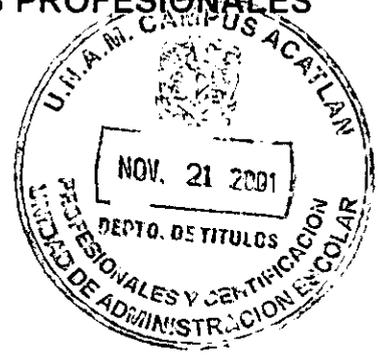


24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ACATLAN"



DISEÑO DE UN MARCO DE ACERO CON
DISIPADORES DE ENERGIA SISMICA

299798

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
ALFREDO MONTAÑO ORTIZ

ASESOR: M.I. FRANCISCO LEONEL SILVA GONZALEZ





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.

Dedicatorias

¡Gracias a Dios!

Porque sin él nada existiría.

*A la memoria de mi abuela:
Aristea Hernández Espinoza*

*A la memoria de mi madre:
Natalia Ortiz de Montaña*

A mi padre:

*Carlos Montaña Hernández,
gracias, por su amor, su
cariño, su confianza y su
apoyo depositados en mi
durante todos estos años, por
sus consejos y orientaciones
en múltiples aspectos de la
vida, por su ejemplar espíritu
de lucha en la vida diaria.
Porque sus esfuerzos y
sacrificios no fueron en vano.
¡Te quiero!*

*A mi tío:
Lic. Rubén Ventura
Montaña Hernández, gracias
por sus consejos, sus estímulos
y apoyo moral, porque siempre
me ha inculcado el espíritu de
superación.*

*A la memoria de mi hermana:
Sonia Montaña Ortiz, porque
tu recuerdo me indica que
Dios sí existe, que después de
esta vida existe algo muy
grandioso.*

*A mis familiares, gracias por
su apoyo moral.*

*A mis hermanos:
Carlos, Alvaro e Israel,
gracias por su afecto y
comprensión, por contagiarme
su alegría y energía, con
cariño por todos esos
momentos difíciles y felices
que hemos pasado.*

*A mis profesores y a todas
aquellas personas que me han
compartido sus conocimientos
y que han influido en mi
formación profesional.*

*A la Universidad Nacional
Autónoma de México, por
aceptarme como universitario
en el Colegio de ciencias y
Humanidades Vallejo, y por
brindarme la oportunidad de
estudiar la carrera de
Ingeniería Civil en la ENEP
Acatlan, con mi
agradecimiento profundo por
la formación profesional
proporcionada.*

*A mis compañeros, amigos y a
todas aquellas personas que
me han transmitido sus
experiencias y que de alguna
u otra forma me han hecho
reflexionar.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente el apoyo brindado para el desarrollo de esta tesis:

Al *M. en Ing. Francisco Leonel Silva González*, por su gran dirección y orientación durante todo el proceso de este trabajo, por su apoyo incondicional y por su paciencia brindada, por compartir sus conocimientos, además por brindarme su bonita amistad y por ser una persona admirable y digna de ejemplo.

A la *Dra. en Ing. Sonia Elda Ruiz Gómez*, por brindarme la oportunidad de titularme, gracias por su confianza y su apoyo, por sus oportunos y valiosos comentarios, por sus sugerencias y consejos recibidos para la culminación de este trabajo.

A mis sinodales: *M. en E. Francisco Pérez Arellano, M. en Ing. Rolando Reyes Greco y al Ing. Hugo Hernández Barrios* por sus sugerencias, comentarios y opiniones a este trabajo.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México y a sus profesores* por brindarme la oportunidad de estudiar la carrera de Ingeniería Civil en sus instalaciones, y porque he podido conocer compañeros, amigos y gente muy profesional dedicada al conocimiento, gracias por la formación profesional proporcionada.

Al *Instituto de Ingeniería de la UNAM y a todo su personal* por las facilidades concedidas para el uso de sus equipos y sus instalaciones.

Se agradece a la *Dirección General de Apoyo al Personal Académico de la UNAM (DGAPA UNAM)* el patrocinio para esta tesis, la cual se realizó dentro del proyecto **IN111998**.

A todas aquellas personas, ingenieros, amigos y compañeros que me han hecho reflexionar de alguna u otra forma y que directa o indirectamente han influido en mi formación profesional.

DISEÑO DE UN MARCO DE ACERO CON DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA

ÍNDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>iv</i>
<i>1 CONCEPTOS GENERALES</i>	<i>1</i>
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Dispositivos de control activo	3
1.1.2 Dispositivos de control pasivo	6
1.2 Objetivos y alcances	15
<i>2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	<i>18</i>
2.1 Descripción del sistema disipador usado	18
2.2 Consideraciones generales para el diseño del marco con disipadores de energía	23
2.3 Conceptos fundamentales	26
2.4 Modelación estructural	29
2.5 Proceso de diseño del marco convencional	33
2.6 Método de diseño para el marco con disipadores de energía	35
2.6.1 Elección de la distribución espacial de los disipadores en el marco con disipadores	35
2.6.2 Definición del valor de los factores α_1 y α_2	36
2.6.3 Determinación de las secciones de columnas y trabes de la estructura sin disipadores	37
2.6.4 Obtención de la rigidez lateral K_{sd} que realmente aporta el marco sin disipadores	38
2.6.5 Cálculo de la rigidez lateral que debe aportar el sistema disipador TADAS	38
2.6.6 Determinación de las propiedades geométricas y mecánicas de los disipadores TADAS	39

- 2.6.7 Cálculo de las propiedades geométricas de un elemento prismático equivalente al dispositivo disipador TADAS 42
- 2.6.8 Determinación de las características de las diagonales de contraventeo que están ligadas al dispositivo disipador TADAS 43
- 2.6.9 Cálculo de las propiedades geométricas y mecánicas definitivas de los dispositivos TADAS 44

3 ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS MARCOS 47

- 3.1 Descripción y ubicación de los sistemas estructurales a diseñar 47
 - 3.1.1 Propiedades mecánicas del material empleado en el análisis y diseño de los marcos 54
- 3.2 Análisis y diseño del marco convencional 55
 - 3.2.1 Predimensionamiento 55
 - 3.2.2 Análisis estructural del marco convencional 67
 - 3.2.3 Rigideces laterales de entrepiso K_T y secciones definitivas del marco convencional 70
 - 3.2.4 Revisión de los estados límite de falla y de servicio 71
 - 3.2.5 Características geométricas y mecánicas definitivas de los elementos estructurales 78
- 3.3 Análisis y diseño del marco con disipadores 80
 - 3.3.1 Elección del arreglo de los disipadores 82
 - 3.3.2 Predimensionamiento del marco con disipadores 82
 - 3.3.3 Predimensionamiento de los disipadores TADAS 88
 - 3.3.4 Cambio de propiedades geométricas de los disipadores y de las diagonales 91
 - 3.3.5 Revisión de los estados límite de falla y de servicio 93
 - 3.3.6 Características geométricas y mecánicas definitivas de los elementos estructurales 94

4 ANÁLISIS DINÁMICO INELÁSTICO 105

- 4.1 Elección de la excitación 106
- 4.2 Modelación estructural 108
- 4.3 Análisis comparativo de la respuesta sísmica de los marcos 110
 - 4.3.1 Envolvente de desplazamientos máximos de cada nivel 112
 - 4.3.2 Envolvente de desplazamientos relativos de entrepiso 113
 - 4.3.3 Envoltentes de fuerzas axiales, de fuerzas cortantes y de momentos flexionantes en la línea de columnas α , β , ϕ y γ 115
 - 4.3.4 Envoltentes de fuerzas cortantes y de momentos flexionantes en las trabes de las crujías κ , λ y μ 119
 - 4.3.5 Formación de articulaciones plásticas en los marcos con disipadores y en el marco convencional 121
 - 4.3.6 Ciclos histeréticos y energía disipada por los disipadores 128

4.3.7 Demanda de ductilidad global	142
4.3.8 Demanda de ductilidad de los disipadores	151
4.4 Elección del marco con la mejor respuesta	156
5 COSTOS INICIALES	158
5.1 Estimación de los costos iniciales de los marcos	160
5.1.1 Marco convencional	160
5.1.2 Marco con disipadores TADAS simple	161
5.1.3 Marco con disipadores TADAS doble	162
5.2 Análisis comparativo de costos iniciales	163
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	164
6.1 Conclusiones	164
6.2 Estudios futuros	167
REFERENCIAS	168
APÉNDICE A	172
Obtención de la expresión general para el cálculo de las dimensiones de las columnas del marco con disipadores	172
APÉNDICE B	175
Diagramas de flujo para la revisión de los elementos estructurales de acero ante los estados límite de falla	175
APÉNDICE C	193
Archivos de datos del marco con disipadores TADAS doble	193

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la normatividad de diseño sísmico y los diversos códigos de diseño, entre ellos el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, recomiendan que en el diseño sísmico de estructuras de edificios resistentes a acciones dinámicas horizontales se aproveche la ductilidad que poseen los sistemas estructurales, es decir que la demanda de resistencia sísmica ejercida sobre una estructura por un movimiento sísmico se disipe a través del comportamiento dúctil de sus miembros estructurales. Efectivamente, en el diseño sismoresistente de estructuras de edificios se han utilizado diversos sistemas estructurales, entre otros se encuentran los marcos "rígidos" compuestos por trabes y columnas únicamente, o una combinación de marcos estructurales con diagonales de contraventeo y/o muros de rigidez; en su diseño se permite cierta capacidad de deformación inelástica de sus miembros estructurales, con el fin de que la energía cinética introducida al sistema estructural por un movimiento sísmico se disipe por medio del trabajo inelástico que desarrollan sus componentes estructurales sin que se presenten potenciales mecanismos de falla. La experiencia obtenida en diversos terremotos ha demostrado que estos sistemas estructurales, cuando están bien concebidos estructuralmente y en las etapas de planeación, diseño y construcción se cumple con los estrictos requerimientos y las

especificaciones de diseño aplicables, tienen la capacidad para desarrollar un comportamiento estructural adecuado, es decir disipar energía por deformaciones inelásticas sin colapsarse. Esta modalidad convencional en el diseño de estructuras sismoresistentes, aunque está correctamente fundamentada en el comportamiento inelástico de las estructuras, tiene la gran inconveniencia de que la estructura sufre daños estructurales al incursionar en el rango inelástico y en múltiples ocasiones el deterioro estructural puede ser muy grave e irreversible, motivando a reparar secciones completas, a implementar sistemas de refuerzo, o en el peor de los casos a demoler la estructura completa. Los efectos y daños catastróficos inducidos por los movimientos sísmicos de gran magnitud que han ocurrido en diversas partes del mundo durante los últimos años, manifiestan y ponen en evidencia las incertidumbres de predecir el nivel de daño de los sistemas estructurales y la capacidad que tendrán éstos para disipar los altos niveles de energía cinética.

Indudablemente el movimiento sísmico ocurrido el 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México ha sido un evento de gran trascendencia; en él, se registraron aceleraciones del terreno muy superiores a las de los sismos anteriores y en consecuencia las sollicitaciones y esfuerzos inducidos en muchas edificaciones resultaron muy significativos, dichas sollicitaciones resultaron muy superiores a las fuerzas de diseño que se estimaban para el diseño sísmico de ellas, según lo establecía el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y las Normas de diseño sísmico vigentes en aquel entonces. La réplica más importante del sismo sucedió al día siguiente por la noche y provocó que muchas estructuras ya dañadas y resentidas por el sismo previo se colapsaran. Principalmente en la zona céntrica del Distrito Federal (que es parte de la Zona Lacustre), la destrucción fue de consecuencias devastadoras, el escenario de edificios y estructuras que se colapsaron fue deplorable e indeseable, en múltiples edificaciones los deterioros estructurales fueron graves e irreversibles; surgió entonces la necesidad de modificar y actualizar el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas de diseño sísmico. Por una parte, los coeficientes de diseño sísmico de las zonas sísmicas II y III aumentaron en las Normas de Emergencia emitidas en 1985, el coeficiente de la zona sísmica II se incrementó ligeramente en el siguiente reglamento de 1987, mientras que el coeficiente de diseño sísmico en la zona III se ha conservado hasta el reglamento de 1993 actualmente vigente; el límite de

desplazamientos laterales fue disminuido; adicionalmente los requerimientos para la selección del factor de comportamiento sísmico se volvieron más restrictivos y exigentes; por consiguiente se innovaron y emplearon sistemas de refuerzo en un gran número de estructuras dañadas por los temblores con el fin de que cumplieran con las nuevas disposiciones reglamentarias, otros inmuebles tuvieron que demolerse debido a su estado irreversible de daños estructurales.

