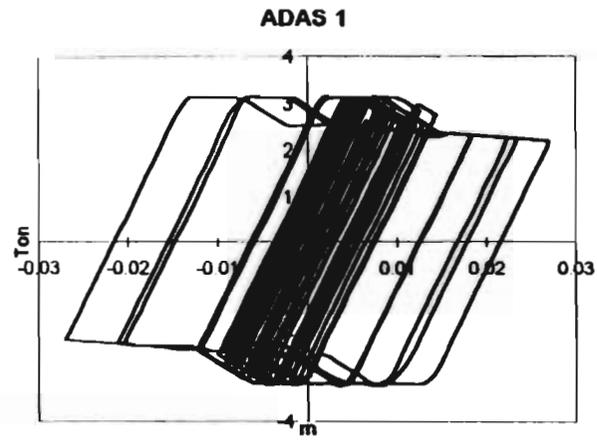


Fig. 3.33 Perfil W 16 x 50

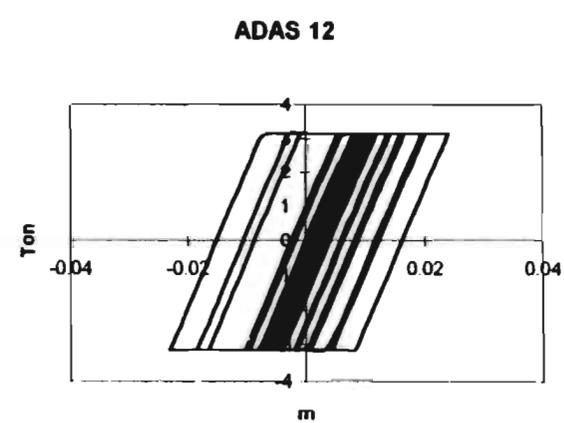
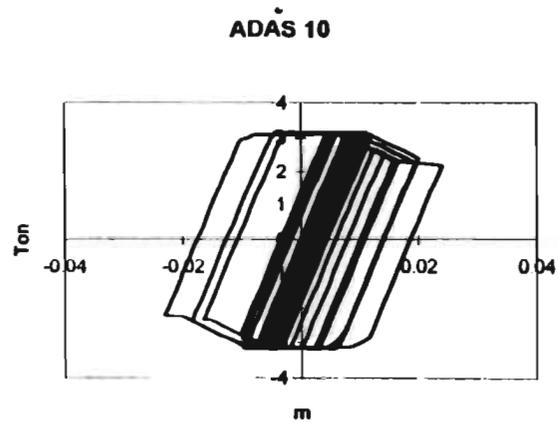
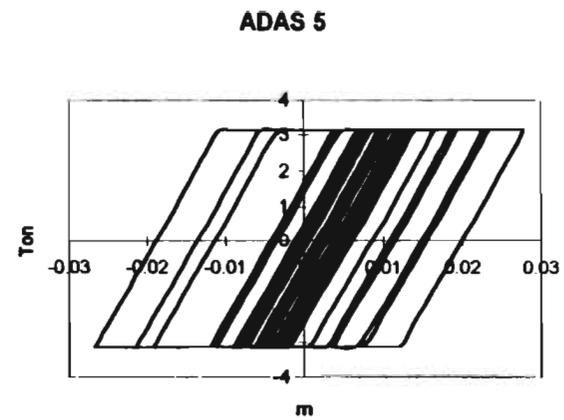
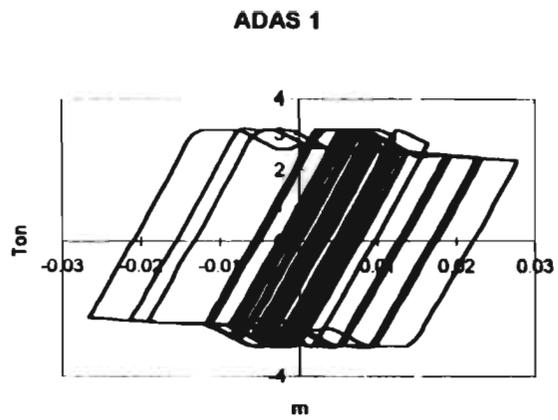


Fig. 3.34 Perfil W 16 x 45

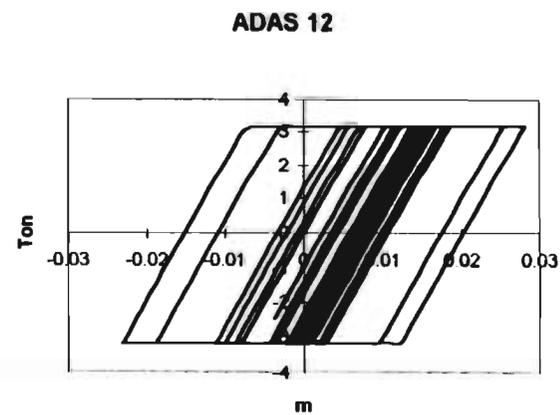
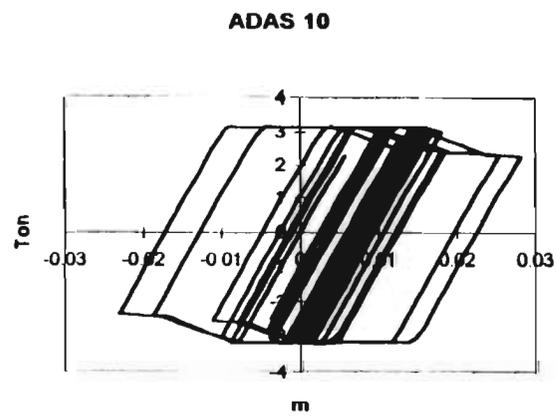
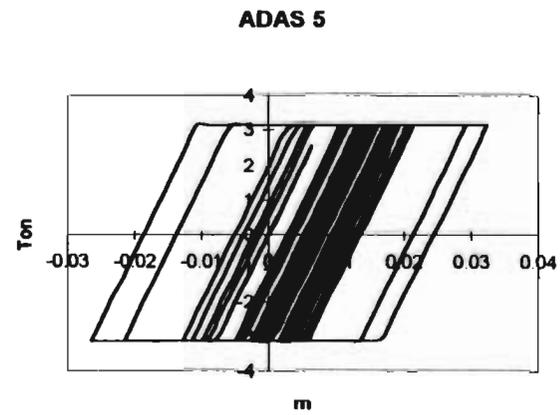
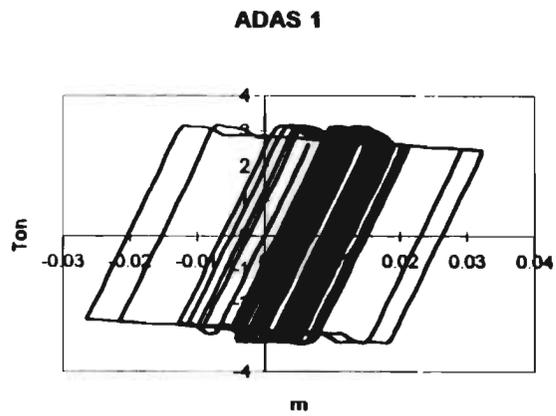


Fig. 3.35 Perfil W 16 x 36

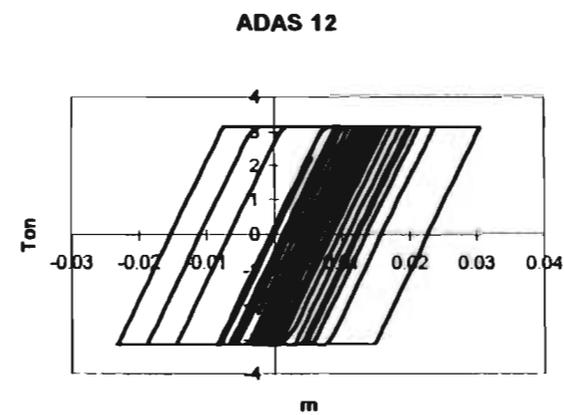
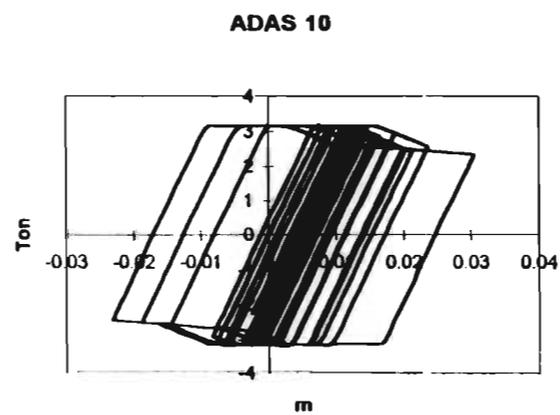
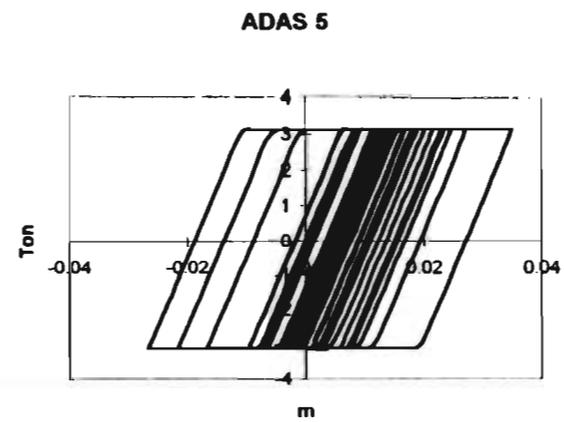
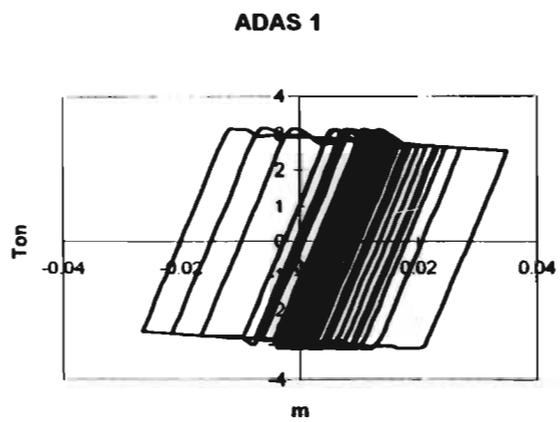


Fig. 3.36 Perfil W 16 x 31

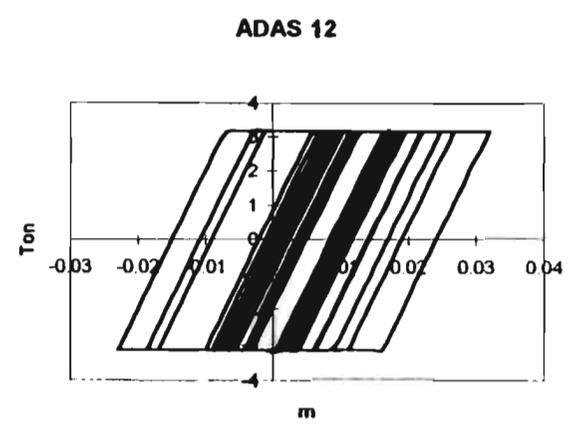
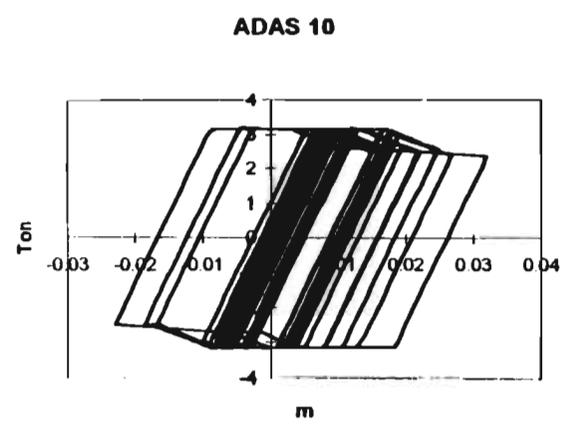
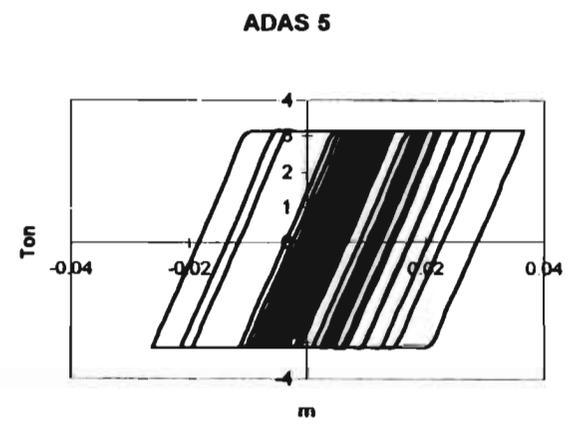
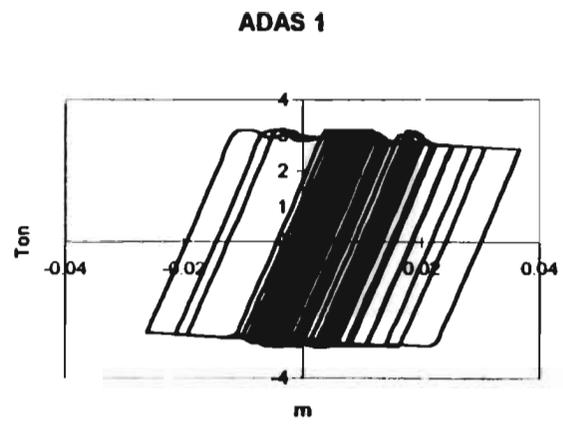