En virtud de lo explicado anteriormente, en México y en otros países del mundo ha despertado gran interés el estudio de sistemas especiales reductores de respuesta sísmica, dentro de la clasificación de estos sistemas especiales destacan los disipadores de energía sísmica. Con la finalidad de incrementar la capacidad de disipación de energía de las estructuras y no depender única y exclusivamente del comportamiento inelástico de los elementos estructurales, se han intensificado estudios de carácter experimental y analítico de estructuras equipadas con dispositivos disipadores de energía. La intención esencial consiste en que los dispositivos instalados se activen de manera peculiar al actuar un movimiento sísmico y disipen la energía inducida por el temblor por medio de su trabajo inelástico, con la finalidad de neutralizar o reducir el daño estructural en los elementos estructurales. Actualmente se han desarrollado varios sistemas de disipación de energía, en los estudios particulares de cada dispositivo disipador ante temblores específicos y al estar incorporados en las estructuras, se pretende encontrar el funcionamiento estructural óptimo de los elementos disipadores, de tal manera que disminuyan los daños estructurales y contrarresten los efectos de las excitaciones sísmicas.

El objetivo primordial de este trabajo consiste en analizar la efectividad estructural de los dispositivos disipadores de energía sísmica tipo TADAS al ser incorporados en dos de tres marcos de acero estructural A-36 de 20 niveles, los cuales tienen idénticas características dinámicas, cada sistema estructural es parte integrante de un edificio tridimensional que se supondrá ubicado en la zona sísmica III (Zona Lacustre) de la Ciudad de México. Adicionalmente se estudiará la influencia de los dos arreglos espaciales diferentes de disipadores TADAS que se emplearán para el diseño de los marcos equipados con disipadores TADAS. Los tres sistemas estructurales serán sometidos a un análisis dinámico paso a paso ante la excitación

dinámica que corresponde a la componente este-oeste del registro de aceleraciones obtenido en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes durante el movimiento sísmico del 19 de septiembre de 1985 (SCT-EW85), se efectuará un análisis comparativo de la respuesta sísmica obtenida (elementos mecánicos, desplazamientos laterales y rotaciones de las articulaciones plásticas) con el fin de seleccionar el sistema estructural con el mejor comportamiento estructural. Para diseñar los marcos equipados con disipadores de energía TADAS se aplicará un método de diseño para estructuras provistas con dispositivos especiales de disipación, el cual fue aplicado inicialmente en estructuras de concreto y está basado en diseñar convencionalmente la estructura de acero. Esencialmente en el diseño de las dos estructuras de acero equipadas con disipadores, la expectativa radica en que éstas disipen la mayor parte de la energía cinética que le es suministrada por un movimiento sísmico severo, por medio del amortiguamiento histerético que logren suministrar los dispositivos disipadores TADAS y parte a través del trabajo inelástico que desarrollen los elementos estructurales, obviamente es deseable que los miembros estructurales no incurrieren en el rango inelástico y en consecuencia no sufran ningún deterioro estructural.

1 CONCEPTOS GENERALES

1.1 ANTECEDENTES

En el procedimiento de diseño sísmico para el cálculo de estructuras que integran edificios sometidos a acciones sísmicas establecido por las especificaciones de diseño de la normatividad sísmica y por los métodos de análisis de los reglamentos vigentes, se manifiesta que los sistemas estructurales deberán ser capaces de resistir los efectos y esfuerzos inducidos por acciones dinámicas severas desarrollando un comportamiento plenamente dúctil, evitando en lo posible el colapso parcial o total de la estructura, esta disposición está reflejada a través del factor de comportamiento sísmico. Si se adopta en el diseño un factor de comportamiento sísmico alto las condiciones y requerimientos de diseño que se deberán cumplir se vuelven restrictivos y muy exigentes. Desde este punto de vista, es posible aprovechar la ductilidad que poseen los sistemas

estructurales de tal manera que la energía sísmica que les induce un evento sísmico sea disipada a través de las deformaciones inelásticas que son capaces de desarrollar los elementos estructurales adecuadamente diseñados, de tal manera que no se provoquen deterioros estructurales que pudiesen ser irreversibles.

La condición de daños provoca tener que efectuar una revisión desde el punto de vista estructural con el fin de mantener en condiciones de funcionamiento a la construcción y en función de dicha revisión debe tomarse una solución que sea viable económica y estructuralmente. Dependiendo del nivel y magnitud de daños de la estructura se procede a analizar y valorar lo siguiente:

- 1) La factibilidad de un sistema de refuerzo. En la evaluación de los daños estructurales se revisa si el deterioro estructural es generalizado y significativo o si únicamente se localiza en algunos miembros con el fin de implementar un sistema de refuerzo para la estructura dañada, sin excluir un estudio de interferencia en las actividades cotidianas producto de la ocupación y el funcionamiento de la edificación.
- 2) La reestructuración completa de la edificación. Si existen daños estructurales que sean graves e importantes, se tendría que considerar la reestructuración total de la edificación, esta decisión implica que se debe tener muy presente la influencia decisiva de los costos de reparación, la importancia y uso de la edificación, así como el período de tiempo en el que estaría inhabilitado el inmueble.
- 3) La demolición completa de la construcción. Si en la revisión estructural se dictamina que los daños estructurales se presentan globalmente en una condición delicada e irreversible, es altamente probable decidir la demolición total del inmueble, sin embargo esta determinación resultaría indeseable ya que en circunstancias extremas y especiales, las pérdidas económicas serían cuantiosas.

Resulta evidente que el nivel y magnitud de daños estructurales generados en una estructura por la acción de una eventualidad sísmica trascendente influye directamente en los costos de reparación de la edificación.

Con la finalidad de reducir la respuesta sísmica y minimizar los daños producidos al sistema estructural por eventos sísmicos severos, se han desarrollado elementos reductores de respuesta sísmica que se incorporan a las estructuras para modificar sus propiedades dinámicas e incrementar la capacidad de disipación de energía del sistema estructural. Estos sistemas especiales se instalan en las estructuras de edificios y actúan como un sistema disipador de energía en los instantes en que la edificación es sometida a altos niveles de esfuerzos inducidos por una excitación dinámica. Los dispositivos de disipación de energía se diseñan intentando que logren desarrollar trabajo inelástico con el fin de disminuir la respuesta dinámica de la estructura y minimizar o eliminar el daño estructural.

Actualmente se realizan en varios países del mundo (entre otros se puede mencionar a Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda y México) una serie de estudios de carácter experimental y analítico enfocados exclusivamente a suministrarle a las estructuras sismoresistentes, dispositivos reductores de respuesta sísmica. La clasificación y tipo de los dispositivos está en función de la forma en que trabajan. Así pues se clasifican en: dispositivos de control activo y dispositivos de control pasivo.

1.1.1 DISPOSITIVOS DE CONTROL ACTIVO

El control activo está basado en el principio de eliminar las vibraciones de la estructura mediante la aplicación de fuerzas externas. El movimiento se detecta por medio de sensores localizados previamente en varios puntos de la estructura, los cuales valúan en forma simultánea la respuesta de la estructura y las características de la excitación externa. Los sensores se conectan

a una computadora de control la cual emite una señal a los actuadores que aplican fuerzas a la estructura con el fin de contrarrestar el movimiento.

Dentro de los dispositivos de control activo se destacan los siguientes:

- A) Dispositivos de masa activa.
- B) Dispositivos de tendones activos.
- C) Dispositivos de fricción activa.

A) Masa activa

El movimiento de la masa sobre el último nivel de la estructura se controla por medio de una computadora instalada en el mismo nivel, que detecta el movimiento del edificio a través de sensores y envía a los actuadores una señal que provoca la aplicación de fuerzas externas a las masas para el control de los desplazamientos (Figura 1.1).

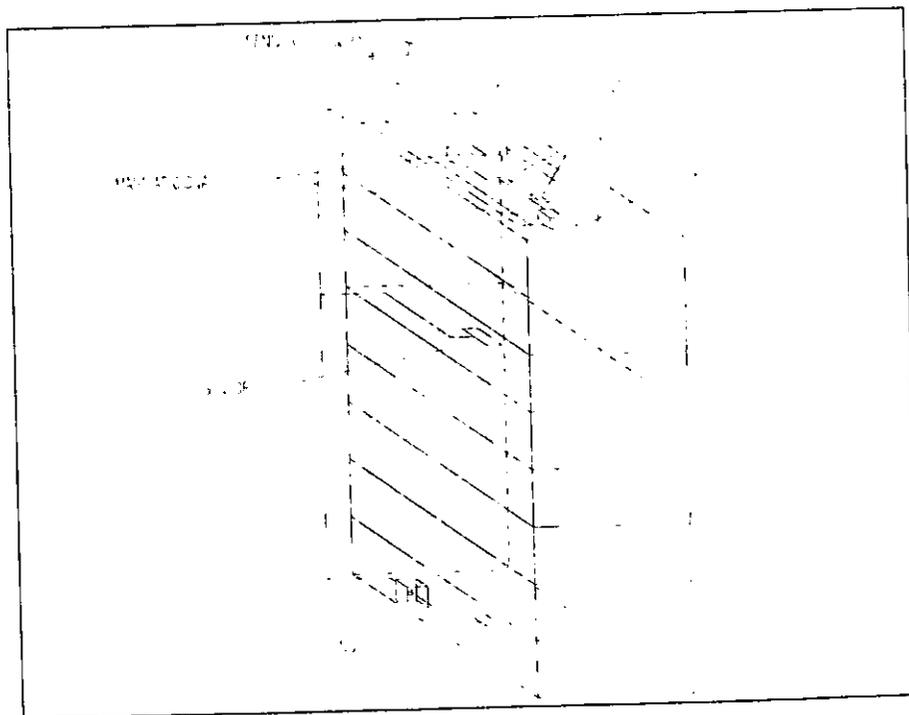


Figura 1.1 Sistema de masa activa.

B) Tendones activos

Los tendones son contravientos colocados diagonalmente en forma de **X** que se instalan de un entrepiso a otro de la estructura abarcando uno o varios niveles de la misma. Las fuerzas que se requiere aplicar a los tendones se obtienen de manera similar al sistema de la masa activa (Figura 1.2). Su función principal es modificar el período fundamental de vibración de la estructura para evitar que se encuentre cerca de la frecuencia dominante del temblor para cada instante del tiempo y así evitar el efecto de la resonancia.

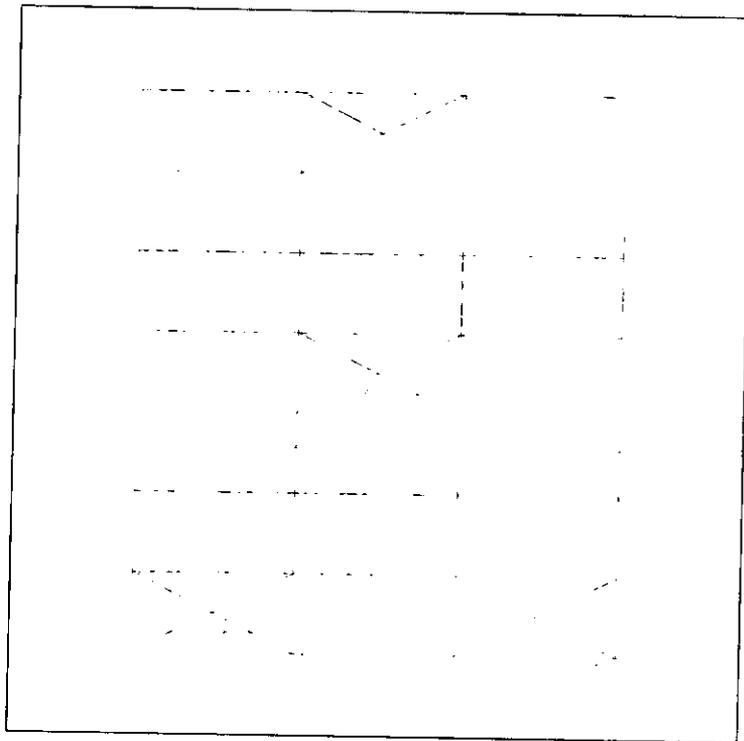


Figura 1.2 Sistema de tendones activos.