Fig. 3.37 Perfil W 14 x 30

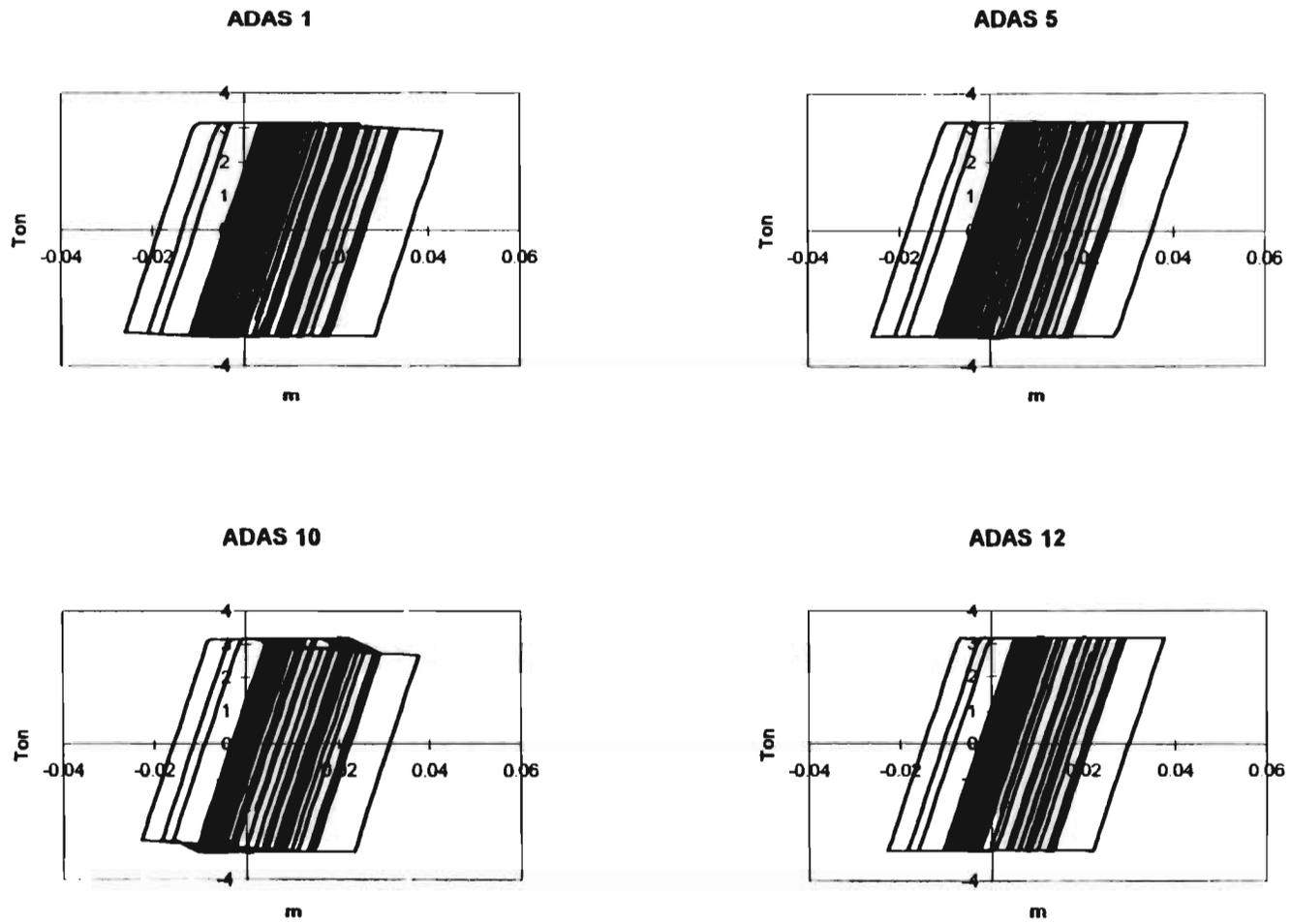


Fig. 3.38 Perfil W 14 x 22

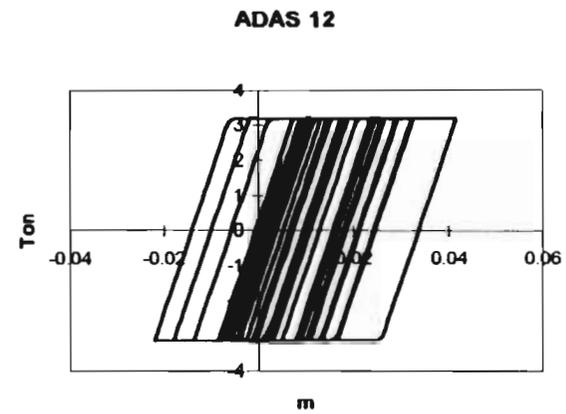
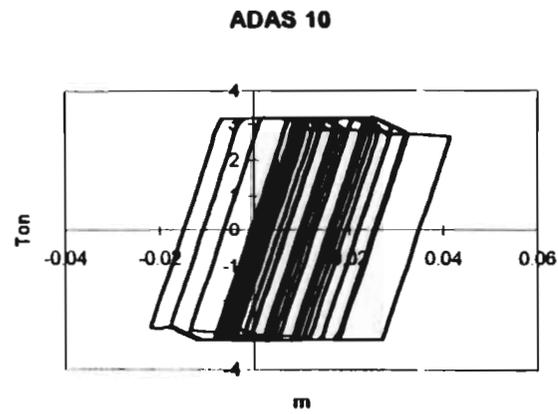
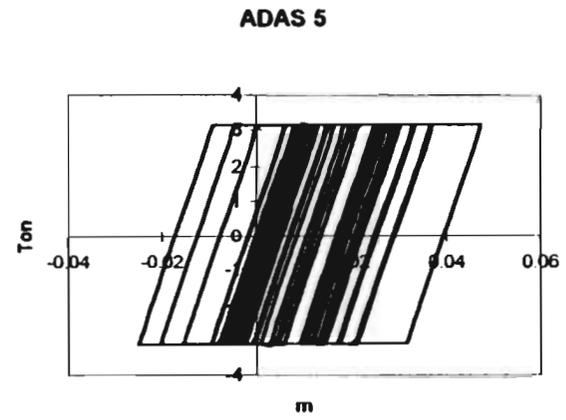
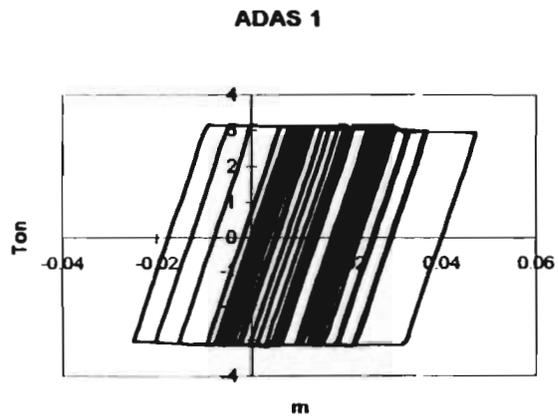


Fig. 3.39 Perfil W 10 x 26

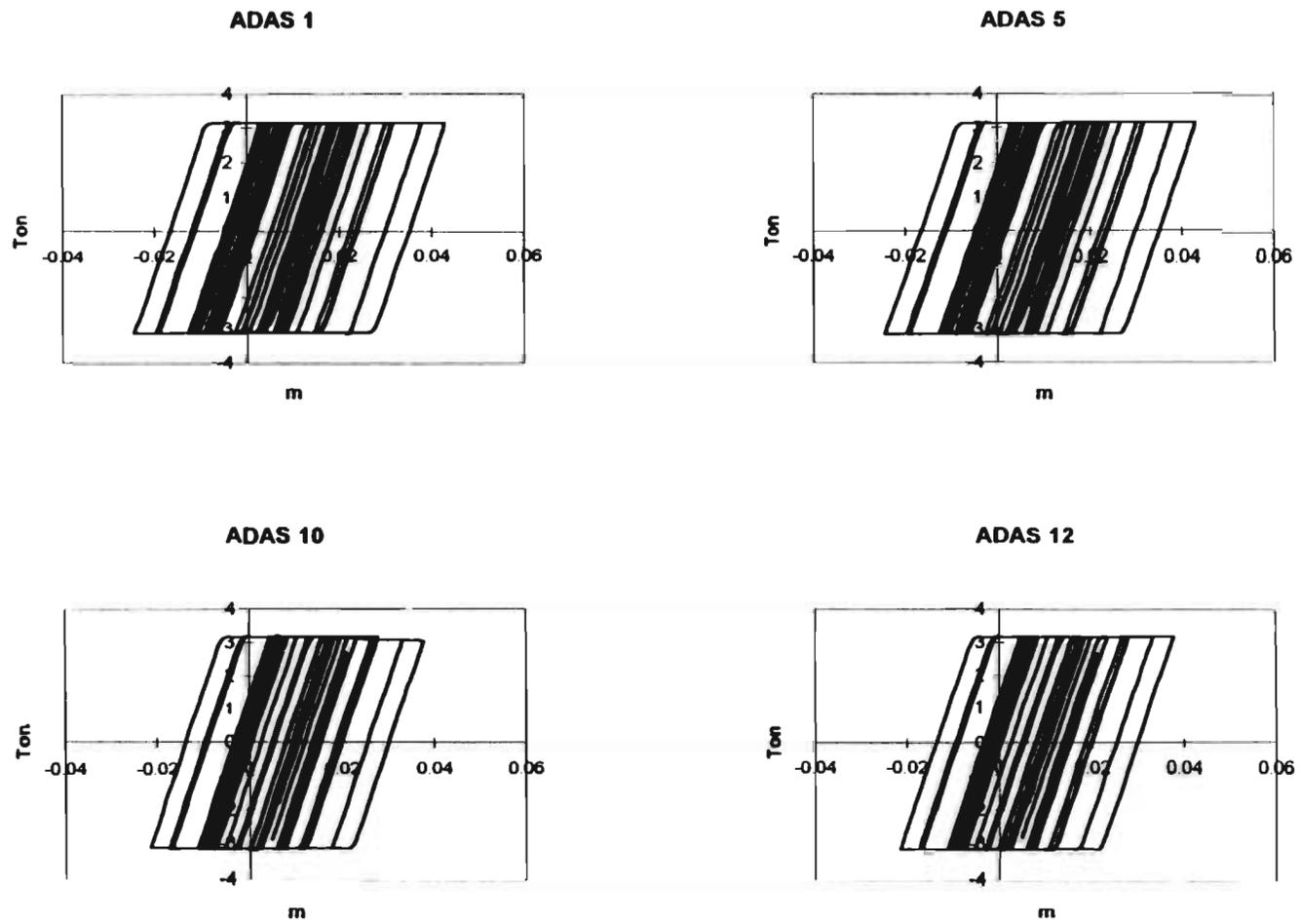


Fig. 3.40 Perfil W 8 x 21

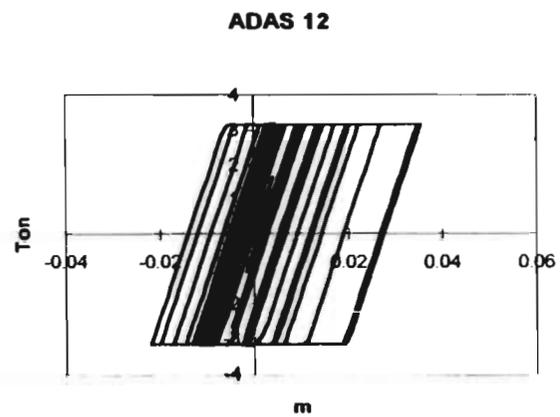
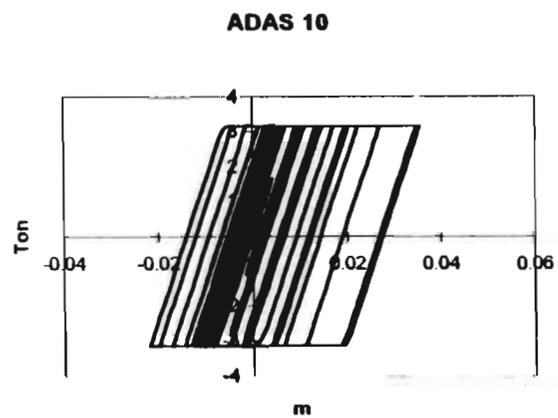
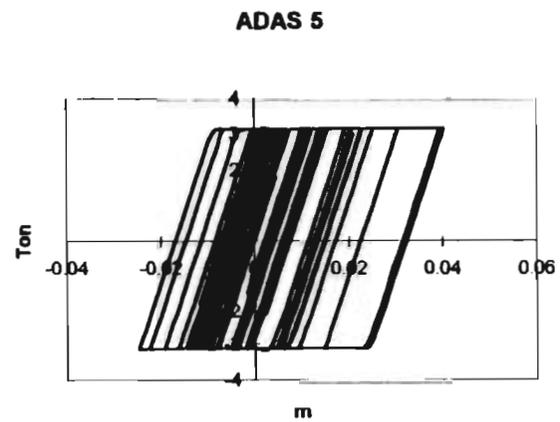
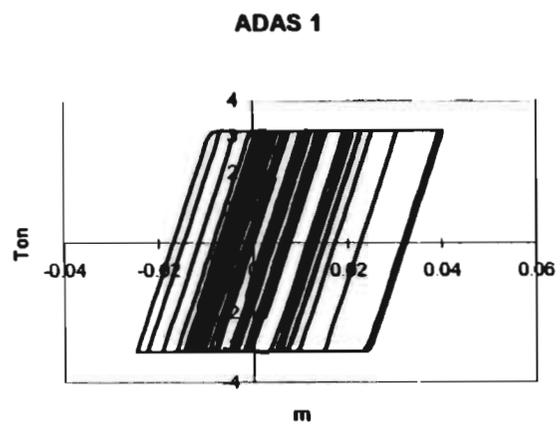
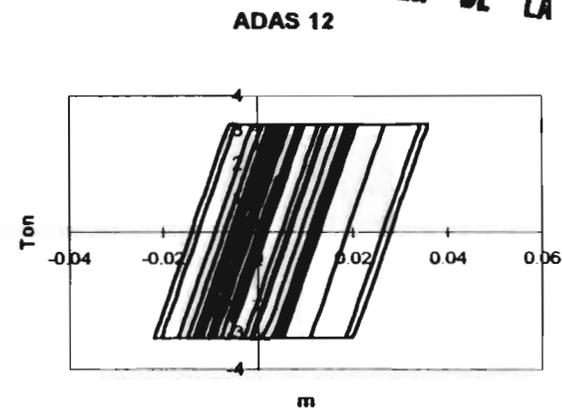
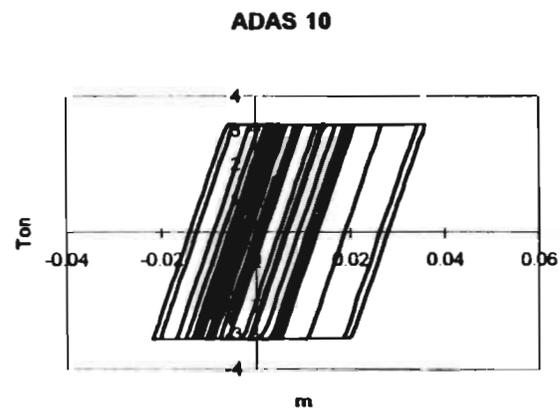
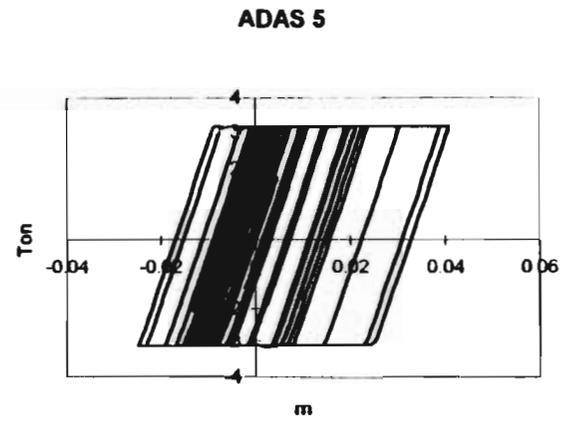
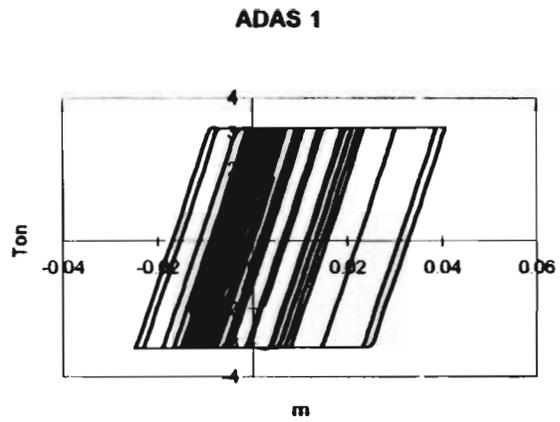


Fig. 3.41 Perfil W 6 x 16



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Fig. 3.42 Perfil W 6 x 12

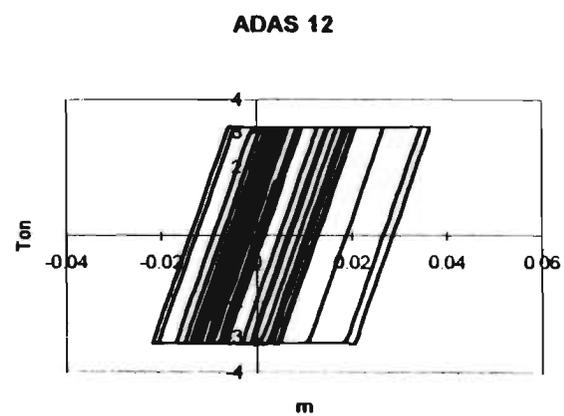
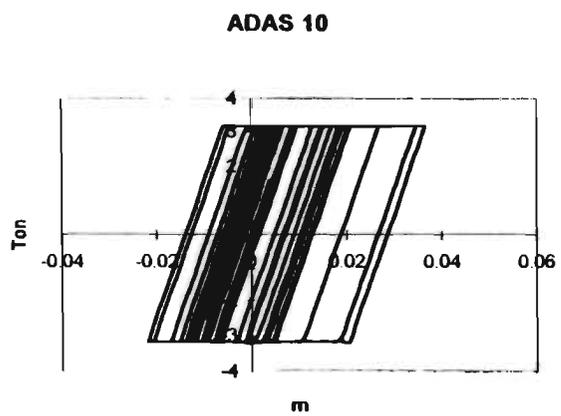
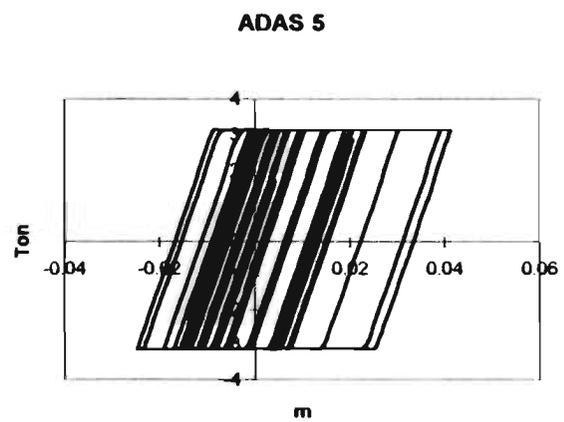
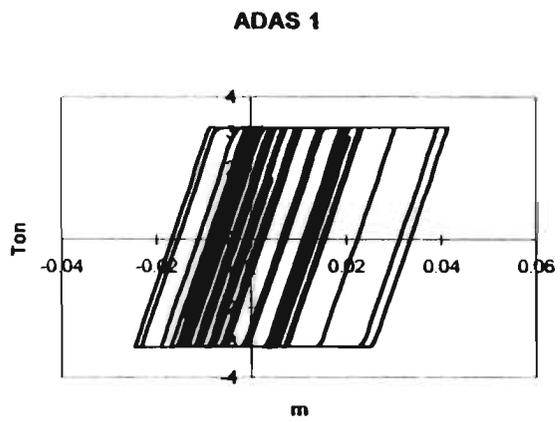


Fig.3.43 Perfil W 6 x 9

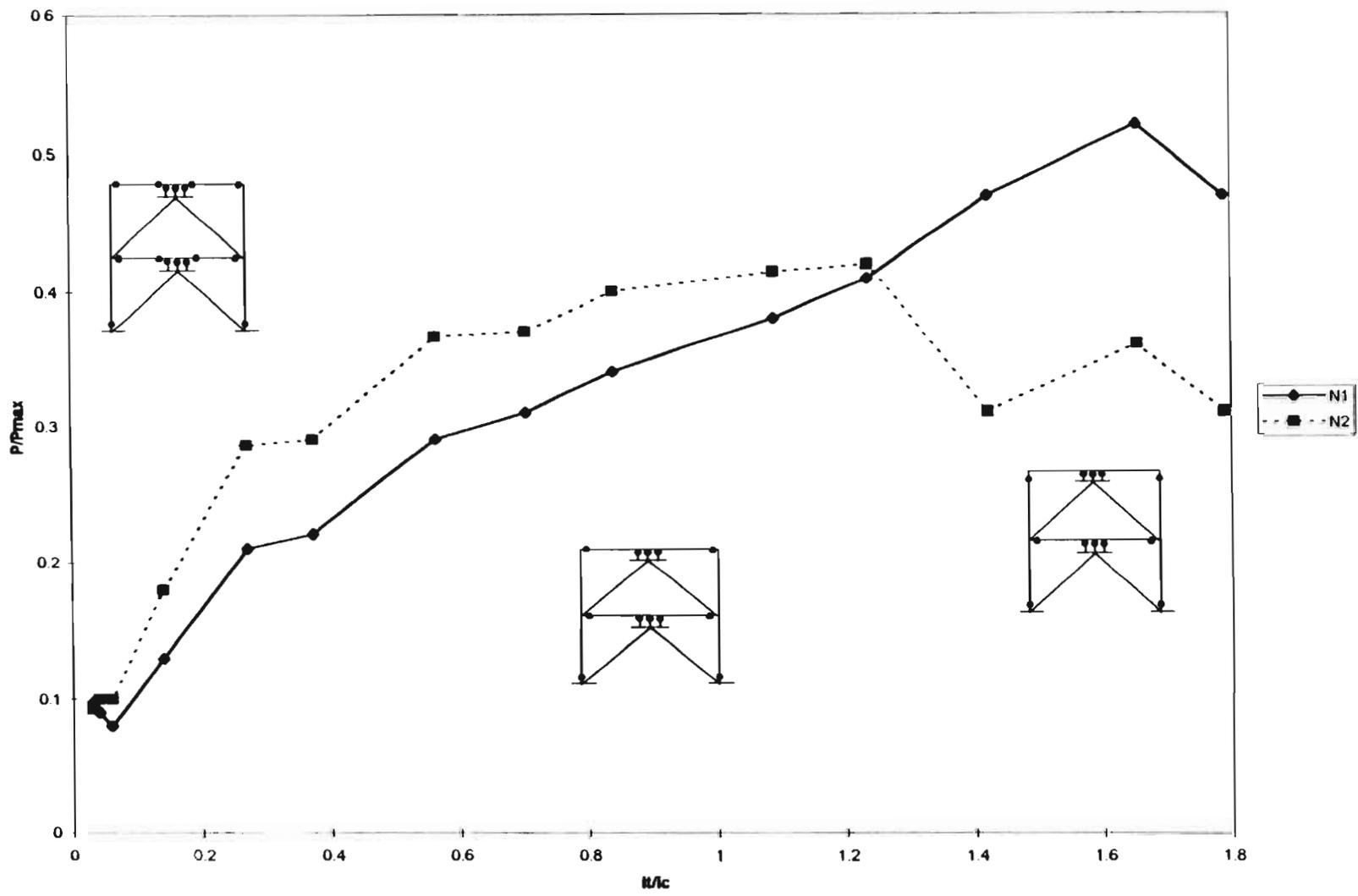


Fig. 3.44 Relación de inercias vs carga axial en marcos con dispositivos ADAS

4. Análisis de esfuerzos con elemento finito de los dispositivos

De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo anterior, la presencia de carga axial en los dispositivos TADAS y ADAS puede cambiar la capacidad a cortante de estos y por tanto su comportamiento ante carga lateral. Se pretende que los dispositivos presenten una distribución de esfuerzos uniforme a lo largo de la placa ante carga lateral, de tal manera que se logre disipación de energía estable sin concentración local de esfuerzos y de esta forma se garantiza un aumento en el amortiguamiento de la estructura.

No se sabe de que manera la presencia de carga axial modifica la distribución uniforme de esfuerzos en la placa y tampoco si la carga axial puede ocasionar la aparición de zonas con concentración de esfuerzos, lo cual cambiaría la forma ideal de trabajar de los dispositivos. Por esta razón se decidió construir modelos con elemento finito de los dispositivos TADAS y ADAS para poder conocer la influencia de la carga axial en la distribución de esfuerzos e identificar posibles zonas de concentración de esfuerzos.

4.1 Modelado de los dispositivos con elemento finito

Los dispositivos TADAS y ADAS que se analizan en este capítulo corresponden a los arreglos formados para el nivel 1 del marco bidimensional mencionado en el capítulo anterior, dichos dispositivos son los de la fig. 3.6. Los dispositivos se modelaron en el programa de análisis con elemento finito SAP90 (Wilson y Habibullah, 1992), se utilizó el elemento SOLID que permite modelar estructuras sólidas en tres dimensiones. El elemento SOLID es similar a un tabique, formado de ocho nodos y que permite definir propiedades anisotrópicas y dependientes de la temperatura. Para este elemento se pueden definir cargas en forma de gradientes de presión, de temperatura y gravitacionales. Por restricción del programa, el elemento tiene únicamente tres grados de libertad correspondientes a los tres desplazamientos ortogonales; no contempla grados de libertad por giro. Se consideraron los valores nominales para las propiedades de los materiales de los dispositivos.

Los dispositivos se sujetaron a tres condiciones de carga. La primera condición correspondió a la carga lateral máxima presentada en los análisis inelásticos, la segunda fue la carga axial máxima obtenida en dichos análisis y la tercera condición fue la combinación de las dos anteriores. En la Tabla 6 se muestran las cargas correspondientes.

| Tabla 6 Condiciones de carga analizadas | | | |
|--|---|---------------------------------------|---------------------|
| Elemento | 1ª condición (carga lateral) | 2ª condición (carga axial) | 3ª condición |
| TADAS | 3.64 Ton | 40.0 Ton | combinación |
| ADAS | 3.25 Ton | 35.0 Ton | combinación |

El primer dispositivo estudiado fue el elemento TADAS. Se realizaron cuatro modelos en los cuales el tamaño de la malla fue aumentando para detallar aquellas zonas que así lo requerían. En la fig. 4.1 se puede observar el modelo que se utilizó para los análisis. La zona inferior de los modelos se consideró empotrada y la superior libre. En esta zona se colocaron las cargas de análisis como cargas nodales verticales y horizontales, para representar la carga axial y lateral, respectivamente. Por otro lado, la malla de elementos finitos se mantuvo en un tamaño adecuado a fin de evitar errores numéricos, pero que a la vez hubiera suficiente precisión.

Se pudo comprobar que la respuesta obtenida del análisis depende del tamaño de la malla, pudiéndose perder precisión en los valores de los esfuerzos del dispositivo TADAS. Las zonas que requieren mayor número de elementos son el tercio cercano al empotramiento y la zona de aplicación de la carga. Al aumentar el tamaño de la malla, también aumenta de forma considerable el tiempo de cómputo y la demanda de almacenamiento, por lo que se debe usar un tamaño adecuado de la malla a fin de hacer el análisis mas eficiente.

Se puede concluir, que aún cuando se decidió trabajar con un modelo grande (1664 nodos y 1116 elementos) este no consume mucho tiempo de cómputo ni almacenamiento (5 min. por cada corrida y 20 Mbytes de memoria) y se obtienen resultados confiables, de acuerdo con lo observado en los otros modelos.

Para el modelado del dispositivo ADAS hubo que enfrentar problemas mas serios que los observados en el dispositivo TADAS, ya que este tiene una geometría mas complicada, a comparación de la forma de triángulo invertido del dispositivo TADAS. Además, su condición de doble empotramiento complicó mucho el modelado pues se encontraron errores de tipo numérico debido a las instrucciones utilizadas en los primeros modelos para definir el empotramiento y la localización de las cargas.

Para el dispositivo ADAS se realizaron 11 modelos diferentes, variando el tamaño de la malla y las condiciones de apoyo de los extremos. Para los primeros modelos se consideró el extremo inferior empotrado y el superior libre solamente para el desplazamiento vertical. Además, se modeló una zona ficticia para la colocación de las cargas de análisis. Para estos primeros modelos se logró representar de manera satisfactoria el comportamiento ante carga lateral, esto es, se pudo observar la deformación lateral en doble curvatura. Sin embargo, al modelar el comportamiento a carga axial se tenían errores grandes pues se tenía como resultado un mismo valor de esfuerzo a compresión para toda la placa y sólo en la zona ficticia se observaban concentraciones de esfuerzos. En estos modelos se observó que al liberar el desplazamiento vertical en el empotramiento superior del dispositivo se obtenía una distribución de esfuerzos realista con concentración de esfuerzos a compresión en la garganta, sin embargo, no se podía representar la deformación lateral en doble curvatura del dispositivo.

Se utilizó otra forma de modelar la carga axial en el dispositivo mediante un gradiente de temperatura en los elementos SOLID de la zona ficticia de tal manera que se tuviera la misma carga axial de análisis. Desafortunadamente se obtuvieron los mismos resultados descritos en el párrafo anterior.

Finalmente se decidió hacer otro modelo el cual tenía la zona ficticia más delgada y sobre ésta se colocaron elementos FRAME de tal manera que sólo se deformaran de manera axial ante el gradiente de temperaturas determinado para representar la carga axial de análisis. La zona ficticia se consideró muy rígida para transmitir las cargas del elemento FRAME al deformarse por el gradiente de temperaturas. Así mismo, se consideró el extremo inferior empotrado y el superior libre solamente para el desplazamiento vertical (ver en el Apéndice A el archivo de entrada de datos al SAP90).

Con este modelo finalmente, se pudo representar el comportamiento ante carga lateral y axial del dispositivo ADAS y se pudo estudiar el comportamiento de este ante los dos efectos. El modelo definitivo se puede observar en la fig. 4.8.

La forma y condiciones de apoyo del dispositivo ADAS dificultan mucho el modelado en el programa SAP90 y se deben utilizar artificios para modelarlo sin modificar la respuesta. Asimismo, las zonas que requieren mayor número de elementos son los empotramientos y la zona de la garganta. Al aumentar el tamaño de la malla, aumenta de forma considerable el tiempo de cómputo y la demanda de almacenamiento, por lo que se debe usar un tamaño adecuado de la malla a fin de hacer el análisis mas eficiente.

El modelo definitivo es bastante grande (1980 nodos y 1362 elementos), consume mucho tiempo de cómputo y mayor espacio de almacenamiento (15 min. por corrida y 35 Mbytes de memoria), sin embargo se obtienen resultados confiables de acuerdo con lo observado en los otros modelos.

4.2 Distribución de esfuerzos en el dispositivo TADAS

En la fig. 4.2 se puede observar la configuración deformada ante carga lateral del dispositivo. El desplazamiento lateral obtenido por el programa SAP90 fue de 0.38 cm ante una carga lateral de 3.64 Ton. Al comparar el desplazamiento anterior con el desplazamiento de fluencia lateral calculado con la ecuación (1.4), que da como resultado 0.35 cm, se puede concluir que son similares (error del 7.41%) y que el modelo representa adecuadamente el comportamiento lateral del dispositivo TADAS. Dicho error se podría deber a que las ecuaciones están determinadas para un triángulo, mientras que el modelo representa la forma real del dispositivo TADAS.

En la fig. 4.4 se muestra la distribución de esfuerzos ante carga lateral para la componente SZZ, que corresponde a esfuerzos axiales. Se decidió mostrar esta componente pues esta es la que forma los momentos internos en cada sección y de esta manera se puede saber si la placa ya ha fluido.

La distribución de esfuerzos ante carga lateral varía de tensión a compresión de acuerdo con la dirección del desplazamiento. En la zona inferior (empotramiento) donde se sujeta a la placa los esfuerzo son relativamente pequeños (800 kg/cm²). Para determinar si las secciones de la placa fluyen se calculó el momento interno de las secciones mediante los esfuerzos obtenidos con el análisis y se comparó con el momento plástico correspondiente a la sección calculado de la siguiente forma :

$$p = ZF_y$$

$$p = \left[\left(\frac{b'-b}{h} \right) x + b \right] \frac{t^2}{4} F_y \quad (4.1)$$

Donde b', b, h y t son la dimensiones mostradas en la Tabla 4 y x es la distancia desde el empotramiento hasta la sección en donde se calcula el momento plástico. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para algunas de las secciones estudiadas.

| Tabla 7 Momento interno (Mi) y momento plástico (Mp) en secciones TADAS | | | | |
|--|---------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Sección No. | x (cm) | Mi (T-m) | Mp (T-m) | Mi/Mp |
| 1 | 0 | 1.204 | 1.395 | 0.863 |
| 2 | 5 | 1.031 | 1.234 | 0.835 |
| 3 | 20 | 0.536 | 0.753 | 0.712 |
| 4 | 30 | 0.199 | 0.332 | 0.599 |

Se puede observar que existe una cierta similitud entre los momentos interno y plástico, lo que sugiere que en esas secciones casi se presenta la fluencia. También se presentan zonas donde el momento interno es bastante menor al plástico, indicando que en esas secciones probablemente no se presenta la fluencia.

Por otro lado, al revisar la distribución de esfuerzos en el modelo, aparece una zona de concentración de esfuerzos cerca del empotramiento que no corresponde con la distribución esperada. Dicha zona de esfuerzos disminuye ligeramente al aumentar el tamaño de la malla pero, no desaparece.

En estudios realizados a elementos ADAS (Whittaker et al, 1989) se mencionan resultados similares en ciertas zonas de la placa, en la cual se encontraron zonas con esfuerzos menores al de fluencia (50% de la placa) y zonas de concentración de esfuerzos (fig. 2.4).

La tendencia anterior se presenta aparentemente en la placa TADAS y la concentración de esfuerzos en el empotramiento, aunque su valor no es tan grande como el resto de los esfuerzos en la placa. Para entender este fenómeno se decidió construir la fig. 4.7 que muestra los esfuerzos en diferentes secciones de la placa para diferentes porcentajes de carga lateral aplicada (50%, 80% y 100%).

En la figura se puede observar que existe una zona en la cual el esfuerzo es siempre mayor al mostrado en el resto del dispositivo, además, esta zona se mantiene para los diferentes niveles de carga axial. Por otro lado, se observa que para el 80% de carga lateral, un gran porcentaje de la placa fluye pues existen zonas con esfuerzos mayores a F_y . Para el 100% de carga lateral el aumento de la zona de fluencia es pequeño y bajo este nivel se puede observar que aproximadamente el 77% de la placa fluye y disipa energía. Esto va en contra de la hipótesis de la representación analítica del elemento perfectamente triangular que supone que toda la placa fluye.