C) Dispositivos de fricción activa

Estos dispositivos disipan energía por fricción y trabajan en forma semejante al dispositivo de fricción de control pasivo de Pall (1982), con la salvedad de que aquellos son

controlados por medio de una computadora. El sistema es capaz de controlar la fuerza máxima de deslizamiento de los dispositivos en condiciones de servicio y en condiciones últimas.

1.1.2 DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO

Estos dispositivos responden de manera propia al movimiento de la estructura, sin ayuda de agentes o dispositivos mecánicos externos. En la actualidad los dispositivos de control pasivo que se han desarrollado son los siguientes:

- A) Disipadores de energía.
- B) Aisladores de base.
- C) Osciladores resonantes.

A) Disipadores de energía

Los disipadores de energía son dispositivos que se colocan en la superestructura, su objetivo es concentrar en ellos la mayor parte de la disipación de energía y tienen como finalidad disminuir o eliminar el daño en los miembros estructurales. Su funcionamiento se basa en el comportamiento histerético de sus elementos componentes y depende de los desplazamientos relativos de entrepiso. Asimismo se agrupan en función de la manera en que disipan energía en los siguientes tipos:

- Dispositivos basados en la deformación plástica de metales.
- Dispositivos de disipación por extrusión.
- Dispositivos de disipación por fricción.
- Dispositivos de materiales con comportamiento viscoelástico.
- Dispositivos de materiales con comportamiento viscoso.
- Combinaciones de los dispositivos anteriores.

- **Disipadores basados en la deformación plástica de metales**

La relación fuerza-deformación de estos dispositivos se idealiza como bilineal. La disipación de energía es igual al área dentro de la curva de histéresis y se presenta cuando el material que constituye al dispositivo tal como el acero, el plomo, algunas aleaciones, etc., supera su propio esfuerzo de fluencia al ser sometido a un estado de esfuerzos. La disipación de energía puede ser generada por: deformaciones a flexión, deformaciones por fuerzas axiales de compresión o tensión, rolado por flexión, deformaciones por torsión, etc.

Existe una gran variedad de dispositivos que se comportan por deformación plástica de metales, dentro de este grupo sobresale el denominado **ADAS (Added Damping and Stiffness Elements)**. Este dispositivo está compuesto por una serie de placas de acero empotradas en sus extremos con sección transversal en forma de **X** (Figura 1.3). Al desplazarse un nivel de la estructura respecto al otro, las placas se deforman por flexión en curvatura doble, y debido a la variación de su sección transversal se genera un diagrama de esfuerzos uniforme en todo el peralte de las placas que cambia de signo en el eje neutro. Esto provoca que el esfuerzo de fluencia se alcance prácticamente en todo el volumen de la placa. Las pruebas experimentales realizadas a los dispositivos con más de cien ciclos de carga y descarga demuestran que su comportamiento es muy estable sin degradación de rigidez (Whittaker *et al.*, 1989). Estos dispositivos se utilizaron como solución estructural para rigidizar y reforzar tres edificios localizados en la Ciudad de México dañados por los temblores de septiembre de 1985 (Martínez, 1993a y 1993b), cada uno de los tres edificios tenía diferentes características y distintos problemas estructurales. Los edificios que se reforzaron con elementos disipadores tipo ADAS son los siguientes:

- 1) Edificio de la calle de Izazaga No. 38-40.
- 2) Edificio del Hospital de Cardiología, el cual forma parte del complejo de hospitales Centro Médico Siglo XXI.

3) Edificio de las oficinas centrales del Instituto Mexicano del Seguro Social ubicado en Paseo de la Reforma No. 476.

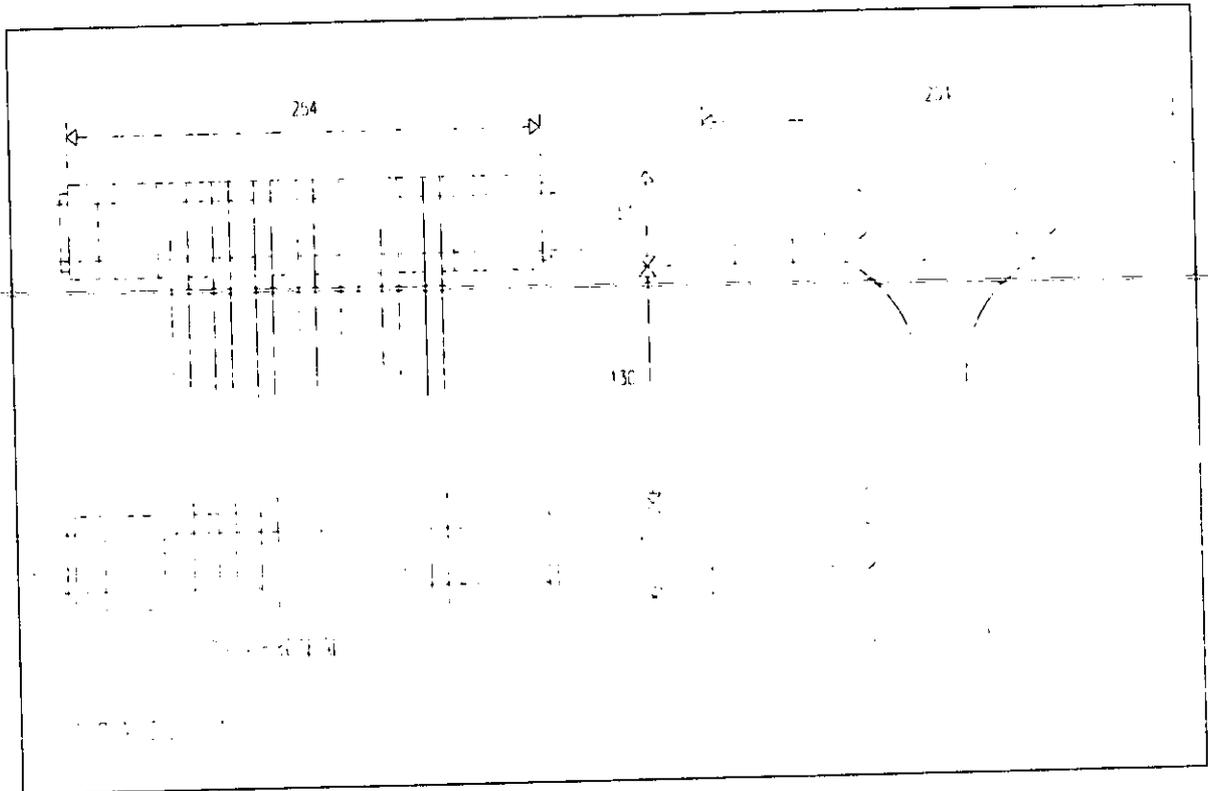


Figura 1.3 Dispositivo disipador ADAS.

Dentro de la gama de dispositivos que se comportan por deformación plástica de metales, también se encuentra el dispositivo denominado **TADAS** (Triangular Plate Added Damping And Stiffness Elements, Tsai, 1992), este sistema está compuesto por una serie de placas triangulares de acero que se plastifican por deformaciones a flexión (Figura 1.4). En este sistema de disipación las placas se conectan a un par de diagonales de contraventeo, en el extremo superior las placas se conectan apropiadamente a la trabe superior del entrepiso y en el vértice inferior se conectan a las dos diagonales de acero (el extremo opuesto de estos elementos se conecta desde el nivel inferior del entrepiso), por medio de un elemento de transición, en este elemento se alojan unos agujeros ovalados para insertar los conectores que permiten conformar una conexión

articulada. Por efecto de la acción de una fuerza lateral y debido a sus dos conexiones de extremo, las placas triangulares de acero trabajan únicamente a flexión en curvatura simple.

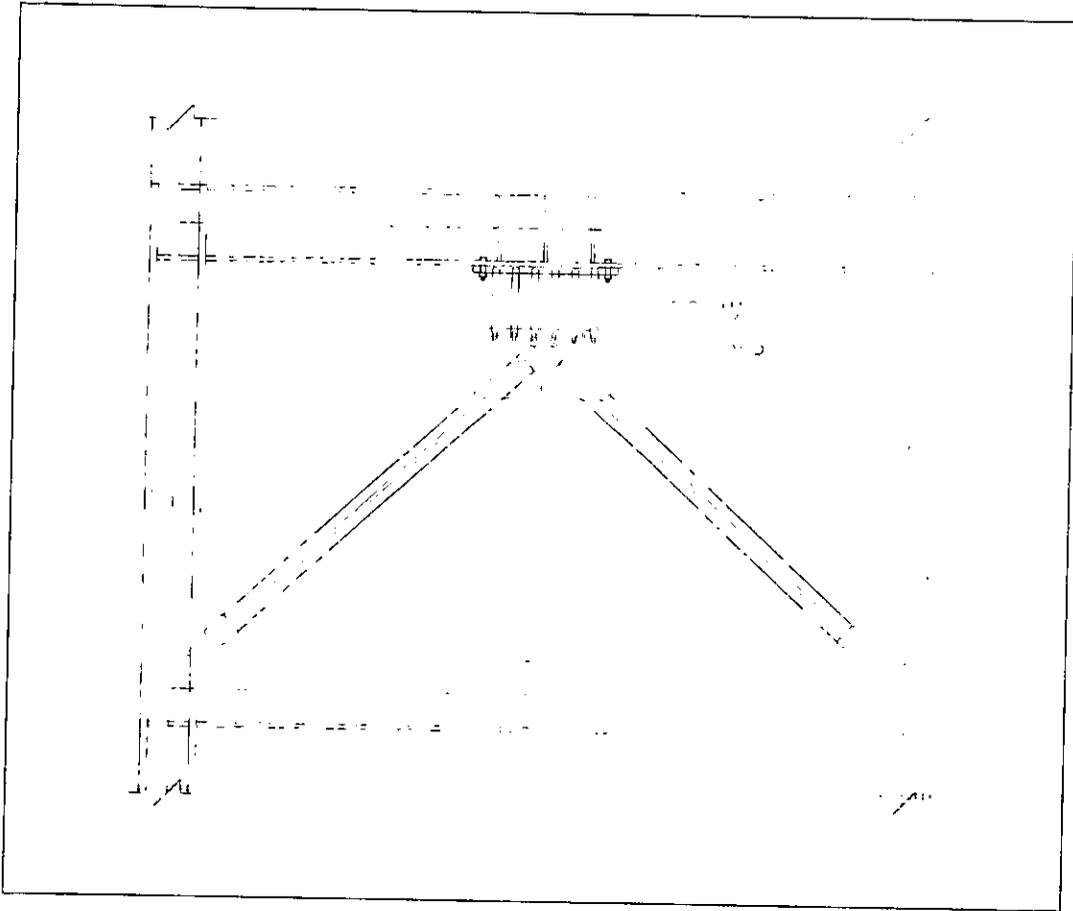


Figura 1.4 Sistema de disipación tipo TADAS.

En esta categoría de dispositivos, también se incluye a un disipador que opera bajo el concepto rolado por flexión, el dispositivo consiste en una placa (solera) en forma de U (Figura 1.5), los elementos disipadores se ubican en diagonales de contraventeo, la parte central de estos dispositivos se conecta al nivel superior de la estructura y los extremos al nivel inmediato inferior (Aguirre y Sánchez, 1989 y 1990). En el momento de producirse los desplazamientos de la estructura, se inicia un mecanismo en el cual una de las caras de la placa se desliza respecto de la otra en forma similar al movimiento de las orugas de un tractor, es decir se genera el rolado por flexión y la placa alcanza a plastificarse en toda la sección, de esta forma se disipa energía. Este

elemento disipador ha sido estudiado analítica y experimentalmente, los resultados obtenidos muestran que su comportamiento histerético es estable sin sufrir degradación de rigidez ni de resistencia.

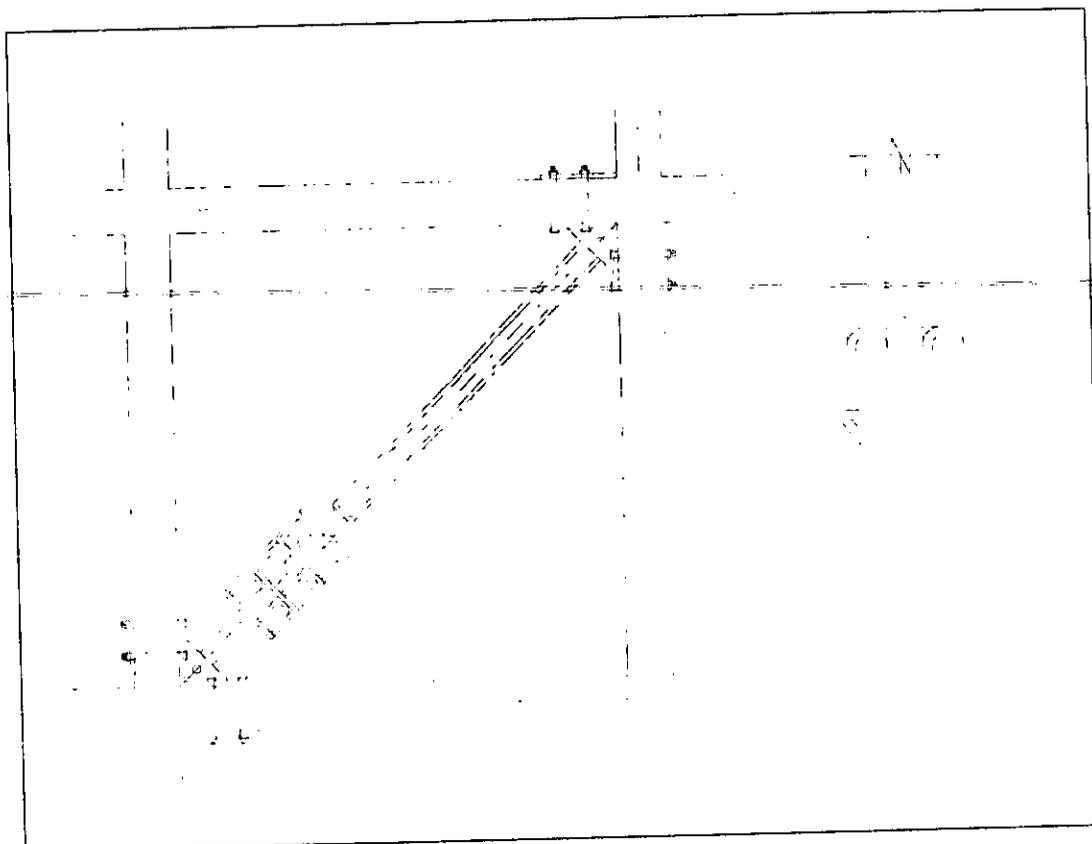


Figura 1.5 Dispositivo de disipación tipo U (rolado por flexión).

- **Dispositivos de disipación por extrusión**

En estos sistemas la disipación se logra al deformar un material en su sección transversal, esto ocurre cuando se mueve el material disipador dentro de un tubo de sección variable. El dispositivo está formado por un tubo de acero con plomo en su interior, el sistema fue propuesto inicialmente por Robinson y Greenbank (1975). Al deformarse el plomo se disipa energía y al recuperar su sección original se recristaliza y recupera sus propiedades iniciales.

- **Dispositivos de disipación por fricción**

En la Figura 1.6 se muestra el dispositivo desarrollado por Pall y Marsh (1982), que consiste en instalar una especie de balata de freno en la intersección de los contravientos en forma de cruz, de manera que cuando la estructura se desplace lateralmente se produzcan esfuerzos de fricción por el movimiento relativo entre las placas.

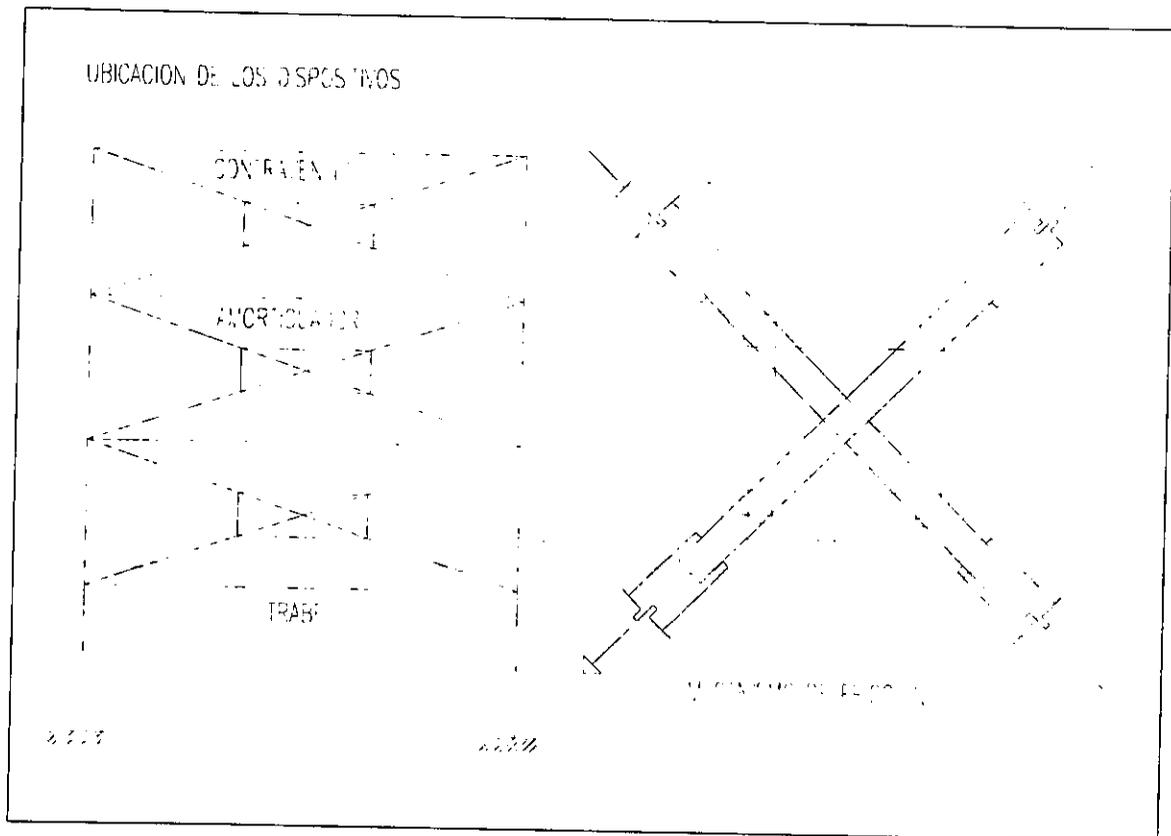


Figura 1.6 Disipador de energía por fricción.

- **Dispositivos de materiales con comportamiento viscoelástico**

Los disipadores de este tipo se colocan de forma similar a los de fricción, pero su comportamiento es el correspondiente a materiales viscoelásticos. Se han estudiado experimentalmente marcos con la incorporación de dispositivos como el de la Figura 1.7 (Hanson

et al., 1993), los resultados muestran un gran incremento del amortiguamiento y reducciones importantes de la respuesta. Sin embargo, el comportamiento dinámico de estos dispositivos depende fuertemente de la temperatura y de la frecuencia de vibración, por lo que debe ponerse una atención muy especial en su evaluación.

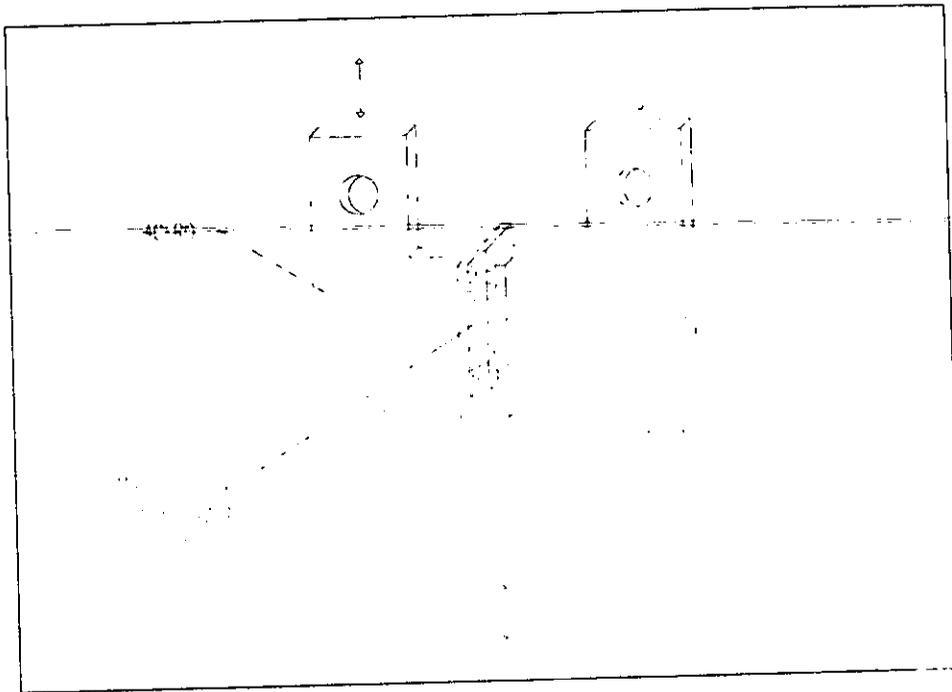


Figura 1.7 Disipador con comportamiento viscoelástico.

B) Aisladores de base

Este sistema de aislamiento consiste fundamentalmente en flexibilizar lateralmente la base de la estructura e incrementar el período fundamental de la estructura, mediante la instalación de soportes flexibles entre la cimentación y la superestructura, la finalidad de este tipo de dispositivo es la de provocar el desacoplamiento de las características dinámicas de la estructura y las del suelo que la soporta.

Existen diferentes tipos de sistemas de aislamiento, entre ellos destacan los aisladores formados por caucho, estos elementos aisladores están constituidos por placas de hule elástico resistente (caucho sintético), en cuyo interior se insertan en forma alternada una serie de placas de acero, el sistema es flexible horizontalmente pero tiene gran rigidez vertical. Se han desarrollado algunos dispositivos que tienen un corazón de plomo o aleaciones de otros metales con el fin de que disipen energía cuando se alcance la fluencia por cortante (Robinson y Tucker, 1977), al adicionar el corazón de plomo es notable el incremento de disipación de energía, en la Figura 1.8 se muestra este dispositivo aislador de base. Los aisladores de base se han aplicado en sitios en donde predomina la ocurrencia de temblores que tienen gran contenido de frecuencias altas, inicialmente se emplearon en Nueva Zelanda y se han utilizado ampliamente en construcciones de por lo menos 17 países (Hanson *et al.*, 1993), entre los que se encuentran Japón, Estados Unidos e Islandia.