Una vez analizada la condición de carga lateral se prosiguió a revisar el comportamiento ante carga axial del dispositivo TADAS. En la fig. 4.3 se observa la configuración deformada ante carga axial del dispositivo. El desplazamiento vertical obtenido por el programa SAP90 fue de 0.040 cm ante una carga axial de 40 Ton. Para conocer el desplazamiento de fluencia ante carga vertical del dispositivo, primeramente se obtuvo su rigidez axial con la expresión (3.5) y posteriormente se dividió su capacidad a carga axial entre la rigidez. El desplazamiento de fluencia fue de 0.042 cm. Al comparar el desplazamiento calculado con el obtenido por el SAP90, se puede concluir que son similares (error del 6.32%) y que el modelo representa adecuadamente el comportamiento axial del dispositivo TADAS.

La fig. 4.4 muestra la distribución de esfuerzos ante carga axial. Se puede observar que considerando sólo carga axial el dispositivo tiene una gran concentración de esfuerzos a compresión en la zona superior de la placa (mayores a F_y). De esta forma se obtiene que aproximadamente el 19% del dispositivo fluye a compresión.

El aspecto más importante de la carga axial es su influencia en el comportamiento del dispositivo TADAS cuando ésta se presenta junto con la carga lateral. Se observó (fig. 4.6) que la distribución de esfuerzos cambia drásticamente en comparación con la mostrada en el caso de carga lateral únicamente (fig. 4.4).

Se observa que una gran parte de la placa se encuentra a compresión, en lugar de presentarse la mitad a compresión y la otra mitad en tensión (como el caso de carga lateral). También son notorias las zonas de alta concentración de esfuerzos a compresión en la zona de aplicación de carga. Este efecto pone en riesgo la estabilidad de la placa debido a la concentración de esfuerzos a compresión en gran parte de ella. Es importante evitar cargas axiales que puedan poner en peligro su capacidad de disipación de energía.

4.3 Distribución de esfuerzos en el dispositivo ADAS

En la fig. 4.9 se puede observar la configuración deformada ante carga lateral del dispositivo. El desplazamiento lateral obtenido por el programa SAP90 fue de 0.47 cm ante una carga lateral de 3.25 Ton. El desplazamiento de fluencia lateral calculado al dividir la fuerza de fluencia lateral obtenida con la expresión (2.10), entre la rigidez lateral obtenida con la ecuación (2.4), el desplazamiento lateral es igual a 0.43 cm. Se puede concluir que ambos desplazamientos no son muy similares (error del 9.16%), pero el modelo representa adecuadamente el comportamiento lateral del dispositivo ADAS. Por otro lado se puede observar en la fig. 4.9 que se logra obtener la deformación lateral en doble curvatura de acuerdo con las especificaciones que rigen el comportamiento del dispositivo.

En la fig. 4.11 se muestra la distribución de esfuerzos ante carga lateral para la componente SZZ, que corresponde a esfuerzos axiales. Esta componente es la que forma los momentos internos en cada sección y de esta manera se puede saber si la placa esta fluyendo.

La distribución de esfuerzos ante carga lateral varía de esfuerzos a tensión a compresión de acuerdo con la curvatura de la placa debida al desplazamiento. Para determinar si las secciones de la placa fluyen, se calculó el momento interno de las secciones mediante los esfuerzos obtenidos con el análisis y se comparó con el momento plástico correspondiente a la sección calculado de la siguiente forma :

$$\begin{aligned} p &= ZF_y \\ p &= \frac{F_y b t^2}{4} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Donde t es el espesor del dispositivo y b es el ancho de la placa en diferentes secciones de esta. Solo se revisaron secciones de media placa ADAS debido a la simetría de los esfuerzos. En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos para algunas de las secciones estudiadas.

| Sección No. | Distancia al empotramiento (cm) | Mi (T-m) | Mp (T-m) | Mi/Mp |
|--------------------|--|-----------------|-----------------|--------------|
| 1 | 0 | 0.559 | 0.656 | 0.852 |
| 2 | 1.75 | 0.455 | 0.503 | 0.905 |
| 3 | 10.5 | 0.192 | 0.226 | 0.850 |
| 4 | 17.5 | 0.013 | 0.128 | 0.102 |

Se puede observar que existe similitud entre los momentos interno y plástico (diferencias menores al 10%), lo que sugiere que en esas secciones se presenta la fluencia. También se muestran zonas donde el momento interno es 15% menor al plástico, indicando que en esas secciones no se presenta la fluencia.

Por otro lado, al revisar la distribución de esfuerzos en el modelo, aparece una zona de concentración de esfuerzos cerca de los empotramientos que no corresponde con la distribución esperada. La localización y forma de esa zona de concentración de esfuerzos es similar a la observada en el dispositivo TADAS.

Como ya se mencionó anteriormente, en estudios realizados al dispositivo ADAS (Whittaker et al, 1989) se mencionan resultados similares en ciertas zonas de la placa (fig. 2.4).

Para entender este efecto se construyó la fig. 4.14 que muestra los esfuerzos en diferentes secciones de la placa para diferentes porcentajes de carga lateral (50%, 80% y 100%).

En la figura se puede observar que existe una zona en la cual el esfuerzo es siempre mayor al mostrado en el resto del dispositivo. Esta zona se mantiene para los diferentes niveles de carga axial. Por otro lado se observa que para el 80% de carga lateral, un gran porcentaje de la placa ya fluye pues existen zonas con esfuerzos mayores que F_y . Para el 100% de carga lateral el aumento de la zona de fluencia es pequeño y bajo este nivel se puede observar que aproximadamente el 85% de la placa fluye. Esto va en contra de la hipótesis de la representación analítica del elemento perfectamente triangular que supone que toda la placa fluye. Se observa que para el 50% de la carga lateral, la zona de concentración mencionada alcanza un valor similar al esfuerzo de fluencia. Lo anterior permite concluir que esa zona fluirá primero antes que el resto de la placa y se podría presentar el endurecimiento por deformación cuando comience a fluir el resto de la placa.

Una vez analizada la condición de carga lateral, se revisó el comportamiento ante carga axial del dispositivo ADAS. En la fig. 4.10 se observa la configuración deformada ante carga axial del dispositivo. El desplazamiento vertical obtenido por el programa SAP90 fue de 0.050 cm ante una carga axial de 35 Ton. Para conocer el desplazamiento de fluencia ante carga vertical del dispositivo primeramente se obtuvo su rigidez axial con la expresión (3.6) y posteriormente se dividió su capacidad a carga axial entre la rigidez, de esta manera el desplazamiento de fluencia calculado fue de 0.055 cm. Al comparar el desplazamiento calculado con el obtenido con el SAP90 se puede concluir que no son muy similares (error del 8.11%), pero el modelo representa adecuadamente el comportamiento axial del dispositivo ADAS.

La fig. 4.12 muestra la distribución de esfuerzos ante carga axial. Se puede observar que considerando solo carga axial el dispositivo tiene una gran concentración de esfuerzos a compresión en la zona de la garganta de la placa (mayores a F_y). De esta forma se tendría que aproximadamente el 45% del dispositivo fluye a compresión.

El aspecto más importante de la carga axial es su influencia en el comportamiento del dispositivo ADAS cuando esta se presenta junto con la carga lateral. Se observó (fig. 4.13) que la distribución de esfuerzos ante la combinación de carga axial y lateral cambia drásticamente en comparación con la mostrada en el caso de carga lateral únicamente (fig. 4.11).

En la fig. 4.13 se observa que una gran parte de la garganta se encuentra a compresión (en lugar de la mitad a compresión y la otra en tensión como el caso de carga lateral). También se observa que los valores de esfuerzos son mucho mas grandes que para el caso de carga lateral e inclusive mayores al esfuerzo de fluencia del material. A partir de esto se puede pensar que toda la placa está fluyendo ante la combinación de carga axial y lateral. Esta distribución de esfuerzos pone en riesgo la estabilidad de la placa debido a la concentración de esfuerzos a compresión en la zona de la garganta y como ya se mencionó, la rigidez a pandeo de la placa es mucho menor en el régimen de postfluencia, por lo que se puede suponer que la placa falle por pandeo lateral ante la combinación de carga axial y lateral. Se deduce que es importante evitar cargas axiales altas que puedan poner en peligro la capacidad de disipación de energía del dispositivo ADAS.

Como se ha mostrado, las cargas axiales elevadas influyen de manera determinante en el comportamiento de los dispositivos TADAS y ADAS.

4.4 Comparación de resultados

Se ha mostrado el análisis con elementos finitos de los dispositivos TADAS y ADAS, sujetos a la acción de cargas laterales, axiales y la combinación de estas.

Para el caso del dispositivo TADAS, se observó que su modelación con elementos finitos es relativamente sencilla gracias a su forma trapezoidal. Se lograron ajustar dichos modelos a fin de obtener desplazamientos similares a los calculados con las expresiones correspondientes. Lo anterior permite asegurar que los modelos representan de manera confiable el comportamiento del dispositivo.

Para el caso del dispositivo ADAS se observó que su modelación con elementos finitos es mucho más difícil de lograr ya que su geometría es más complicada, además su condición de doble empotramiento en los extremos obligó a utilizar artificios dentro del modelado para lograr la deformación de doble curvatura y representar al mismo tiempo el comportamiento ante carga axial. Se logró ajustar el modelo y se obtuvieron desplazamientos similares a los calculados analíticamente, lo anterior permite asegurar que el modelo representa de manera confiable el comportamiento del dispositivo.

Para la condición de carga lateral, se observó en ambos dispositivos que la placa no fluye totalmente y sólo algunas zonas de estas son las que disipan energía por deformación en rango inelástico. Lo anterior contradice las hipótesis de las representaciones analíticas que proponen un triángulo perfecto. Estas suponen que las placas que forman los dispositivos fluyen completamente en toda su altura ante carga lateral. Así mismo, para ambos dispositivos se identificaron zonas en las placas que tienen esfuerzos muchos mayores que el resto. Esto concuerda con investigaciones realizadas al dispositivo ADAS (Whittaker et al, 1989) en donde se identificó una "zona crítica" la cual comienza a fluir y posteriormente se redistribuye al resto de la placa.

Para la condición de carga axial se observó, para el dispositivo TADAS, que la zona de la articulación fluye por esfuerzos a compresión. Por otro lado, para el dispositivo ADAS se observó que los esfuerzos a compresión son muy grandes en la zona de la garganta e inclusive la mitad de la placa podría fluir ante la acción de cargas axiales elevadas (puras).

El aspecto más interesante del análisis con elemento finito de los dispositivos fue estudiar el efecto de la combinación de la carga axial y lateral en el comportamiento. Para ambos dispositivos se observó que la distribución de esfuerzos cambia notablemente llegándose a formar zonas de concentración de esfuerzos a compresión que sugieren la fluencia del material, con lo que se pone en riesgo la estabilidad del dispositivo. Para el caso del dispositivo TADAS, la zona de concentración de esfuerzos correspondió a la articulación (zona mas delgada del trapecio). En esa zona se podría producir una falla por aplastamiento. Por otro lado, en el dispositivo ADAS, los esfuerzos a compresión se concentran en la zona de la garganta y se podría producir una falla por pandeo lateral.

Aparentemente la combinación de carga axial y lateral afectan de manera similar a los dispositivos TADAS y ADAS. Sin embargo, existe una forma física de eliminar la acción de la carga axial en el dispositivo TADAS. Esto se puede lograr mediante agujeros oblongos en la zona de articulación del dispositivo, de esta manera se permite el desplazamiento vertical y, por lo tanto, se elimina el efecto de la carga axial. Para el caso del dispositivo ADAS no existe un medio físico para evitar la acción de la carga axial debido a la condición de doble empotramiento. Además se ha demostrado que la variación de la rigidez de los empotramientos cambia de manera importante el comportamiento de los dispositivos.

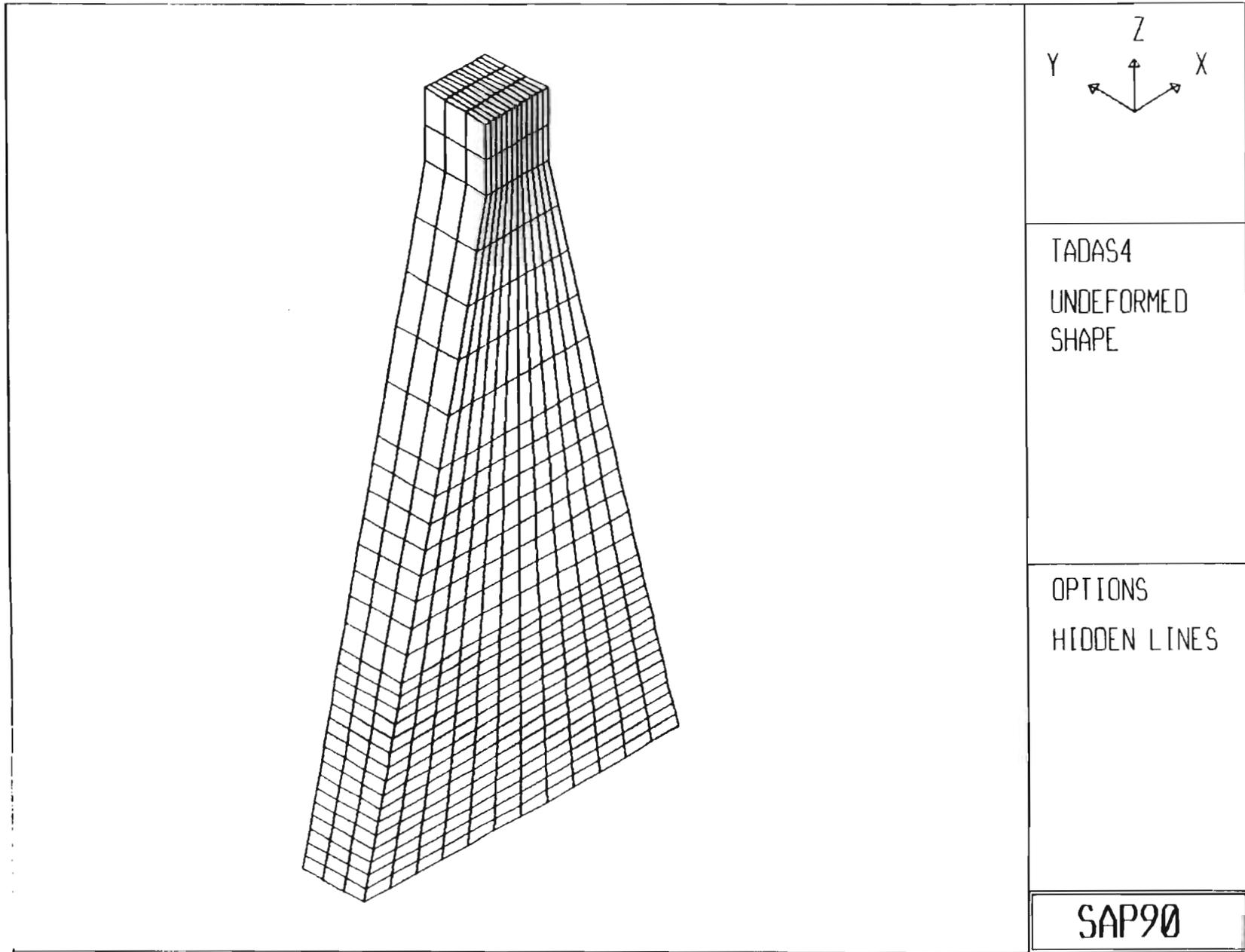
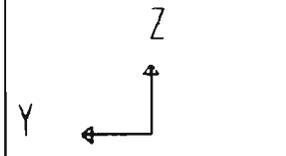
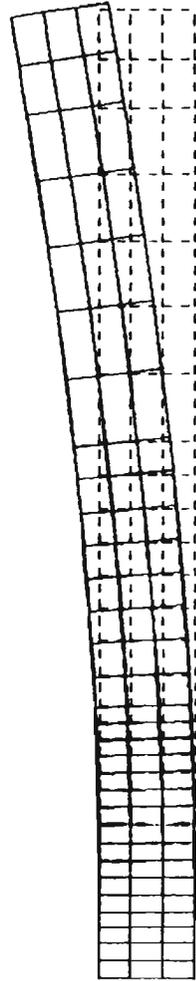