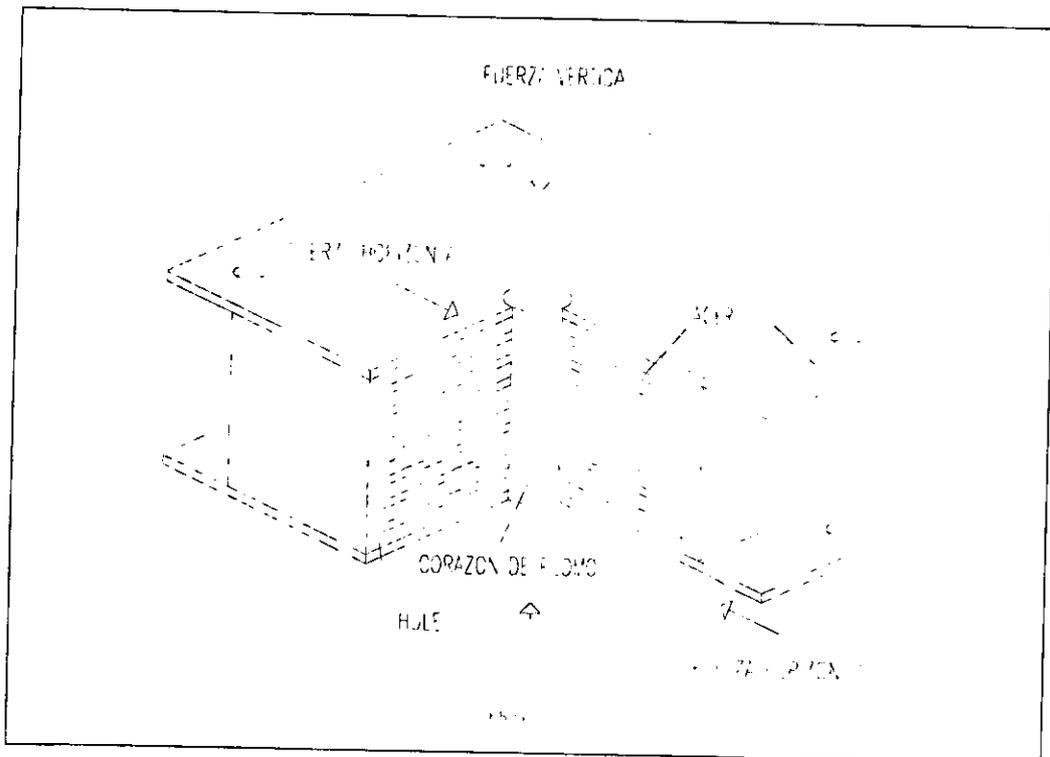


Figura 1.8 Aislador de base con corazón de plomo.

C) Osciladores resonantes

El sistema de los osciladores resonantes consiste en instalar en el último nivel de la estructura una o varias masas adicionales con propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento (Figura 1.9); generalmente la masa y amortiguamiento del piso adicional difiere considerablemente del resto de la estructura. En este sistema, ante la acción de fuerzas armónicas la masa del oscilador vibra, generando una fuerza igual en magnitud y de sentido opuesto a la fuerza de la excitación dinámica, de tal forma que la masa de la estructura no se mueva provocando que se modifiquen las propiedades dinámicas de la estructura original, de esta forma se reduce en forma importante la respuesta sísmica de la misma (Suárez *et al.*, 1993).

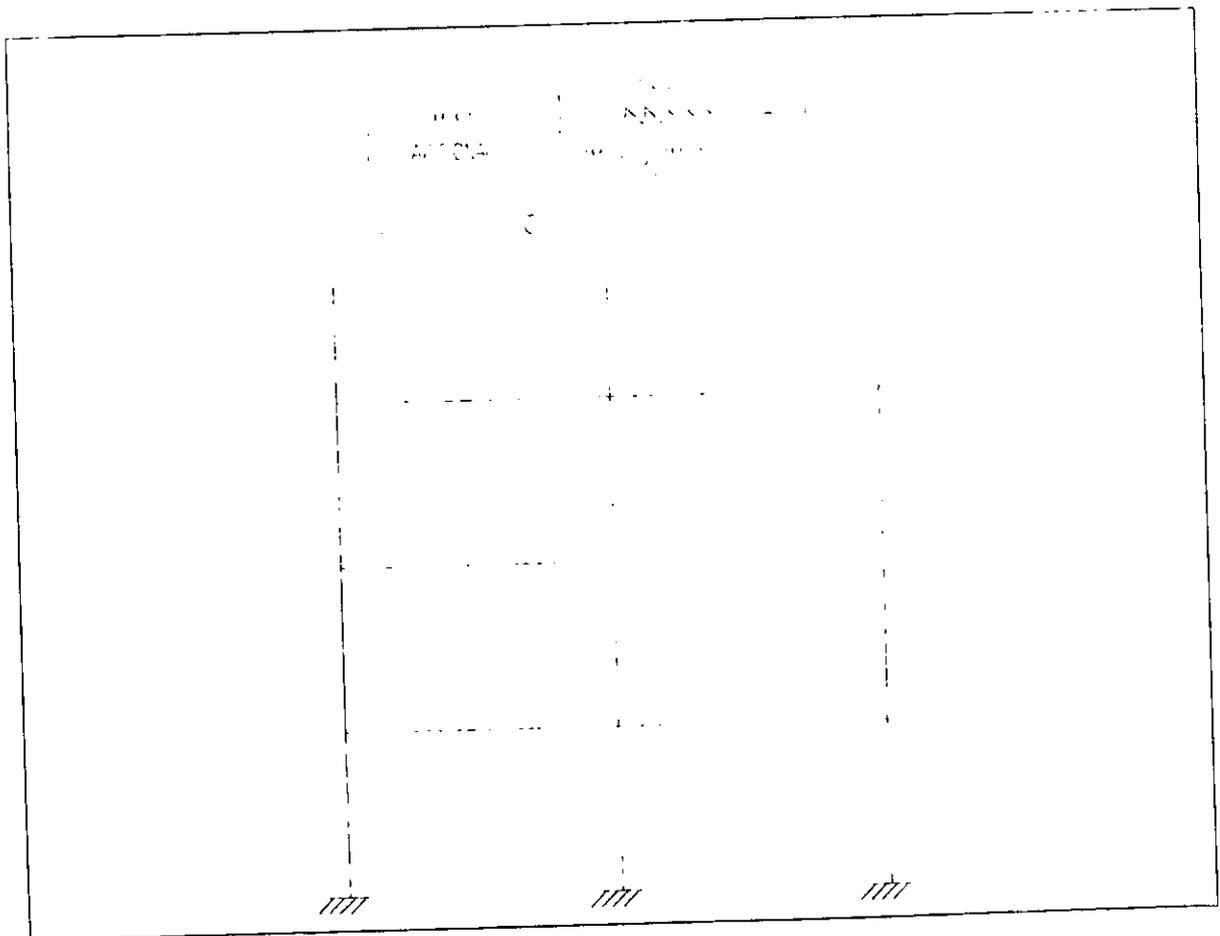


Figura 1.9 Oscilador de masa resonante.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES

Los objetivos de esta tesis son:

- A) Analizar la eficiencia estructural de los dispositivos disipadores de energía sísmica instalados en estructuras de acero, de período largo y en condiciones de resonancia.
- B) Estudiar la influencia de los arreglos espaciales de disipadores que se emplean en esta tesis.

Con el fin de cumplir con los objetivos anteriores, se diseñan en esta tesis dos marcos de acero estructural: el primero en forma convencional y el segundo equipado con dispositivos disipadores de energía sísmica. El dispositivo disipador de energía sísmica seleccionado es el **TADAS**, el cual es un dispositivo de control pasivo basado en la deformación plástica del metal que lo conforma. Se estudian dos arreglos espaciales diferentes de disipadores. Cada marco estructural a diseñar es parte integrante de un edificio tridimensional de 20 niveles de acero estructural cuya especificación y tipo es ASTM A-36. Ambos marcos se supondrán ubicados en la zona sísmica III del Distrito Federal.

Para efectuar el diseño por sismo de los marcos, se siguen las disposiciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 1993, así como los lineamientos que establecen las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo 1995.

Se intentará que los marcos posean las mismas características dinámicas con el objeto de analizar y comparar su respuesta estructural ante una excitación dinámica característica de la zona sísmica donde se supone que estarán ubicados. Se ha seleccionado la componente este-oeste del registro de aceleraciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del movimiento sísmico del 19 de septiembre de 1985.

CONCEPTOS GENERALES

Para los fines de esta tesis se hacen las siguientes consideraciones:

- a) No se contempla el diseño por cortante de los elementos estructurales.
- b) Las columnas se diseñan únicamente por flexocompresión uniaxial, las trabes sólo por flexión.
- c) Los marcos estructurales son estructuras continuas y las conectividades de los elementos trabe-columna se consideran conexiones rígidas a momento flexionante.
- d) En la etapa del diseño estructural no se tiene contemplado calcular y detallar las conexiones de los miembros estructurales.
- e) El sistema de piso consiste en una losa maciza de concreto reforzado y en la etapa de la modelación estructural se considera como un diafragma infinitamente rígido en su plano.
- f) En la modelación estructural de ambos marcos, también se considera que existe una zona rígida en ambos extremos de las trabes de acero en su intersección con las columnas.
- g) Dentro del proceso de análisis estructural de los marcos se considera que los elementos estructurales no sufren ningún tipo de degradación ya sea de rigidez o de resistencia.
- h) En el análisis sísmico se tiene contemplado únicamente el movimiento traslacional en una sola dirección. No se considera el efecto de las excentricidades accidentales de las fuerzas sísmicas y también se excluyen los efectos bidireccionales, es decir no se toma en cuenta la torsión que inducen las fuerzas sísmicas.

- i) Se descarta el efecto de la interacción suelo-estructura, es decir se desprecia la flexibilidad del suelo y se asume que los marcos están soportados en una base rígida, por lo tanto se considera un empotramiento perfecto en la base.

- j) También se excluye el incremento de rigidez por la participación de la losa de concreto en la interconexión con el patín superior de las traveses de acero, es decir, se forma una sección compuesta híbrida en la cual únicamente se considera el momento de inercia de la sección completa de acero.

- k) Se supone que se conoce con precisión el movimiento sísmico que se presenta en el sitio, que en este caso se trata del sismo SCT-EW85 mencionado anteriormente.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO DISIPADOR USADO

El dispositivo disipador seleccionado es el denominado **TADAS (Triangular Plate Added Damping And Stiffness Elements)**, el cual es un disipador de control pasivo basado en la deformación plástica a flexión de una serie de placas triangulares de acero (Figura 2.1). Se observa en la figura que las placas triangulares están insertadas y soldadas apropiadamente a una placa base ranurada de acero, la cual está soldada y atornillada al patín inferior de la trabe del nivel superior del entrepiso, debido a esto se considera que en este punto existe una conexión rígida a momento flexionante; en el extremo inferior de las placas, éstas se conectan a las diagonales de contraventeo por medio de un elemento de transición. Dentro de este elemento se aloja el vértice inferior de las placas triangulares, las cuales están perforadas para instalar un perno de acero que se inserta en un orificio ovalado, ésta conexión tan particular conforma una articulación con plena libertad a la rotación.

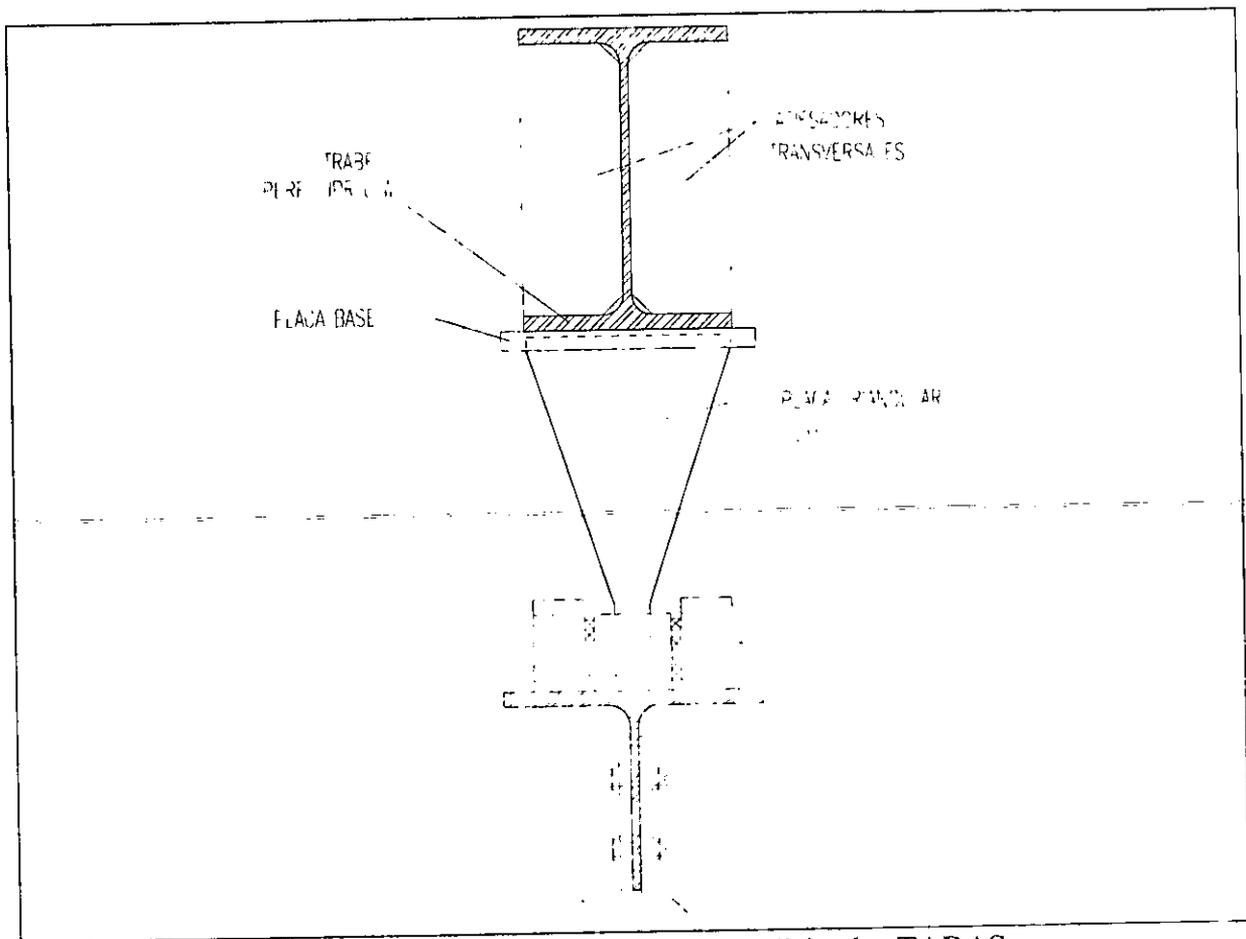


Figura 2.1 Vista lateral del dispositivo disipador TADAS.

Los dispositivos TADAS fueron estudiados experimental y analíticamente por Tsai *et al.*, (1993a), en la Universidad Nacional de Taiwan, Taipei Taiwan R. O. C. El trabajo mecánico del dispositivo disipador TADAS consiste en lo siguiente: en el momento de producirse un desplazamiento lateral por la acción de cargas laterales cada placa triangular de acero trabaja exclusivamente a flexión, las placas se deforman en curvatura simple sin concentración de curvatura en todo el peralte con una distribución uniforme de los esfuerzos, alcanzando la fluencia en todo el volumen de las placas, según los autores del estudio, ésta es la razón por la cual las placas tienen una forma triangular, ya que si las placas tuvieran una sección rectangular, se genera una concentración de esfuerzos en los extremos y la fluencia del material sólo se alcanzaría en el extremo superior de las placas.

Una característica muy atractiva del dispositivo es la conexión tan peculiar entre el disipador TADAS y las diagonales de contraventeo por medio de la instalación de los pernos insertados en orificios ovalados. El efecto de esta conexión consiste en que el dispositivo disipador puede desligarse de los efectos de las fuerzas de compresión debidas por ejemplo, a las cargas gravitacionales. Los desplazamientos verticales en el extremo de las placas son fácilmente distribuidos. En la Figura 2.2 se muestra el detalle de la conexión entre las placas triangulares de acero del sistema de disipación TADAS y las diagonales de contraventeo.

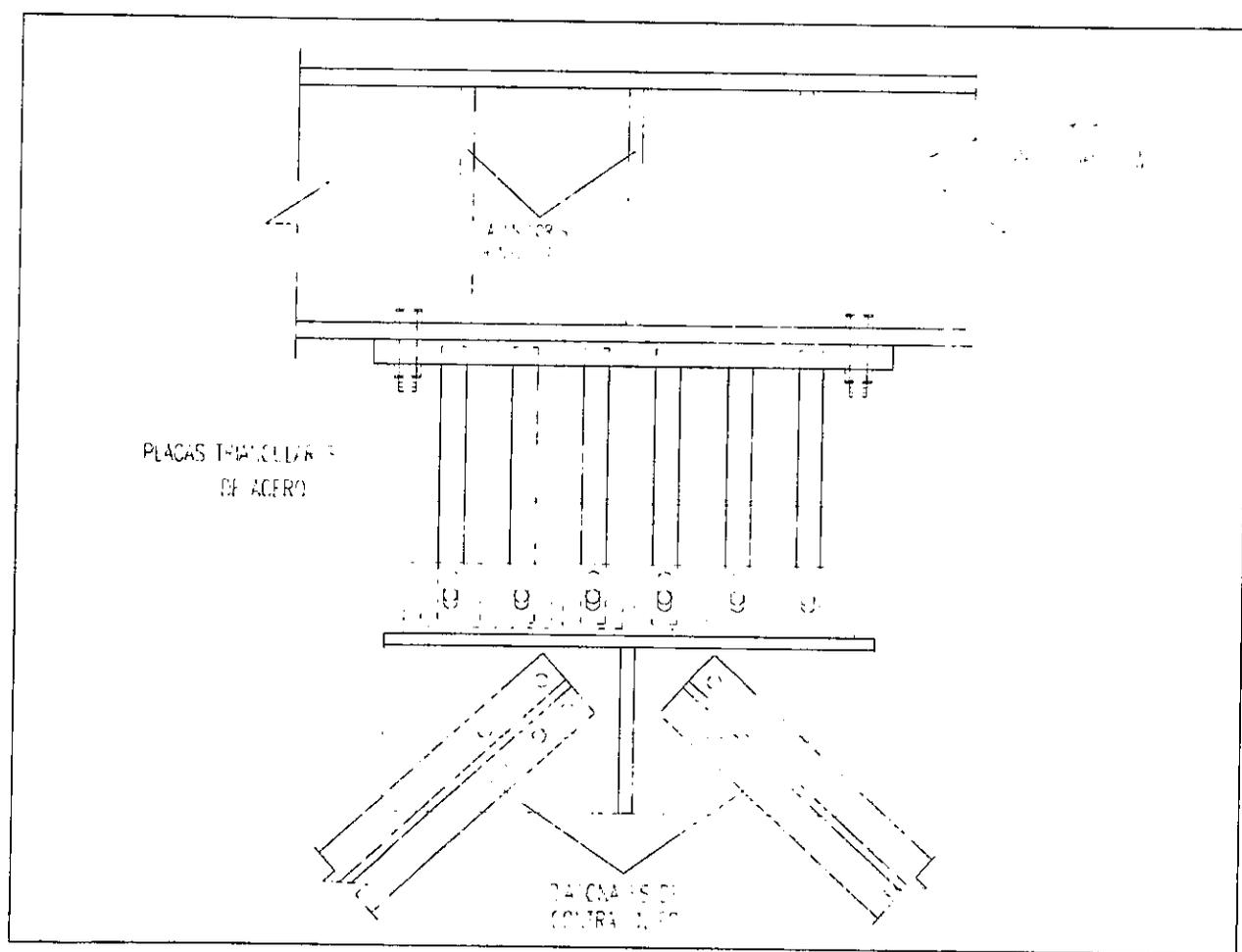


Figura 2.2 Detalle de conexión del dispositivo disipador TADAS.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según Tsai *et al.*, (1993c), los disipadores TADAS fueron incorporados en un marco estructural a escala natural de acero A-36 de dos niveles y una cruzía (Figura 2.3), se evaluó y comparó la respuesta experimental y analítica del marco sin los disipadores y del marco con el dispositivo incorporado, en el marco sin disipadores los períodos del primer y segundo modo de vibrar resultaron de 0.881 y 0.237 segundos respectivamente. En el marco equipado con el dispositivo TADAS, los períodos del primer y segundo modo resultaron ser de 0.573 y 0.201 segundos respectivamente. Se observó que la respuesta estructural del modelo de dos niveles ante las excitaciones dinámicas tan particulares que se le aplicaron en el estudio se reduce notablemente al incorporar los dispositivos.

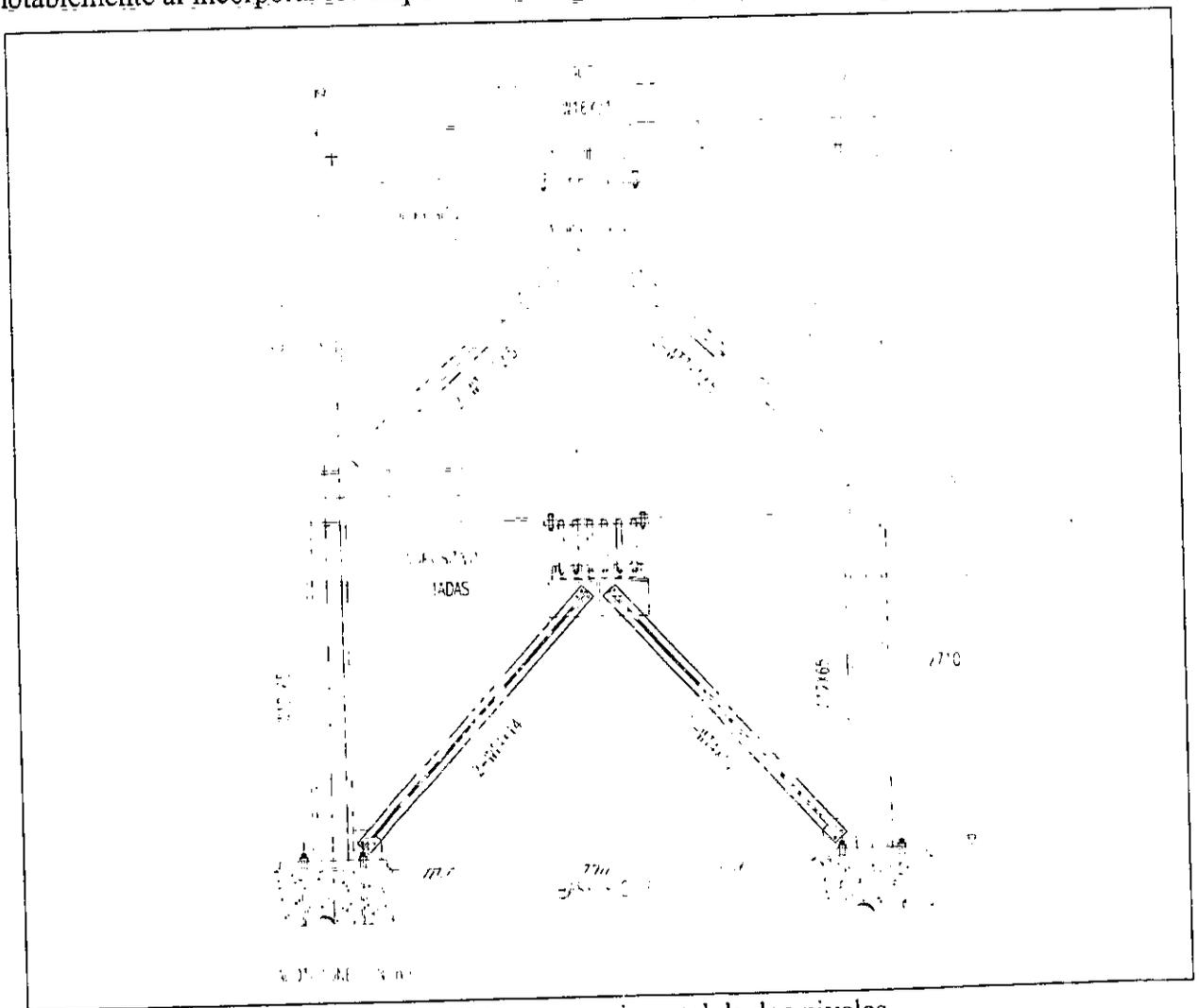


Figura 2.3 Marco experimental de dos niveles.

Los resultados obtenidos del estudio analítico del marco de prueba se aproximaron con buena precisión a la respuesta experimental obtenida del marco. El dispositivo TADAS cuando está adecuadamente combinado con las diagonales, puede ser diseñado para suministrar rigidez lateral adicional al marco estructural y proporcionar amortiguamiento histerético cuando la respuesta sísmica del marco es elevada (Tsai *et al.*, 1993c).

De acuerdo con los resultados que se obtuvieron del estudio experimental y analítico, la rigidez lateral del dispositivo TADAS se puede predecir con buena exactitud considerando sólo las deformaciones por flexión del disipador ya que la rigidez es altamente dependiente de las conexiones de extremo, en el estudio analítico se despreciaron las deformaciones por cortante del dispositivo y la deformación por flexión de la trabe superior.