Fig. 4.1 Modelo TADAS con elemento finito



TADAS4
 DEFORMED
 SHAPE
 LOAD 1

MINIMA
 X-0.2611E-04
 Y-0.2631E-05
 Z-0.4014E-03
 MAXIMA
 X 0.2611E-04
 Y 0.4606E-02
 Z 0.4037E-03

SAP90

Fig. 4.2 Deformación por carga lateral

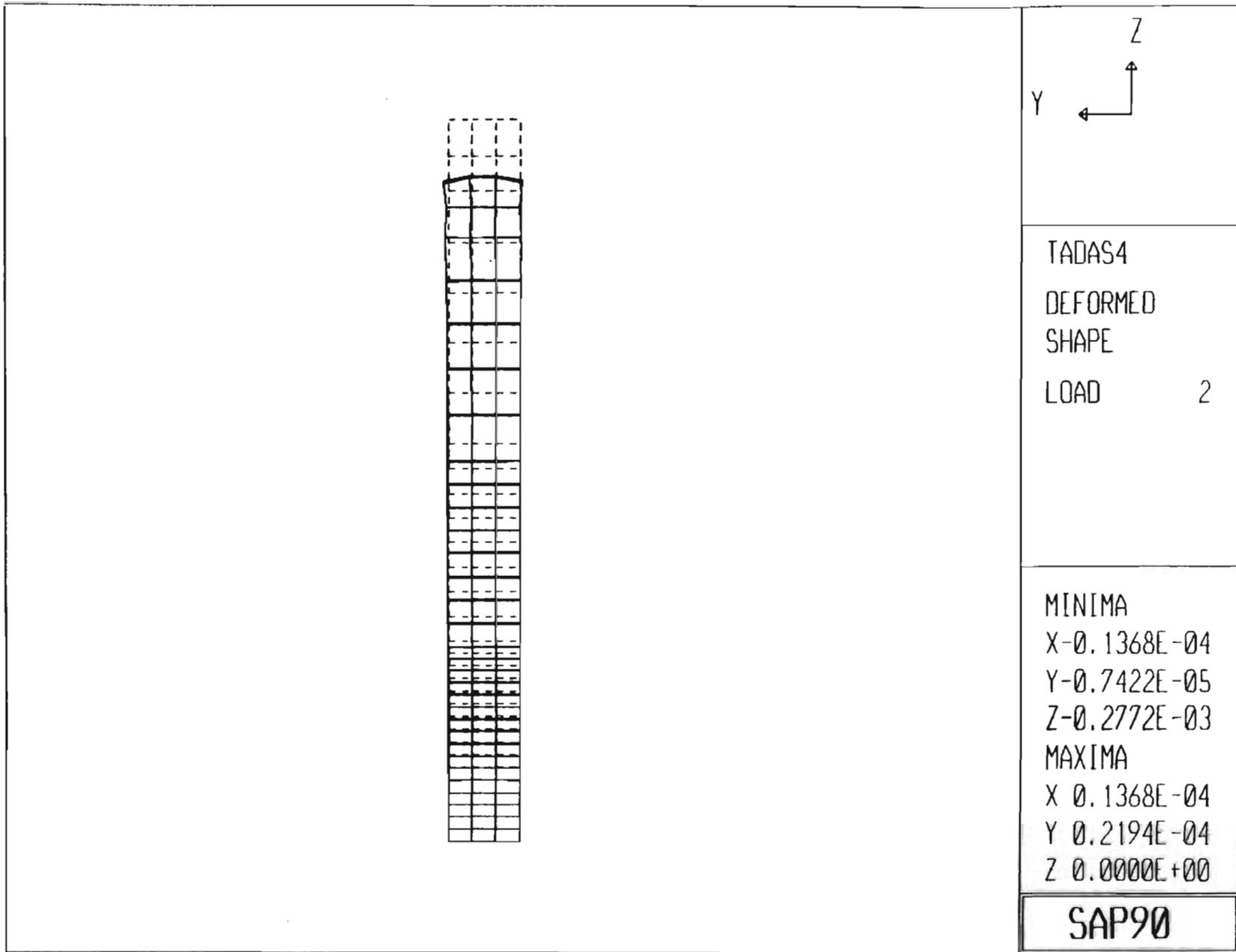


Fig. 4.3 Deformación por carga axial

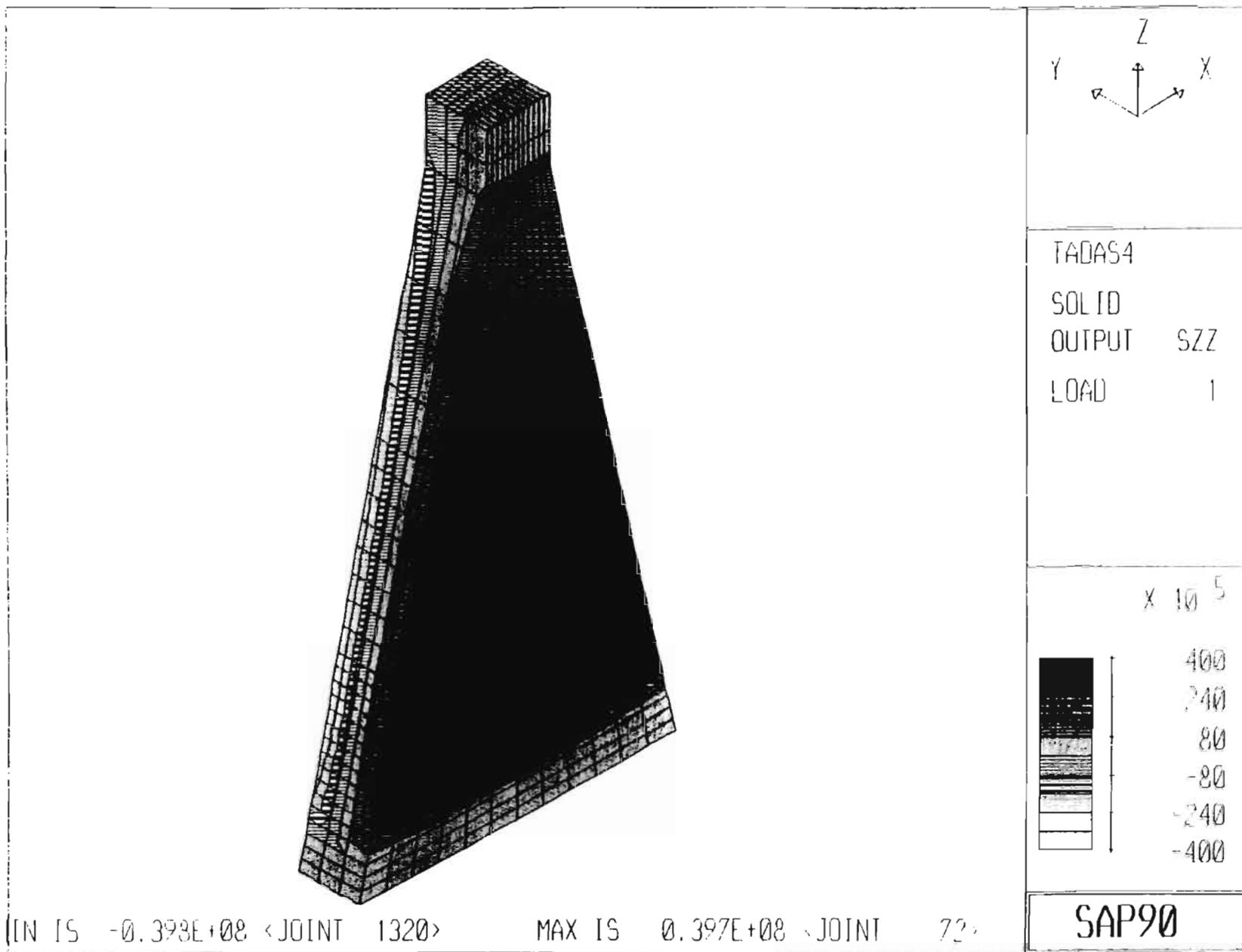
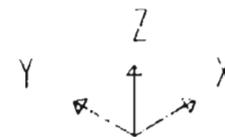
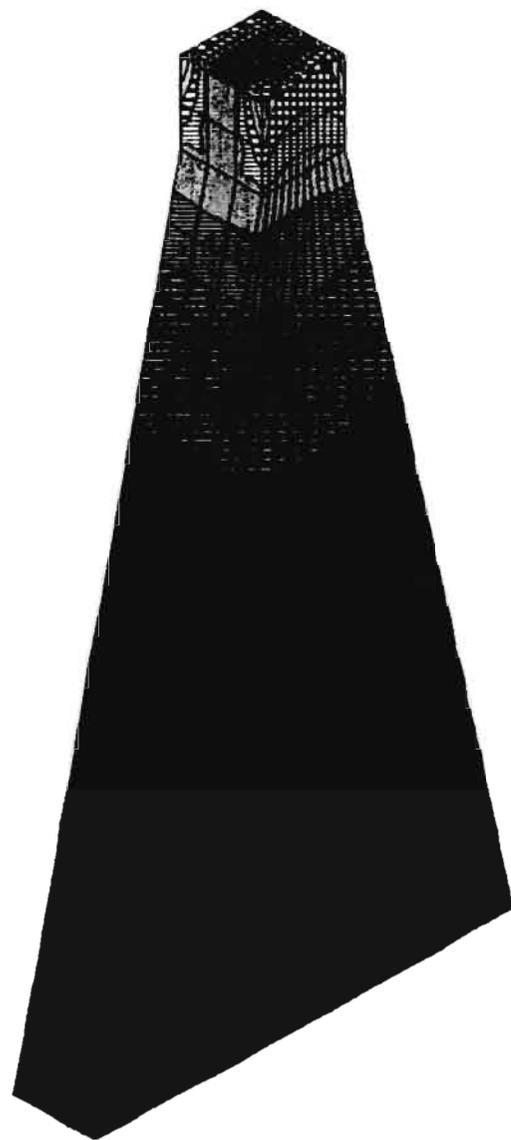