Una característica trascendental se refiere a que las placas triangulares de acero apropiadamente soldadas pueden mantener un gran número de inversión de esfuerzos dentro del rango inelástico; en el estudio experimental el dispositivo TADAS fue sometido a cargas incrementadas cíclicamente y se observó que su comportamiento histerético es muy estable, el disipador TADAS es capaz de fluir en un sentido al igual que en el opuesto y no se observaron señales de degradación de rigidez o de resistencia.

Otro punto importante a favor del dispositivo TADAS consiste en que la capacidad de rotación de los disipadores es excelente, los ensayos experimentales del dispositivo TADAS revelaron que la capacidad rotacional es mayor que 0.25 radianes ante cargas incrementadas cíclicamente.

Todas las características del dispositivo TADAS mencionadas previamente resultan muy atractivas y motivaron a seleccionar este dispositivo para incorporarlo a un marco de acero de 20 niveles y de esta manera proceder a diseñar el marco con disipadores de energía sísmica. En México aún no se ha empleado el sistema disipador TADAS para reforzar y rigidizar edificios.

2.2 CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DEL MARCO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

Para llevar a cabo el análisis y diseño del marco de acero con disipadores de energía sísmica tipo TADAS se aplicará un procedimiento de diseño que está basado en el resultado del diseño convencional de un marco de acero.

Cada uno de los sistemas estructurales es parte integrante de un edificio tridimensional de acero estructural cuya especificación es A-36, simétrico en planta en sus dos direcciones ortogonales, de 20 niveles y tres crujías localizado en la Zona Sísmica III del Distrito Federal (Zona Lacustre).

Tanto el marco convencional como el marco con disipadores serán sometidos a una excitación dinámica en la base, deberán poseer las mismas propiedades dinámicas con el propósito de poder comparar y analizar las respuestas estructurales obtenidas de un análisis dinámico inelástico paso a paso, se supondrá que los marcos se desplantarán en un sitio de la Zona del Lago con período dominante de 2 segundos, por lo que se intentará diseñarlos para que tengan un período fundamental de vibración cercano al de ese sitio, con el fin de analizar su comportamiento en condiciones de resonancia. En la etapa del diseño de los dos marcos se tiene contemplado aplicar las disposiciones que señala el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 1993, así como los lineamientos de la Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas 1995.

El procedimiento de diseño del marco con disipadores de energía sísmica tipo TADAS contiene varias etapas. Para llevar a cabo este proceso de diseño se deberá continuar con una secuencia lógica para transformar el marco convencional en el marco con disipadores. Enseguida se describe este proceso:

1) Primeramente se diseña el marco o estructura convencional. Esta estructura es un marco "rígido" de acero estructural A-36, su estructuración esta integrada por columnas de sección transversal tipo cajón y traveses de perfil estructural tipo IPR o W, con conexiones "rígidas" a momento flexionante.

Este marco convencional deberá cumplir simultáneamente tres requisitos muy importantes para los fines de este trabajo:

- El primer requisito se refiere a que la rigidez lateral total de entrepiso K_T que aportan trabajando en conjunto las traveses y columnas debe ser adecuada de tal manera que los desplazamientos laterales de entrepiso calculados ante las fuerzas sísmicas de diseño sean menores que el límite de desplazamientos laterales de entrepiso que establece el R.C.D.F. 1993.
- El segundo requerimiento consiste en verificar que las traveses y columnas tengan la resistencia adecuada y suficiente ante los estados límite de falla que sean aplicables.
- El tercer requisito consiste en que la distribución de masas y rigideces laterales de entrepiso en toda la altura del marco deberá ser tal que el período fundamental de vibración de la estructura sea igual o por lo menos este muy próximo al período dominante de la zona donde se supone que estará desplantada la estructura.

Con el fin de cumplir con los requisitos anteriores será necesario efectuar una serie de múltiples iteraciones modificando las secciones de los miembros estructurales. El proceso descrito es un procedimiento de diseño convencional.

2) Se procede con el diseño del marco con disipadores de energía. Para llevarlo a cabo se deberá transformar el marco convencional. El marco con disipadores está formado por un marco de acero

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

estructural A-36 denominado "marco sin disipadores" más un sistema disipador. Los elementos estructurales que integran el marco sin disipadores son únicamente las traveses y columnas. Las secciones transversales de las traveses y columnas se obtienen, en este trabajo, a partir de la disminución de las secciones transversales de traveses y columnas del marco convencional, dicha disminución es función del porcentaje de rigidez lateral que aporta el marco sin disipadores respecto de la rigidez lateral total K_T . El complemento de la rigidez lateral faltante la aporta el sistema disipador. A continuación se establece la distribución espacial de los disipadores en la estructura y se adicionan al marco sin disipadores. Los disipadores se diseñan intentando que trabajen inelásticamente al actuar las acciones sísmicas, si logran incursionar en el rango inelástico, estos dispositivos disiparán energía.

El marco con disipadores también deberá cumplir con los tres requisitos señalados para el marco convencional, es decir con el límite de desplazamientos laterales de entrepiso, con secciones transversales adecuadas de los miembros estructurales para resistir los elementos mecánicos que resulten del análisis y finalmente con el período de vibración. De no cumplir con lo anterior ingresaremos en un proceso iterativo modificando las características geométricas de los disipadores hasta cumplir con lo establecido. En esta etapa el análisis estructural del marco con disipadores ante la acción de las solicitaciones de diseño correspondientes es elástico-lineal.

Adicionalmente, se tiene verificar que el período fundamental de vibración del marco con disipadores coincida con el período fundamental de vibración de la estructura convencional con la finalidad de poder analizar y comparar las respuestas estructurales de ambos diseños.

Finalmente se procederá a realizar un análisis dinámico paso a paso a ambos sistemas estructurales, es decir al marco convencional y al marco con disipadores. De la respuesta sísmica obtenida se analizará la efectividad estructural y la influencia de los dispositivos disipadores TADAS del marco con disipadores.

2.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

A continuación se definen algunos conceptos que se utilizan durante el desarrollo de este trabajo:

Marco (estructura) convencional: los elementos estructurales que componen la estructura convencional son traveses y columnas; la característica esencial de esta estructura es que el 100% de su rigidez (\mathbf{K}_T) y resistencia lateral (\mathbf{R}_T) es función exclusivamente de las propiedades geométricas y mecánicas que aportan las secciones transversales de traveses y columnas.

Marco (estructura) sin disipadores: este marco se obtiene, en esta tesis, al reducir las secciones transversales de traveses y columnas del marco convencional. Su rigidez (\mathbf{K}_{sd}) y resistencia lateral (\mathbf{R}_{sd}) es función únicamente de las propiedades geométricas y mecánicas de las secciones transversales reducidas de traveses y columnas.

Marco (estructura) con disipadores: esta estructura se integra por el marco anterior más los disipadores de energía. La rigidez lateral total de este marco está conformada por:

$$\mathbf{K}_T = \mathbf{K}_{sd} + \mathbf{K}_d$$

y la resistencia se puede expresar como:

$$\mathbf{R}_T = \mathbf{R}_{sd} + \mathbf{R}_d$$

donde (\mathbf{K}_d) y (\mathbf{R}_d) significan respectivamente, la rigidez y resistencia que aporta el sistema disipador.

En la Figura 2.4 se muestra gráfica y conceptualmente la descripción de la estructura con disipadores de energía.

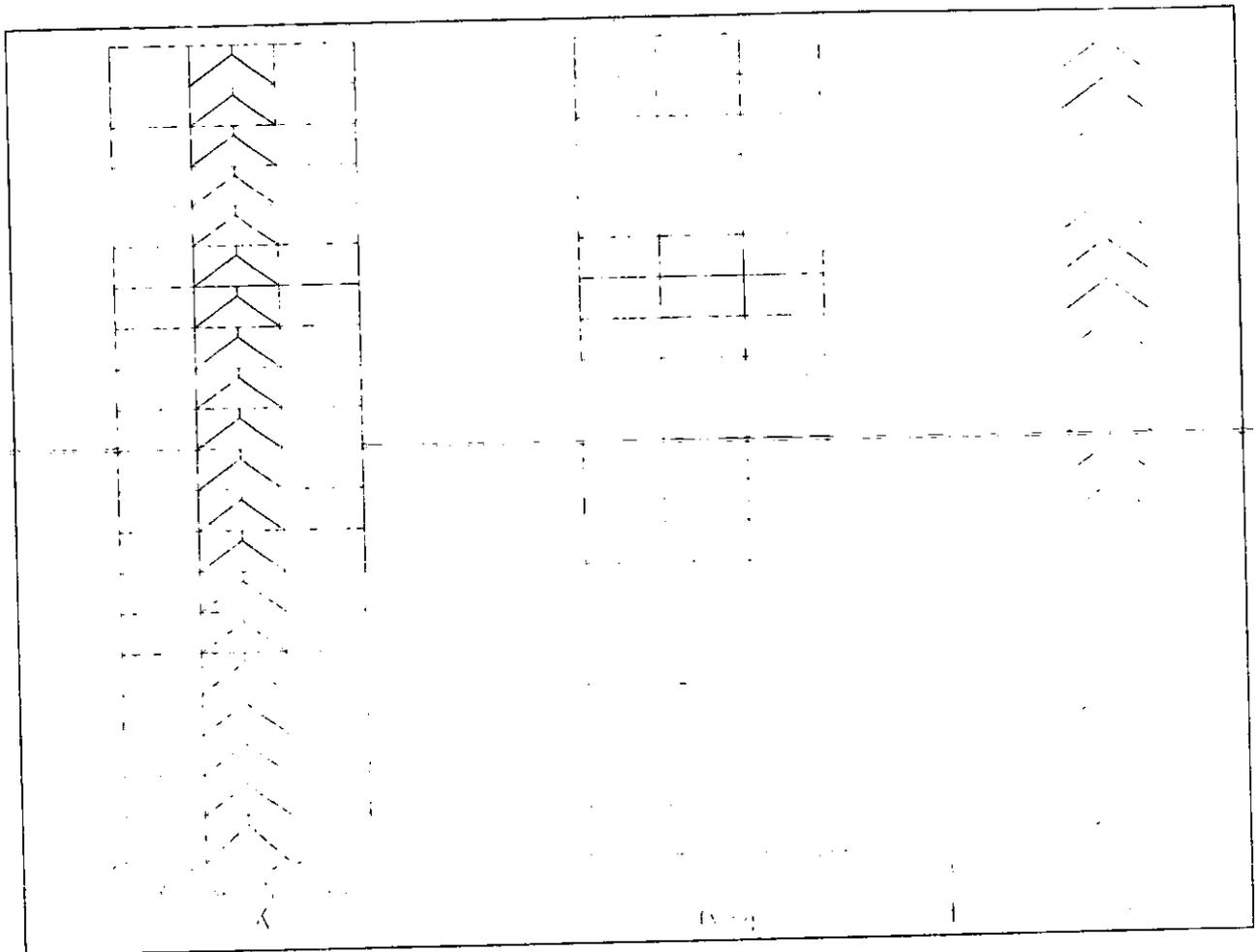


Figura 2.4 Descripción e integración conceptual del marco con disipadores.

Obsérvese que la rigidez lateral total del marco con disipadores es igual a la rigidez lateral total del marco convencional, puesto que se desea que ambos sistemas tengan el mismo período de vibración. De esta forma K_{sd} y K_d son porcentajes de la rigidez lateral K_T . El porcentaje de rigidez (α_1) que proporcionan los elementos estructurales de acero (trabes y columnas) que componen el marco sin disipadores se establece, en esta tesis, en 25% de la rigidez lateral total del marco convencional, mientras que el porcentaje de rigidez lateral (α_2) del sistema disipador será el 75% de la rigidez lateral del marco convencional. Los valores anteriores son cantidades que se han empleado en otros estudios de estructuras con disipadores (Silva, 1993; Urrego, 1994;

Ruiz, 1995), en este trabajo, dichos valores se conservan para darle un seguimiento a los mismos para fines comparativos.