Fig. 4.4 Distribución de esfuerzos por carga lateral



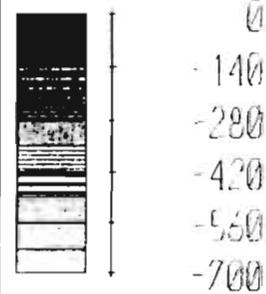
TADAS4

SOLID

OUTPUT SZZ

LOAD 2

$\times 10^5$



SAP90

MIN IS -0.654E+08 <JOINT 1664>

MAX IS 0.000E+00 <JOINT 1300>

Fig. 4.5 Distribución de esfuerzos por carga axial

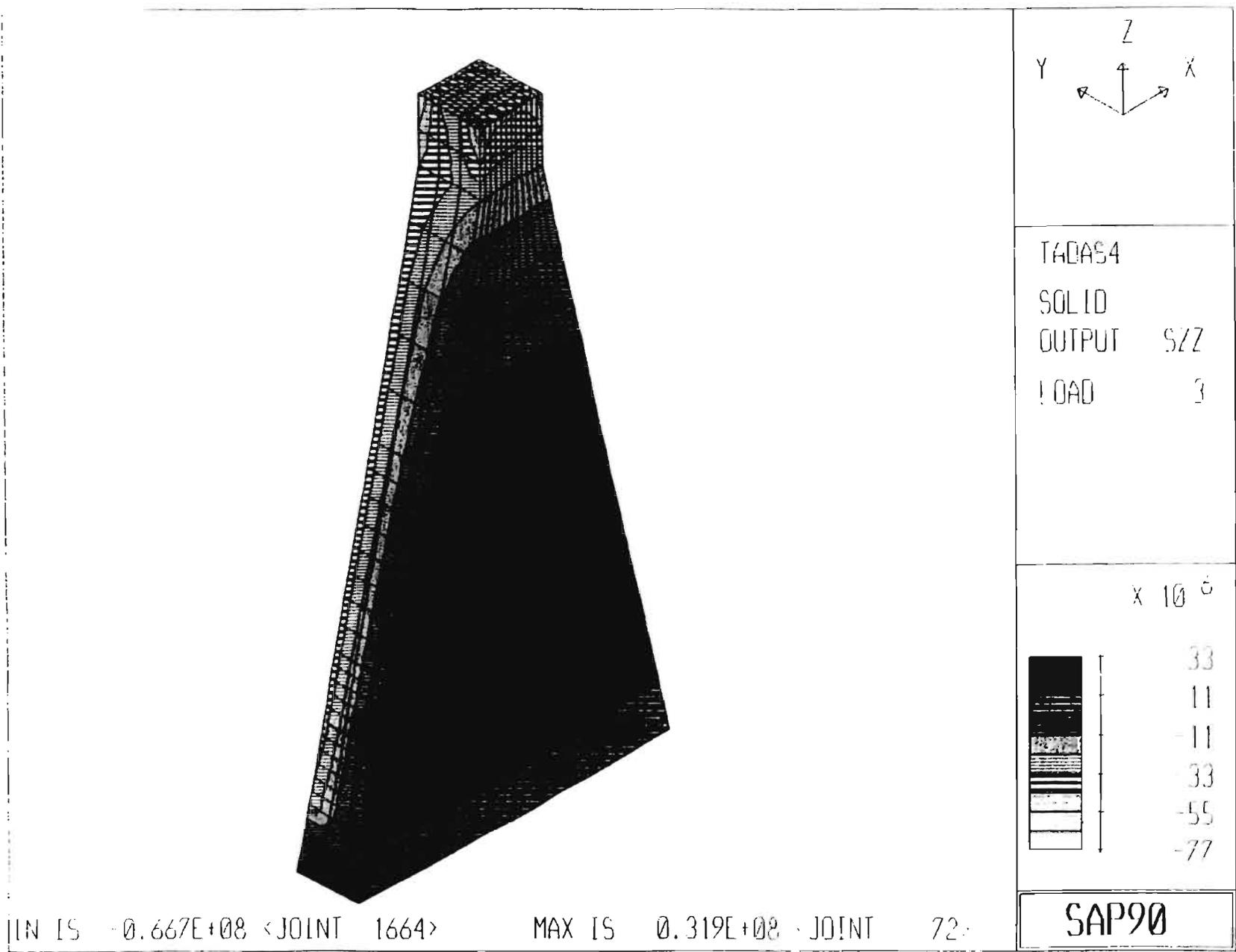


Fig. 4.6 Distribución de esfuerzos por combinación de cargas

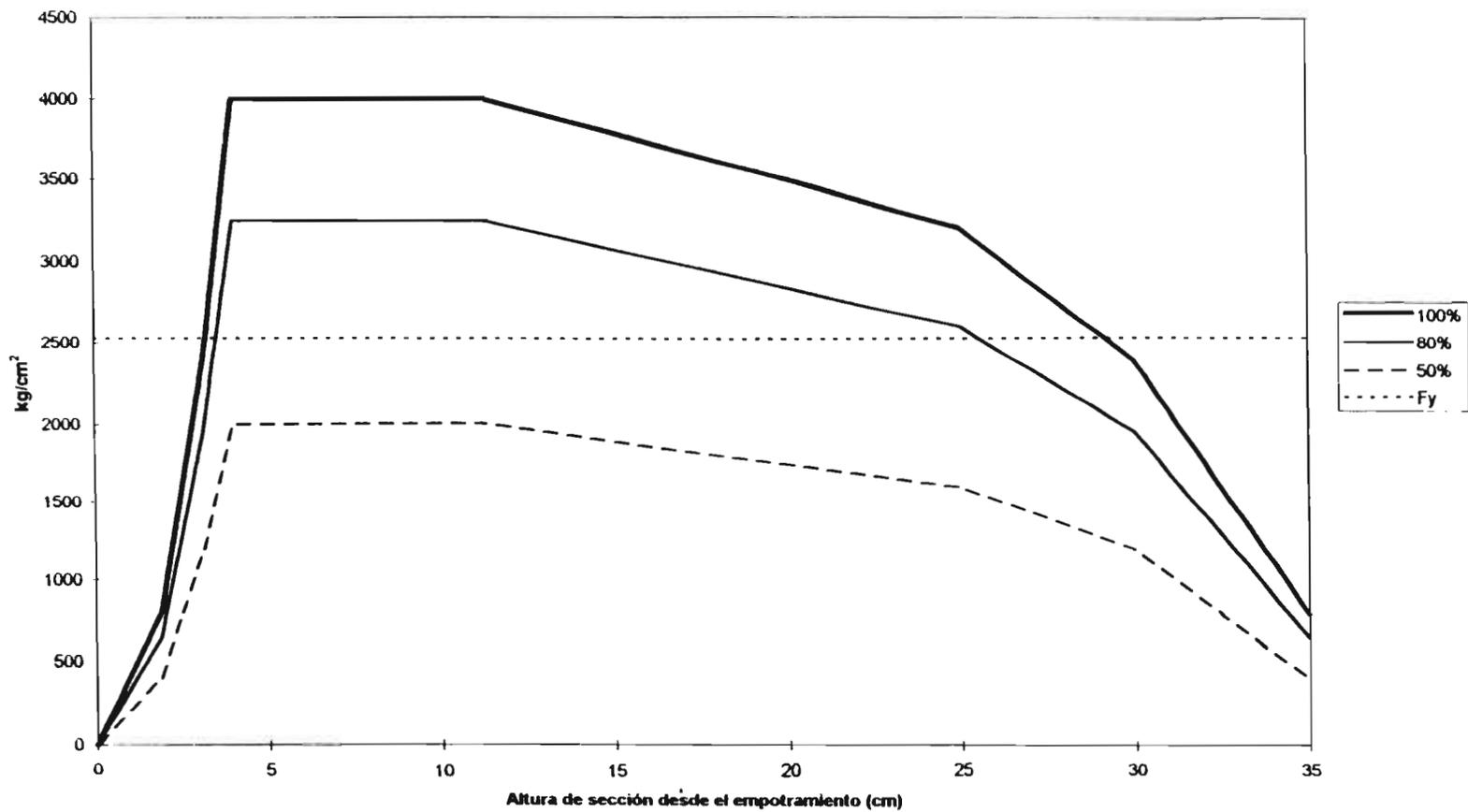
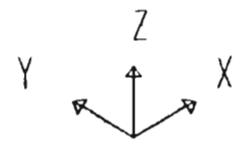
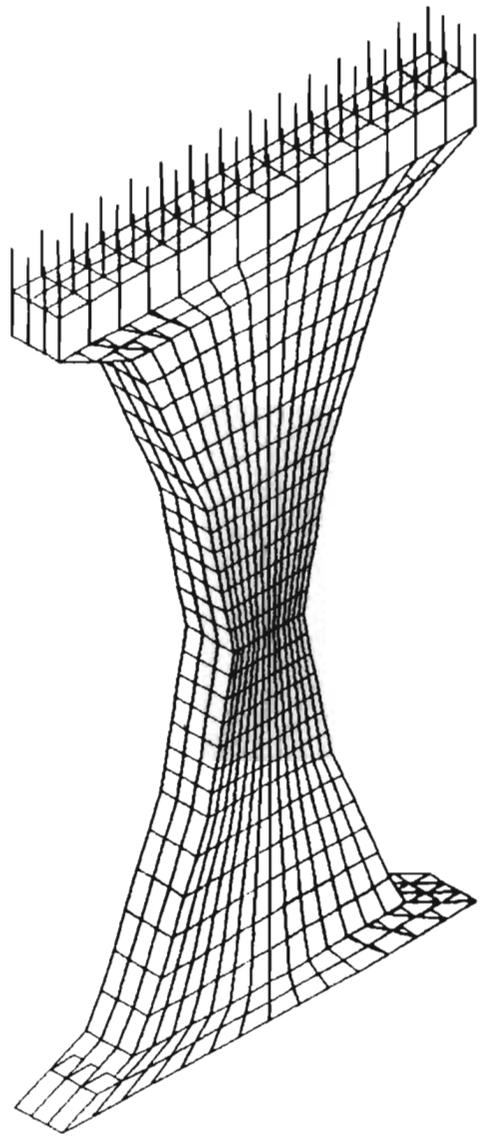


Fig. 4.7 Esfuerzos en placa TADAS para diferentes porcentajes de carga lateral

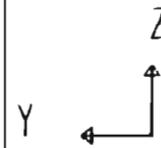
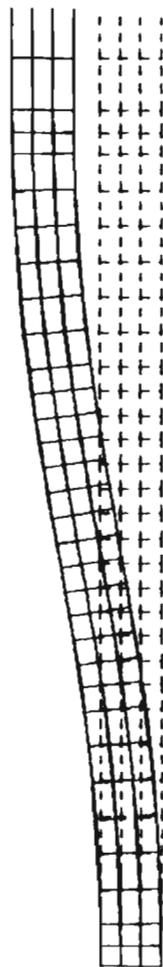


PADAS7
UNDEFORMED
SHAPE

OPTIONS
HIDDEN LINES

SAP90

Fig. 4.8 Modelo ADAS con elemento finito



PADAS7

DEFORMED
SHAPE

LOAD 2

MINIMA

X -0.2474E-04

Y 0.0000E+00

Z -0.2759E-03

MAXIMA

X 0.2474E-04

Y 0.4707E-02

Z 0.2759E-03

SAP90

Fig. 4.9 Deformación por carga lateral

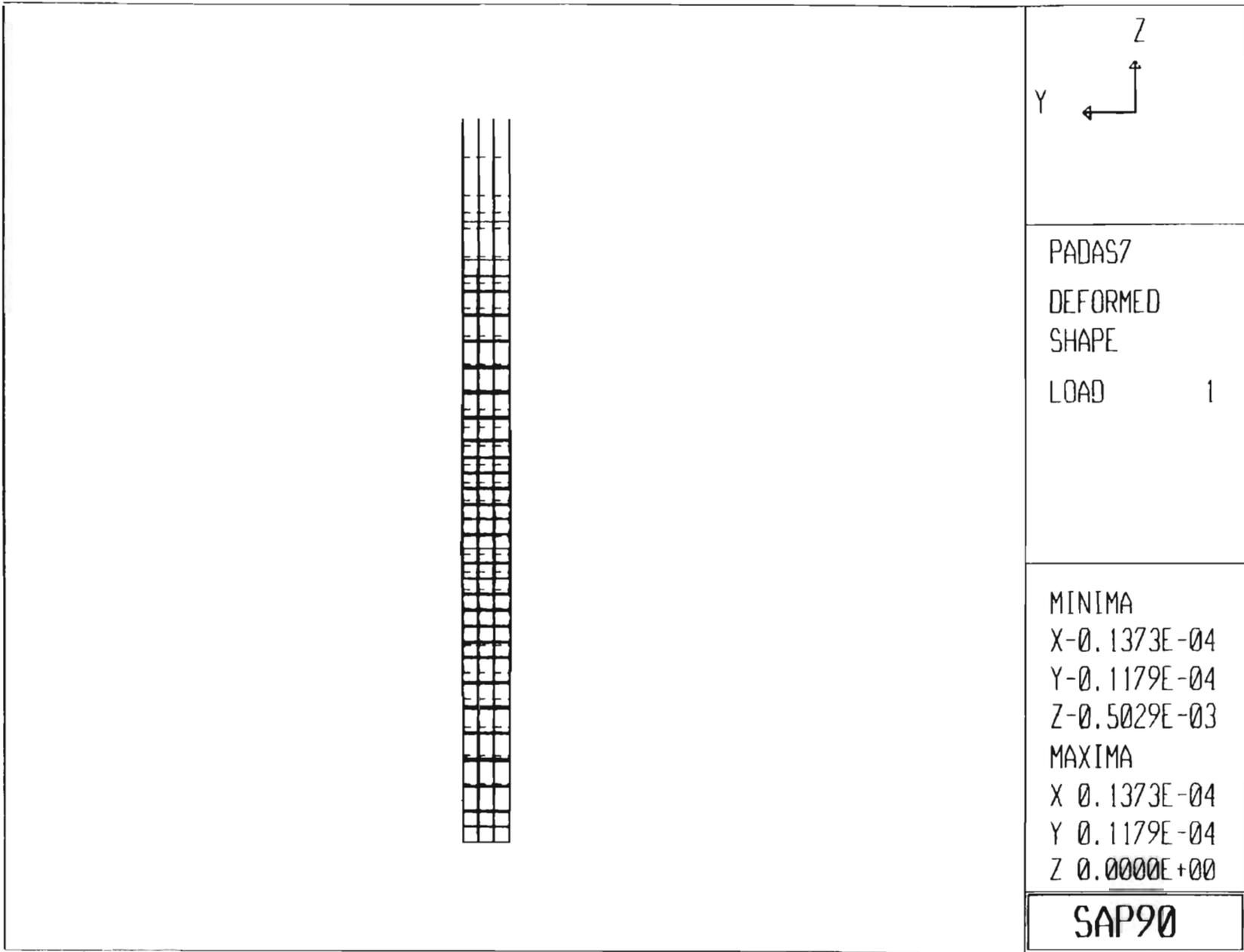


Fig. 4.10 Deformación por carga axial

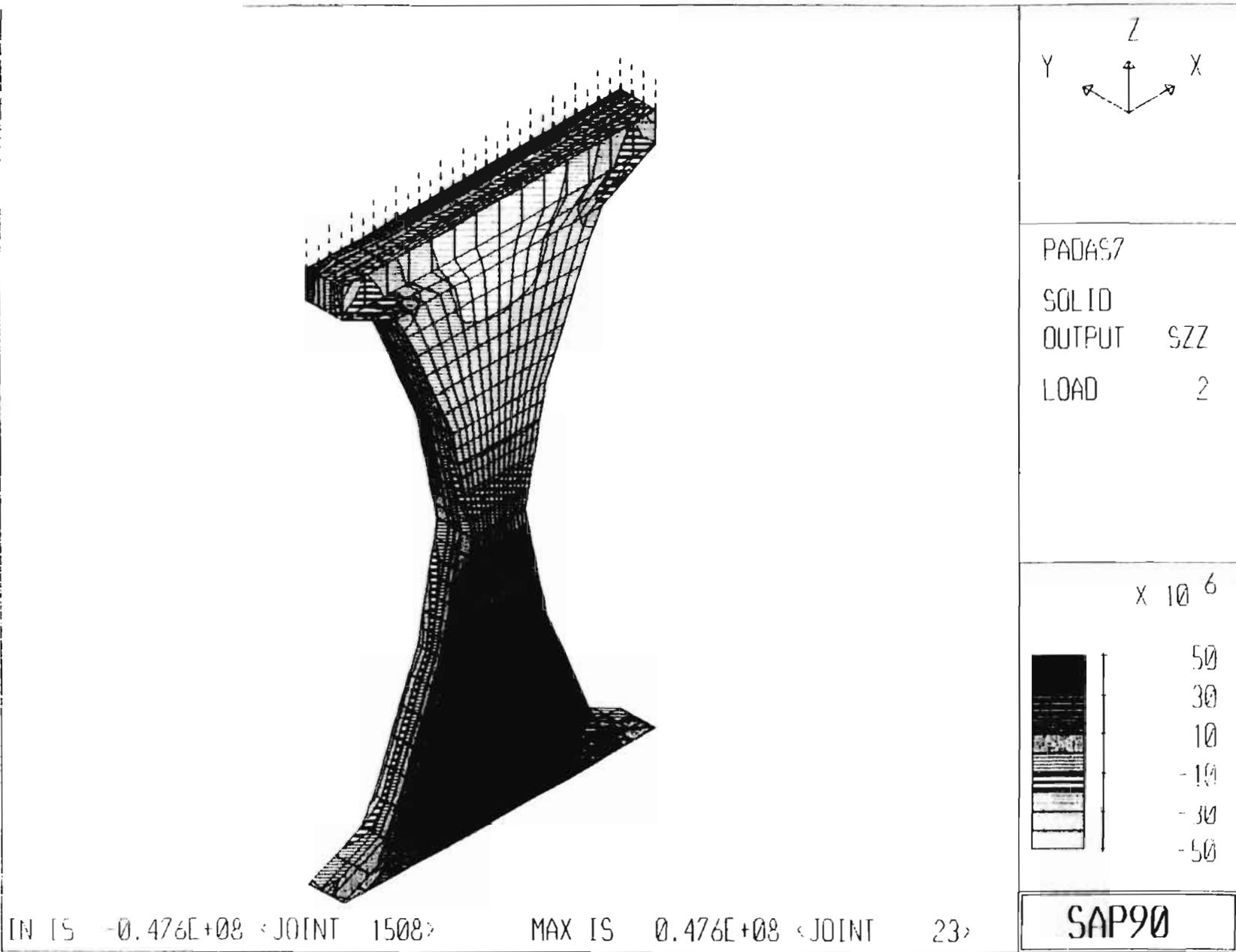


Fig. 4.11 Distribución de esfuerzos por carga lateral

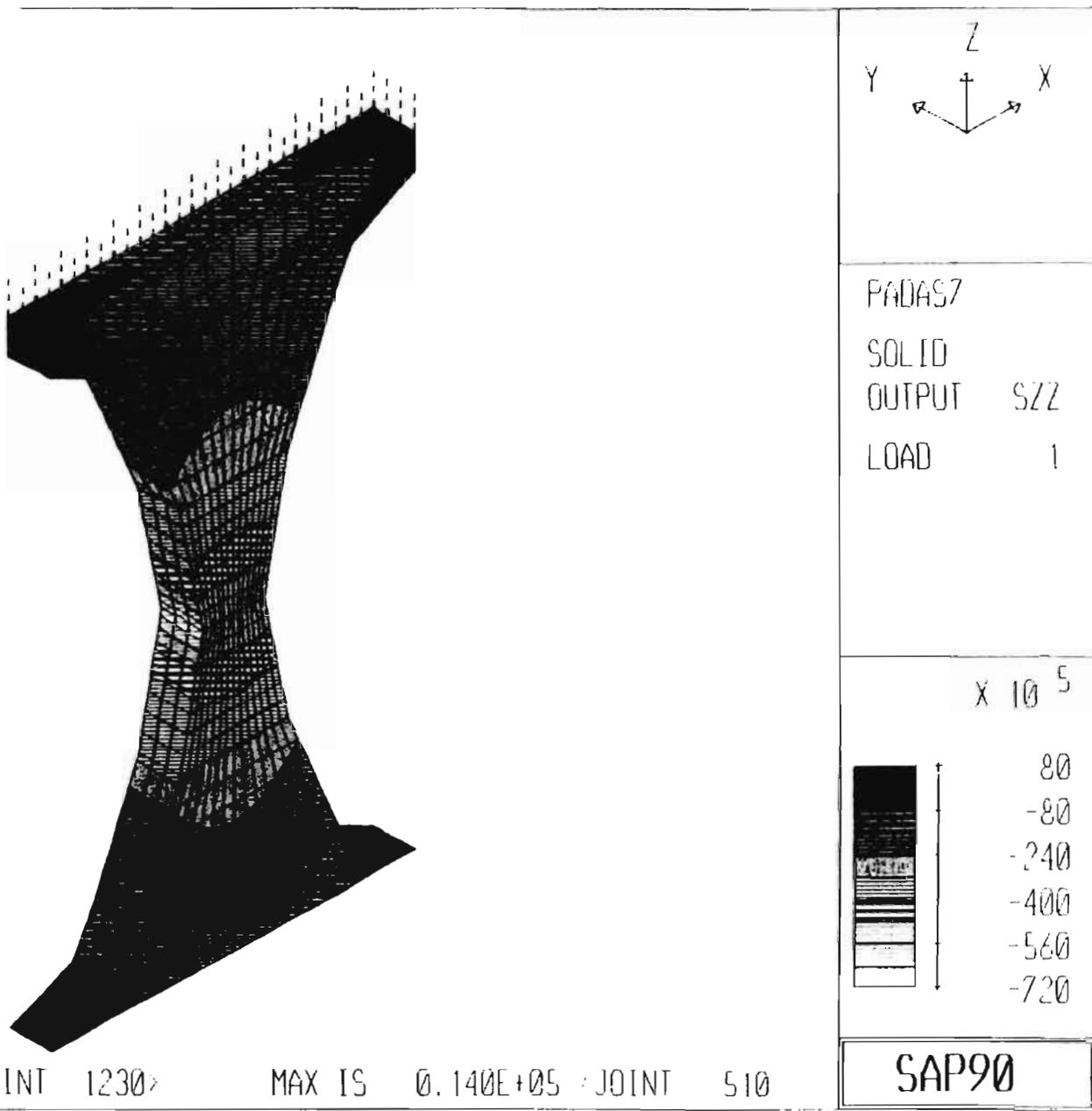
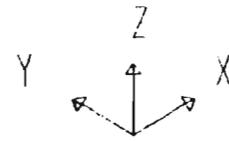
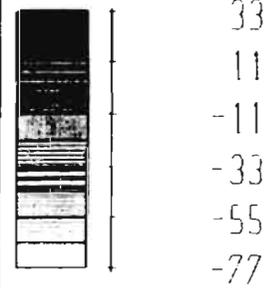


Fig. 4.12 Distribución de esfuerzos por carga axial



PADAS7
 SOLID
 OUTPUT SZZ
 LOAD 3

$\times 10^6$



MIN IS -0.726E+08 <JOINT 1620> MAX IS 0.298E+08 <JOINT 23>

SAP90

Fig. 4.13 Distribución de esfuerzos por combinación de cargas

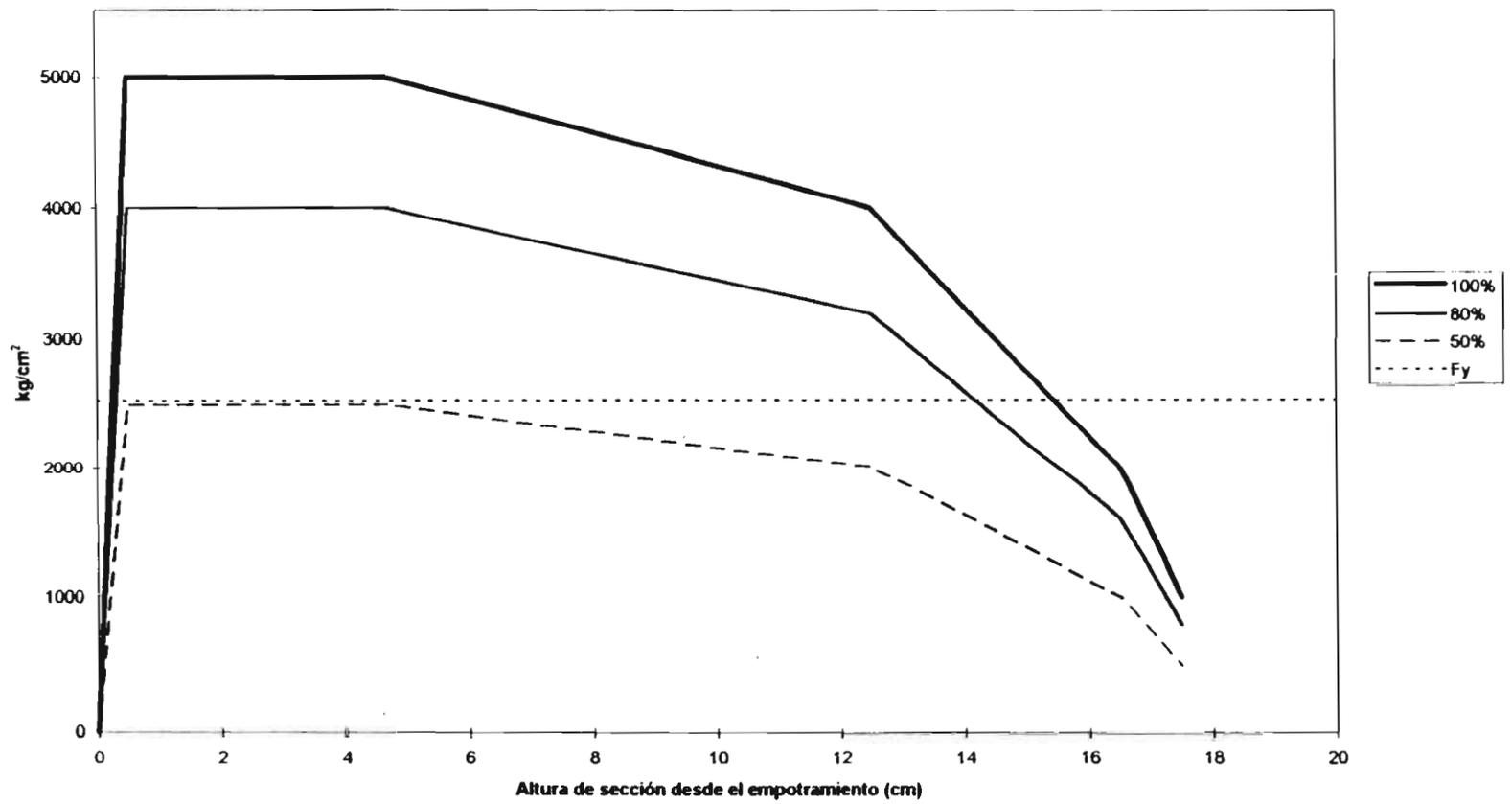


Fig. 4.14 Esfuerzos en media placa ADAS para diferentes porcentajes de carga lateral

5. Conclusiones

Se presentaron análisis inelásticos de un marco con dispositivos disipadores y los análisis con el método del elemento finito realizados a sus disipadores de energía tipo TADAS y ADAS. Los análisis anteriores permitieron evaluar la influencia de la carga axial en el comportamiento de los dispositivos y dieron lugar a las siguientes conclusiones.

Para los disipadores TADAS y ADAS existen representaciones analíticas sencillas que permiten conocer con buena aproximación las características de rigidez, resistencia y disipación de energía. Las metodologías comúnmente usadas para representar ambos dispositivos se basan en conocer las condiciones de apoyo del dispositivo, considerar sólo comportamiento a flexión y suponer que toda la placa que forma el dispositivo fluye al mismo tiempo. En este trabajo se demuestra que esta última hipótesis no es estrictamente cierta pues existen zonas en los dispositivos TADAS y ADAS que fluyen por carga lateral antes que el resto de la placa. Las zonas restantes fluyen cuando se alcanza el endurecimiento por deformación en la "zona crítica". Debido a esto es deseable considerar lo anterior en el diseño.

A fin de poder observar la influencia de la carga axial en los dispositivos TADAS y ADAS estos fueron modelados como elementos columna dentro de los análisis inelásticos. Se pueden obtener dispositivos TADAS y ADAS con dimensiones similares, rigidez lateral igual y un comportamiento ante carga lateral similar. Para el caso de carga axial y los elementos aquí estudiados se observó que el dispositivo TADAS es 16% mas rígido que el dispositivo ADAS.

Dentro de los análisis inelásticos se comparó la respuesta del modelo bidimensional con el arreglo completo de dispositivos con el modelo tradicional que utiliza una sola placa equivalente a todo el arreglo. Se puede concluir que el modelo tradicional puede subestimar el comportamiento de los dispositivos para relaciones bajas de valores inercia trabe / inercia columna (I_t/I_c). Lo anterior deberá considerarse cuando se realicen modelos de estructuras que vayan a ser rehabilitadas con dispositivos TADAS o ADAS, en las cuales se podrían presentar valores de I_t/I_c bajos.

Los análisis inelásticos mostraron que para relaciones I_t/I_c menores a 0.6 los dispositivos TADAS y ADAS presentan una ductilidad y disipación de energía razonable, aún cuando se presentan articulaciones plásticas en las trabes cerca de la conexión con los dispositivos. Por otro lado, para relaciones $0.6 \leq I_t/I_c \leq 1.2$ se observó que existe una disminución en la capacidad a cortante debido a la presencia de cierto valor de carga axial (35 a 40 Ton).

Durante los análisis inelásticos la carga axial promedio aplicada en los dispositivos TADAS fue equivalente a $0.30P_{max}$, mientras que para el dispositivo ADAS, fue de $0.35P_{max}$ (donde P_{max} es la carga axial resistente del disipador). Lo anterior permite comprender que, aunque los dispositivos estén sujetos al mismo nivel de carga lateral y axial (variaciones menores a 10%), el dispositivo ADAS se ve mas afectado y sufre mayores decrementos de la capacidad a cortante que los TADAS, pues éste último es mas rígido axialmente.

De los análisis realizados con elemento finito se observó que el dispositivo TADAS puede modelarse de manera relativamente sencilla gracias a su forma trapezoidal y se puede ajustar el modelo para obtener desplazamientos similares a los calculados con la representación analítica. Para el dispositivo ADAS se observó que su modelación con elementos finitos es mucho mas difícil debido a su geometría mas complicada, sin embargo, el modelo se puede ajustar para obtener desplazamientos similares a los calculados con las representaciones analíticas.

Para la condición de carga lateral se observó en ambos dispositivos que la placa no fluye totalmente pero la mayor parte de las zonas disipan energía. Para la combinación de carga axial y carga lateral se observaron zonas de concentración de esfuerzos a compresión que sugieren la fluencia del material, con lo que se podría poner en riesgo la estabilidad del dispositivo.

Aparentemente la combinación de carga axial y lateral afectan de manera similar a los dispositivos TADAS y ADAS. Sin embargo, en el dispositivo TADAS existe una manera física de eliminar la acción de la carga axial. Esto se puede lograr mediante agujeros oblongos en la zona de articulación del dispositivo, de esta manera se permite el desplazamiento vertical y, por lo tanto, se elimina el efecto de la carga axial. Para el caso del dispositivo ADAS no existe un medio físico para evitar la acción de la carga axial debido a la condición de doble empotramiento. Además, se ha demostrado (Whittaker et al, 1989) que la variación de la rigidez de los empotramientos cambia de manera importante el comportamiento de los dispositivos.

Con lo anterior se podría concluir que el dispositivo TADAS es mas recomendable que el ADAS, ya que se pueden tener las mismas características de rigidez, resistencia y disipación de energía que el ADAS, con un menor efecto de la carga axial sobre el dispositivo.

Los resultados mostrados aclaran algunas características sobre el comportamiento de los dispositivos TADAS y ADAS, específicamente, la influencia de la carga axial. Como se observó, esta carga puede disminuir la disipación de energía del dispositivo y se pueden esperar mayores daños en la estructura original. Por lo tanto es importante que se tome en cuenta la influencia de la carga axial en los diseños de los dispositivos o bien evitar físicamente la participación de la carga axial (como en el caso del dispositivo TADAS).

Los análisis realizados son analíticos. Es deseable que sean comprobados y complementados con estudios experimentales, de tal manera que se puedan observar las variables consideradas en este estudio e incluir otras variables (rigidez de empotramientos, características reales de materiales, diferentes sismos, etc.). Estos estudios son importantes pues en la Ciudad de México ya se han rehabilitado algunos edificios con dispositivos ADAS y existen aún ciertas interrogantes sobre la forma en que se comportarán ante un sismo intenso en el futuro.

6. Referencias

1. AISC (1991), "Manual of Steel Construction, Load and Resistant Factor Design," American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
2. Habibullah, A. (1991), "ETABS, Three - Dimensional Analysis of Building Systems," Computers and Structures, Inc.
3. Hanson, Robert D. (1993), "Supplemental Damping for Improved Seismic Performance," *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3., 319 - 334
4. Kannan y Powell (1973), "DRAIN - 2D, A General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures," *Report No. UCB/EERC ' 73/22*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
5. Martinez - Romero, Enrique (1993), "Experiences on the Use of Supplementary Energy Dissipators on Building Structures," *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3. 581 - 625.

6. Ruiz, E., R. Mejía y S. E. Ruiz (1996), "Comparative Study of a Multistory Frame with Energy Dissipation Devices and without them," *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, No. 1535.
7. Ruiz, S., O. E. Urrego y F. L. Silva (1995), "Influence of the Spatial Distribution of Energy - Dissipating Bracing Elements on the Seismic Response of Multistorey Frames," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, 1511 - 1525.
8. Scholl, R. E. (1993), "Fundamental Design Issues for Supplemental Damping Applications," *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3. 627 - 636.
9. Tena Colunga, A. (1996), "Procedimiento Analítico para Definir la Rigidez y Capacidad Lateral de los Dispositivos Disipadores de Energía ADAS," *Reporte Centro de Investigación Sísmica, Fundación Javier Barros Sierra*.
10. Tena Colunga, A. (1997), "Mathematical Modeling of the ADAS Energy Dissipation Device," *Engineering Structures Journal*, en prensa.
11. Tsai y Chen (1992), "Seismic Response of Building Structures using Steel Triangular Plate Energy Dissipators," *Report No. CEER/R 81-09*, Center for Earthquake Engineering Research, National Taiwan University, Taipei, Taiwan
12. Tsai, Chen, Hong y Su (1993), "Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic - Resistant Construction," *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3. 505 - 527.
13. Wilson y Habibullah (1992), "SAP90, A Series of computer Programs for the Finite Element Analysis of Structures," Computers and Structures, Inc.

14. Whittaker A., V. V. Bertero, J. Alonso y C. Thompson (1989), "Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements," *Report No. UCB/EERC ' 89/02*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
15. Whittaker, A., Y. Aiken, D. Bergman, P. Clark, J. Cohen, J. Kelly, y R. Scholl (1992), "Code Requirements for the Design and Implementation of Passive Energy Dissipation Systems," *Energy Dissipation Working Group*, Structural Engineers Association of Northern California, ATC-17-1
16. Whittaker, A., M. C. Constantinou y C. A. Kircher (1996), "Seismic Rehabilitation Using Supplemental Damping Systems," *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, No. 430.

7. Apéndice A

Archivo de entrada de datos para SAP90 del modelo TADAS

Modelo de placas TADAS REFINADO 4, acero A - 36, unidades kg - m - s.

SYSTEM

R=0 L=2 C=0 V=0 T=0.0001 P=0 W=0 Z=0

JOINTS

| | | | | |
|-----|------------|----------|----------|------------------------|
| 1 | X=0 | Y=0 | Z=0 | |
| 13 | X=0.18 | Y=0 | Z=0 | |
| 209 | X=0.022308 | Y=0 | Z=0.10 | |
| 221 | X=0.157692 | Y=0 | Z=0.10 | Q=1.13.209.221.1.13 |
| 222 | X=0.025096 | Y=0 | Z=0.1125 | |
| 234 | X=0.154904 | Y=0 | Z=0.1125 | |
| 313 | X=0.044615 | Y=0 | Z=0.20 | |
| 325 | X=0.135385 | Y=0 | Z=0.20 | Q=222.234.313.325.1.13 |
| 326 | X=0.050192 | Y=0 | Z=0.225 | |
| 338 | X=0.129808 | Y=0 | Z=0.225 | |
| 378 | X=0.0725 | Y=0 | Z=0.325 | |
| 390 | X=0.1075 | Y=0 | Z=0.325 | Q=325.338.378.390.1.13 |
| 391 | X=0.0725 | Y=0 | Z=0.3425 | |
| 403 | X=0.1075 | Y=0 | Z=0.3425 | G=391.403.1 |
| 404 | X=0.0725 | Y=0 | Z=0.36 | |
| 416 | X=0.1075 | Y=0 | Z=0.36 | G=404.416.1 |
| 417 | X=0 | Y=0.0117 | Z=0 | |
| 429 | Y=0.18 | Y=0.0117 | Z=0 | |
| 625 | X=0.022308 | Y=0.0117 | Z=0.10 | |
| 637 | X=0.157692 | Y=0.0117 | Z=0.10 | Q=417.429.625.637.1.13 |
| 638 | X=0.025096 | Y=0.0117 | Z=0.1125 | |
| 650 | X=0.154904 | Y=0.0117 | Z=0.1125 | |
| 729 | X=0.044615 | Y=0.0117 | Z=0.20 | |

| | | | | |
|------|------------|----------|----------|----------------------------|
| 741 | X=0.135385 | Y=0.0117 | Z=0.20 | Q=638.650.729.741.1.13 |
| 742 | X=0.050192 | Y=0.0117 | Z=0.225 | |
| 754 | X=0.129808 | Y=0.0117 | Z=0.225 | |
| 794 | X=0.0725 | Y=0.0117 | Z=0.325 | |
| 806 | X=0.1075 | Y=0.0117 | Z=0.325 | Q=742.754.794.806.1.13 |
| 807 | X=0.0725 | Y=0.0117 | Z=0.3425 | |
| 819 | X=0.1075 | Y=0.0117 | Z=0.3425 | G=807.819.1 |
| 820 | X=0.0725 | Y=0.0117 | Z=0.36 | |
| 832 | X=0.1075 | Y=0.0117 | Z=0.36 | G=820.932.1 |
| 833 | X=0 | Y=0.0234 | Z=0 | |
| 845 | X=0.18 | Y=0.0234 | Z=0 | |
| 1041 | X=0.022308 | Y=0.0234 | Z=0.10 | |
| 1053 | X=0.157692 | Y=0.0234 | Z=0.10 | Q=833.845.1041.1053.1.13 |
| 1054 | X=0.025096 | Y=0.0234 | Z=0.1125 | |
| 1066 | X=0.154904 | Y=0.0234 | Z=0.1125 | |
| 1145 | X=0.044615 | Y=0.0234 | Z=0.20 | |
| 1157 | X=0.135385 | Y=0.0234 | Z=0.20 | Q=1054.1066.1145.1157.1.13 |
| 1158 | X=0.050192 | Y=0.0234 | Z=0.225 | |
| 1170 | X=0.129808 | Y=0.0234 | Z=0.225 | |
| 1210 | X=0.0725 | Y=0.0234 | Z=0.325 | |
| 1222 | X=0.1075 | Y=0.0234 | Z=0.325 | Q=1158.1170.1210.1222.1.13 |
| 1223 | X=0.0725 | Y=0.0234 | Z=0.3425 | |
| 1235 | X=0.1075 | Y=0.0234 | Z=0.3425 | G=1223.1235.1 |
| 1236 | X=0.0725 | Y=0.0234 | Z=0.36 | |
| 1248 | X=0.1075 | Y=0.0234 | Z=0.36 | G=1236.1248.1 |
| 1249 | X=0 | Y=0.0350 | Z=0 | |
| 1261 | X=0.18 | Y=0.0350 | Z=0 | |
| 1457 | X=0.022308 | Y=0.0350 | Z=0.10 | |
| 1469 | X=0.157692 | Y=0.0350 | Z=0.10 | Q=1249.1261.1457.1469.1.13 |
| 1470 | X=0.025096 | Y=0.0350 | Z=0.1125 | |
| 1482 | X=0.154904 | Y=0.0350 | Z=0.1125 | |
| 1561 | X=0.044615 | Y=0.0350 | Z=0.20 | |
| 1573 | X=0.135385 | Y=0.0350 | Z=0.20 | Q=1470.1482.1561.1573.1.13 |
| 1574 | X=0.050192 | Y=0.0350 | Z=0.225 | |
| 1586 | X=0.129808 | Y=0.0350 | Z=0.225 | |
| 1626 | X=0.0725 | Y=0.0350 | Z=0.325 | |
| 1638 | X=0.1075 | Y=0.0350 | Z=0.325 | Q=1574.1586.1626.1638.1.13 |
| 1639 | X=0.0725 | Y=0.0350 | Z=0.3425 | |
| 1651 | X=0.1075 | Y=0.0350 | Z=0.3425 | G=1639.1651.1 |
| 1652 | X=0.0725 | Y=0.0350 | Z=0.36 | |
| 1664 | X=0.1075 | Y=0.0350 | Z=0.36 | G=1652.1664.1 |

RESTRAINTS

| | | | |
|------|------|---|---------------|
| 1 | 65 | 1 | R=1.1.1.1.1.1 |
| 417 | 481 | 1 | R=1.1.1.1.1.1 |
| 833 | 897 | 1 | R=1.1.1.1.1.1 |
| 1249 | 1313 | 1 | R=1.1.1.1.1.1 |
| 66 | 416 | 1 | R=0.0.0.1.1.1 |
| 482 | 832 | 1 | R=0.0.0.1.1.1 |
| 398 | 1248 | 1 | R=0.0.0.1.1.1 |
| 1314 | 1664 | 1 | R=0.0.0.1.1.1 |

SOLID

NM=1 MAXN=1

```
1 NUMT=1
T=0 E=2.1E10 U=0.3 G=8.4E9
1 JR=1.2.14.417 M=1 I=0 G=12.3.31
```

```
LOADS
378 416 1 L=1 F=0.94.0.0.0.0.
404 416 1 L=2 F=0.0.-1539.0.0.0
820 832 1 L=2 F=0.0.-1539.0.0.0
1236 1248 1 L=2 F=0.0.-1539.0.0.0
1652 1664 1 L=2 F=0.0.-1539.0.0.0
```

```
COMBO
1 C=1.0.0
2 C=0.0.5
3 C=1.0.5
```

Archivo de entrada de datos para SAP90 del modelo ADAS

Modelo de placas ADAS REFINADO pruebas. acero A - 36. unidades kg - m - s.

SYSTEM

R=0 L=3 C=0 V=0 T=0.0001 P=0 W=0 Z=0

JOINTS

| | | | | |
|-----|----------|---------|----------|------------------------|
| 1 | X=0 | Y=0 | Z=0 | |
| 15 | X=0.2100 | Y=0 | Z=0 | |
| 31 | X=0.0360 | Y=0 | Z=0.0175 | |
| 45 | X=0.1740 | Y=0 | Z=0.0175 | Q=1.15.31.45.1.15 |
| 46 | X=0.0439 | Y=0 | Z=0.0321 | |
| 60 | X=0.1661 | Y=0 | Z=0.0321 | |
| 121 | X=0.0740 | Y=0 | Z=0.1050 | |
| 135 | X=0.1360 | Y=0 | Z=0.1050 | Q=46.60.121.135.1.15 |
| 136 | X=0.0759 | Y=0 | Z=0.1150 | |
| 150 | X=0.1341 | Y=0 | Z=0.1150 | |
| 226 | X=0.0875 | Y=0 | Z=0.1750 | |
| 240 | X=0.1225 | Y=0 | Z=0.1750 | Q=136.150.226.240.1.15 |
| 241 | X=0.0856 | Y=0 | Z=0.1850 | |
| 255 | X=0.1244 | Y=0 | Z=0.1850 | |
| 316 | X=0.0759 | Y=0 | Z=0.2350 | |
| 330 | X=0.1341 | Y=0 | Z=0.2350 | Q=241.255.316.330.1.15 |
| 331 | X=0.0740 | Y=0 | Z=0.2450 | |
| 345 | X=0.1360 | Y=0 | Z=0.2450 | |
| 406 | X=0.0439 | Y=0 | Z=0.3179 | |
| 420 | X=0.1661 | Y=0 | Z=0.3179 | Q=331.345.406.420.1.15 |
| 421 | X=0.0360 | Y=0 | Z=0.3325 | |
| 435 | X=0.1740 | Y=0 | Z=0.3325 | |
| 451 | X=0 | Y=0 | Z=0.3500 | |
| 465 | X=0.2100 | Y=0 | Z=0.3500 | Q=421.435.451.465.1.15 |
| 466 | X=0 | Y=0 | Z=0.3700 | |
| 480 | X=0.2100 | Y=0 | Z=0.3700 | |
| 481 | X=0 | Y=0 | Z=0.3900 | |
| 495 | X=0.2100 | Y=0 | Z=0.3900 | Q=466.480.481.495.1.15 |
| 496 | X=0 | Y=0.008 | Z=0 | |

| | | | | |
|------|----------|---------|----------|----------------------------|
| 510 | X=0.2100 | Y=0.008 | Z=0 | |
| 526 | X=0.0360 | Y=0.008 | Z=0.0175 | |
| 540 | X=0.1740 | Y=0.008 | Z=0.0175 | Q=496.510.526.540.1.15 |
| 541 | X=0.0439 | Y=0.008 | Z=0.0321 | |
| 555 | X=0.1661 | Y=0.008 | Z=0.0321 | |
| 616 | X=0.0740 | Y=0.008 | Z=0.1050 | |
| 630 | X=0.1360 | Y=0.008 | Z=0.1050 | Q=541.555.616.630.1.15 |
| 631 | X=0.0759 | Y=0.008 | Z=0.1150 | |
| 645 | X=0.1341 | Y=0.008 | Z=0.1150 | |
| 721 | X=0.0875 | Y=0.008 | Z=0.1750 | |
| 735 | X=0.1225 | Y=0.008 | Z=0.1750 | Q=631.645.721.735.1.15 |
| 736 | X=0.0856 | Y=0.008 | Z=0.1850 | |
| 750 | X=0.1244 | Y=0.008 | Z=0.1850 | |
| 811 | X=0.0759 | Y=0.008 | Z=0.2350 | |
| 825 | X=0.1341 | Y=0.008 | Z=0.2350 | Q=736.750.811.825.1.15 |
| 826 | X=0.0740 | Y=0.008 | Z=0.2450 | |
| 840 | X=0.1360 | Y=0.008 | Z=0.2450 | |
| 901 | X=0.0439 | Y=0.008 | Z=0.3179 | |
| 915 | X=0.1661 | Y=0.008 | Z=0.3179 | Q=826.840.901.915.1.15 |
| 916 | X=0.0360 | Y=0.008 | Z=0.3325 | |
| 930 | X=0.1740 | Y=0.008 | Z=0.3325 | |
| 946 | X=0 | Y=0.008 | Z=0.3500 | |
| 960 | X=0.2100 | Y=0.008 | Z=0.3500 | Q=916.930.946.960.1.15 |
| 961 | X=0 | Y=0.008 | Z=0.3700 | |
| 975 | X=0.2100 | Y=0.008 | Z=0.3700 | |
| 976 | X=0 | Y=0.008 | Z=0.3900 | |
| 990 | X=0.2100 | Y=0.008 | Z=0.3900 | Q=961.975.976.990.1.15 |
| 991 | X=0 | Y=0.016 | Z=0 | |
| 1005 | X=0.2100 | Y=0.016 | Z=0 | |
| 1021 | X=0.0360 | Y=0.016 | Z=0.0175 | |
| 1035 | X=0.1740 | Y=0.016 | Z=0.0175 | Q=991.1005.1021.1035.1.15 |
| 1036 | X=0.0439 | Y=0.016 | Z=0.0321 | |
| 1050 | X=0.1661 | Y=0.016 | Z=0.0321 | |
| 1111 | X=0.0740 | Y=0.016 | Z=0.1050 | |
| 1125 | X=0.1360 | Y=0.016 | Z=0.1050 | Q=1036.1050.1111.1125.1.15 |
| 1126 | X=0.0759 | Y=0.016 | Z=0.1150 | |
| 1140 | X=0.1341 | Y=0.016 | Z=0.1150 | |
| 1216 | X=0.0875 | Y=0.016 | Z=0.1750 | |
| 1230 | X=0.1225 | Y=0.016 | Z=0.1750 | Q=1126.1140.1216.1230.1.15 |
| 1231 | X=0.0856 | Y=0.016 | Z=0.1850 | |
| 1245 | X=0.1244 | Y=0.016 | Z=0.1850 | |
| 1306 | X=0.0759 | Y=0.016 | Z=0.2350 | |
| 1320 | X=0.1341 | Y=0.016 | Z=0.2350 | Q=1231.1245.1306.1320.1.15 |
| 1321 | X=0.0740 | Y=0.016 | Z=0.2450 | |
| 1335 | X=0.1360 | Y=0.016 | Z=0.2450 | |
| 1396 | X=0.0439 | Y=0.016 | Z=0.3179 | |
| 1410 | X=0.1661 | Y=0.016 | Z=0.3179 | Q=1321.1335.1396.1410.1.15 |
| 1411 | X=0.0360 | Y=0.016 | Z=0.3325 | |
| 1425 | X=0.1740 | Y=0.016 | Z=0.3325 | |
| 1441 | X=0 | Y=0.016 | Z=0.3500 | |
| 1455 | X=0.2100 | Y=0.016 | Z=0.3500 | Q=1411.1425.1441.1455.1.15 |
| 1456 | X=0 | Y=0.016 | Z=0.3700 | |
| 1470 | X=0.2100 | Y=0.016 | Z=0.3700 | |
| 1471 | X=0 | Y=0.016 | Z=0.3900 | |

| | | | | |
|------|----------|---------|----------|----------------------------|
| 1485 | X=0.2100 | Y=0.016 | Z=0.3900 | Q=1456.1470.1471.1485.1.15 |
| 1486 | X=0 | Y=0.024 | Z=0 | |
| 1500 | X=0.2100 | Y=0.024 | Z=0 | |
| 1516 | X=0.0360 | Y=0.024 | Z=0.0175 | |
| 1530 | X=0.1740 | Y=0.024 | Z=0.0175 | Q=1486.1500.1516.1530.1.15 |
| 1531 | X=0.0439 | Y=0.024 | Z=0.0321 | |
| 1545 | X=0.1661 | Y=0.024 | Z=0.0321 | |
| 1606 | X=0.0740 | Y=0.024 | Z=0.1050 | |
| 1620 | X=0.1360 | Y=0.024 | Z=0.1050 | Q=1531.1545.1606.1620.1.15 |
| 1621 | X=0.0759 | Y=0.024 | Z=0.1150 | |
| 1635 | X=0.1341 | Y=0.024 | Z=0.1150 | |
| 1711 | X=0.0875 | Y=0.024 | Z=0.1750 | |
| 1725 | X=0.1225 | Y=0.024 | Z=0.1750 | Q=1621.1635.1711.1725.1.15 |
| 1726 | X=0.0856 | Y=0.024 | Z=0.1850 | |
| 1740 | X=0.1244 | Y=0.024 | Z=0.1850 | |
| 1801 | X=0.0759 | Y=0.024 | Z=0.2350 | |
| 1815 | X=0.1341 | Y=0.024 | Z=0.2350 | Q=1726.1740.1801.1815.1.15 |
| 1816 | X=0.0740 | Y=0.024 | Z=0.2450 | |
| 1830 | X=0.1360 | Y=0.024 | Z=0.2450 | |
| 1891 | X=0.0439 | Y=0.024 | Z=0.3179 | |
| 1905 | X=0.1661 | Y=0.024 | Z=0.3179 | Q=1816.1830.1891.1905.1.15 |
| 1906 | X=0.0360 | Y=0.024 | Z=0.3325 | |
| 1920 | X=0.1740 | Y=0.024 | Z=0.3325 | |
| 1936 | X=0 | Y=0.024 | Z=0.3500 | |
| 1950 | X=0.2100 | Y=0.024 | Z=0.3500 | Q=1906.1920.1936.1950.1.15 |
| 1951 | X=0 | Y=0.024 | Z=0.3700 | |
| 1965 | X=0.2100 | Y=0.024 | Z=0.3700 | |
| 1966 | X=0 | Y=0.024 | Z=0.3900 | |
| 1980 | X=0.2100 | Y=0.024 | Z=0.3900 | Q=1951.1965.1966.1980.1.15 |

RESTRAINTS

| | | | |
|------|------|---|---------------|
| 1 | 1980 | 1 | R=0.0.0.1.1.1 |
| 1 | 15 | 1 | R=1.1.1.1.1.1 |
| 496 | 510 | 1 | R=1.1.1.1.1.1 |
| 991 | 1005 | 1 | R=1.1.1.1.1.1 |
| 1486 | 1500 | 1 | R=1.1.1.1.1.1 |
| 481 | 495 | 1 | R=1.0.1.1.1.1 |
| 976 | 990 | 1 | R=1.0.1.1.1.1 |
| 1471 | 1485 | 1 | R=1.0.1.1.1.1 |
| 1966 | 1980 | 1 | R=1.0.1.1.1.1 |

POTENCIAL

| | | |
|------|------|---------|
| 466 | 480 | T=80.80 |
| 961 | 975 | T=80.80 |
| 1456 | 1470 | T=80.80 |
| 1951 | 1965 | T=80.80 |

FRAME

MM=1 NL=1 T=1
 I A=0.0025 E=2.1E10 TC=0.2096E-3
 I T=80.0.001.0.001
 1333 481 466 M=1 LR=1.1.0.1.1.1 NSL=1.0.1 G=14.1.1.1
 1313 976 961 M=1 LR=1.1.0.1.1.1 NSL=1.0.1 G=14.1.1.1
 1333 1471 1456 M=1 LR=1.1.0.1.1.1 NSL=1.0.1 G=14.1.1.1

1348 1966 1951 M=1 LR=1.1.0.1.1.1 NSL=1.0.1 G=14.1.1.1

SOLID

NM=2 MAXN=1

1 NUMT=1

T=100 E=2.1E10 U=0.3 G=8.4E9

2 NUMT=1

T=100 E=2.1E14 U=0.3 G=8.4E13

1 JR=1.2.16.496 M=1 TZ=100 I=0 G=14.3.30

1261 JR=451.452.466.946 M=2 TZ=100 I=0 G=14.3.1

LOADS

458 L=1 F=0.0.-0.001.0.0.0

451 480 1 L=2 F=0.107.0.0.0.0

451 480 1 L=3 F=0.107.0.0.0.0

COMBO

1 C=1.0

2 C=0.1.0

3 C=1.1