Las expresiones siguientes establecen matemáticamente la relación entre los conceptos y términos mencionados previamente:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_T &= \mathbf{K}_{sd} + \mathbf{K}_d \\
 \mathbf{K}_T &= \alpha_1 \mathbf{K}_T + \alpha_2 \mathbf{K}_T \\
 \mathbf{K}_T &= 0.25\mathbf{K}_T + 0.75\mathbf{K}_T
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

En cuanto a los términos \mathbf{R}_{sd} y \mathbf{R}_d que son indicativos de la resistencia del marco con disipadores, los porcentajes que se definen para el marco sin disipadores (β_1) y para el sistema disipador (β_2) respecto de la resistencia del marco convencional pueden tener valores diferentes y no es necesario que sean idénticos a los porcentajes de rigidez \mathbf{K}_{sd} y \mathbf{K}_d mencionados previamente. Los porcentajes α_1 , α_2 , β_1 y β_2 que se establecen para el análisis y diseño de una estructura con disipadores de energía pueden tener una variación y dependen del comportamiento estructural que se estime en la estructura. La variación de estas cantidades es función de la respuesta estructural y de los costos totales de la estructura. Desde el punto de vista de la respuesta estructural los valores óptimos de α_1 y α_2 serán los que generen el mínimo daño estructural, es decir que la respuesta estructural sea completamente elástica tanto en las trabes como en las columnas y que la energía cinética introducida por una acción sísmica sea disipada por medio del trabajo inelástico de los disipadores. En lo referente a costos, los valores óptimos se pueden encontrar trazando curvas en las cuales se contemple tanto los costos iniciales \mathbf{C}_I más los costos de reparación \mathbf{C}_R . El costo total de la estructura se conforma por la suma de las dos cantidades anteriores.

2.4 MODELACIÓN ESTRUCTURAL

Un aspecto trascendente dentro de la etapa del análisis se refiere a modelar apropiadamente la estructura completa y cada uno de los miembros estructurales que la integran, ya que es necesario reproducir en un modelo matemático las acciones de diseño y el comportamiento estructural tanto en condiciones habituales de funcionamiento como en situaciones en las que la estructura estará sometida a acciones dinámicas, particularmente eventos sísmicos trascendentes que inducen un nivel muy significativo de esfuerzos y que ejercen una gran demanda de resistencia sísmica sobre las estructuras.

Para llevar a cabo la modelación estructural se recurre a la aplicación de alguno de los siguientes modelos: el modelo de cortante; el modelo de marcos planos, denominado también modelo esqueletal y el modelo de elementos finitos. A continuación se explican brevemente los dos primeros modelos.

• MODELO DE CORTANTE

La estructura real se modela como una serie de masas y barras (o resortes) conectadas entre sí, en donde las masas (m_i) dependen de los pesos en cada nivel de la estructura y las barras (o resortes) tienen la rigidez lateral K_i del entrepiso i (Figura 2.5).

El modelo de cortante se basa en las siguientes hipótesis:

- El sistema de piso y las trabes que se conectan al mismo tienen una rigidez infinita.
- Las columnas no sufren deformaciones axiales, es decir acortamientos y alargamientos.

De lo anterior se desprende que la rigidez de entrepiso es función únicamente de la rigidez lateral que aportan las columnas tal y como lo expresa la siguiente ecuación:

$$K_T = \frac{12}{H^3} \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (2.2)$$

donde K_T es la rigidez lateral del entrepiso en cuestión, n es el número de columnas en el entrepiso, E es el módulo de elasticidad del material de una columna, I_i es el momento de inercia de la sección transversal de una columna y H es la altura del entrepiso.

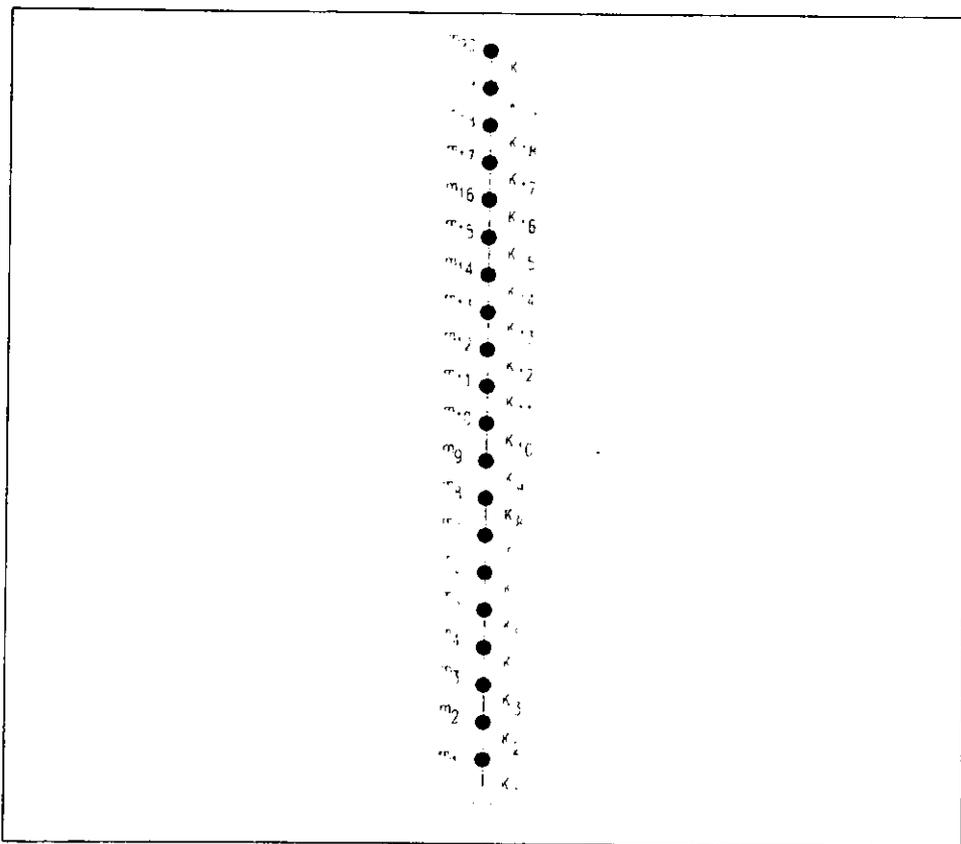


Figura 2.5 Modelo de corte de una estructura de 20 niveles.

Al aplicar el modelo de corte se obtiene una aproximación de las rigideces laterales totales de entrepiso (K_T) que debe tener la estructura, sin embargo la rigidez lateral calculada es sobrestimada debido a que los desplazamientos laterales son inferiores a los desplazamientos

horizontales que realmente se presentan, todo lo anterior es producto de las suposiciones en las que se basa el modelo.

Este modelo es muy útil para el predimensionamiento de las secciones de columnas de una estructura convencional, al usar este modelo fácilmente se puede desplegar una propuesta inicial de las dimensiones de los elementos (Silva, 1993); las secciones de las trabes se proponen sin tomar en cuenta el modelo, inicialmente se supone que son infinitamente rígidas, sin embargo se proponen apoyándose en la experiencia de diseños similares o en función del criterio del ingeniero calculista.

• **MODELO DE MARCOS PLANOS**

Este modelo (denominado también modelo de estructuras esqueléticas) se basa en el método de las rigideces y los elementos estructurales se representan por barras flexibles con rigidez finita (trabes y columnas) que se conectan por medio de nudos rígidos. El análisis que se realiza de la estructura es exclusivamente elástico-lineal, el modelo contempla las deformaciones axiales en columnas, deformaciones por flexión y cortante en todos los miembros que intervienen en la modelación estructural. Es posible analizar con mayor precisión el comportamiento estructural de un edificio ya que al considerar la flexibilidad de todos los miembros estructurales el modelo matemático se aproxima mejor al comportamiento de la estructura real (Figura 2.6).

Actualmente existe en el mercado una gran variedad de programas comerciales muy poderosos para aplicaciones en ingeniería civil, algunos programas de cómputo son especiales para realizar el análisis y diseño estructural de estructuras en dos o tres dimensiones, en dichos programas es factible la modelación estructural en forma relativamente sencilla de cualquier tipo de estructura por muy compleja que ésta sea. Si se utiliza uno de los programas comerciales, rápidamente se obtiene la información del análisis, los procesadores de los programas permiten

visualizar gráficamente elementos mecánicos, desplazamientos y deformaciones, envolventes, formas modales, se obtienen los períodos de vibración, etc.

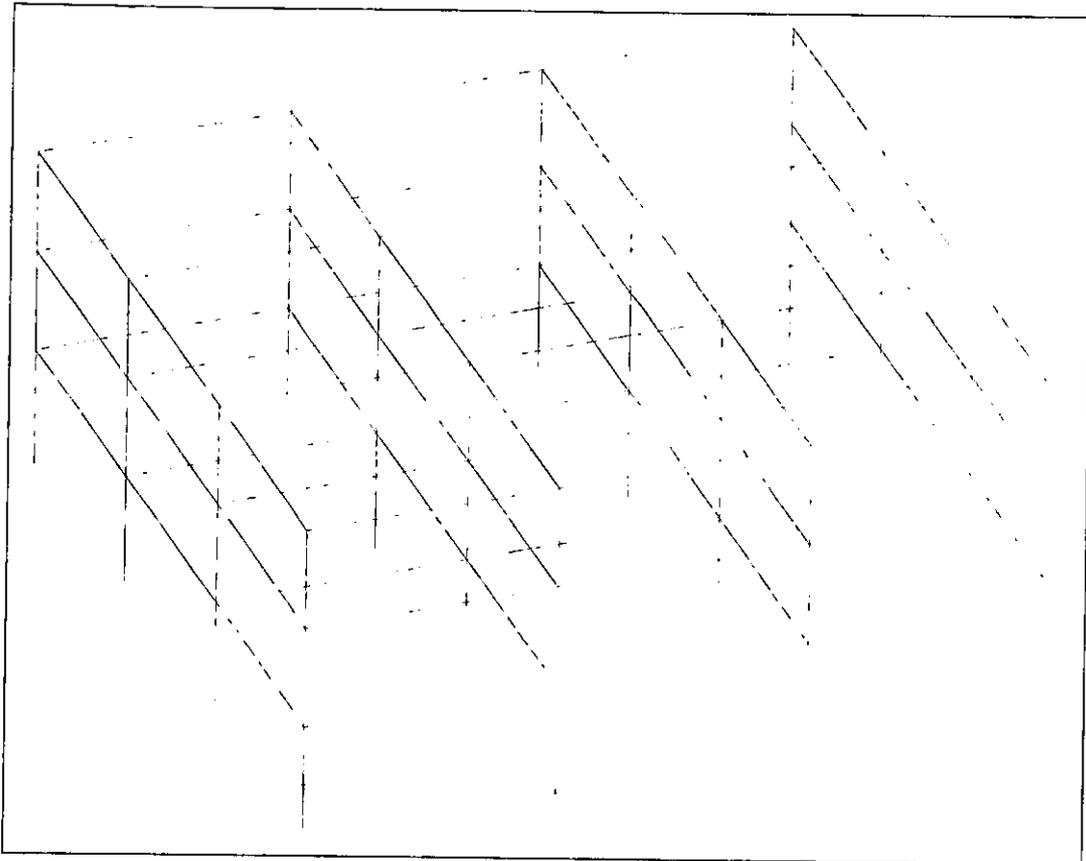


Figura 2.6 Modelo de marcos planos.

Para llevar a cabo el análisis elástico del marco convencional y del marco con disipadores es preferible la aplicación del modelo de marcos planos debido a lo siguiente:

- Se visualiza el panorama completo del comportamiento estructural de todos los elementos estructurales que intervienen en la modelación estructural, y
- Es fácil verificar las deformaciones inducidas por las acciones de diseño actuantes y proponer nuevas secciones con tal de cumplir con los estados límite de servicio.

2.5 PROCESO DE DISEÑO DEL MARCO CONVENCIONAL

Enseguida se describe la secuencia del proceso de diseño del marco convencional:

A) En primera instancia se define la estructuración del edificio, para ello se conoce la geometría general de la estructura, así como los claros, alturas de entrepiso, etc. Se define el tipo de material a emplear así como sus propiedades mecánicas; también se determina el sistema de piso y se define el tipo de perfiles estructurales o secciones de los elementos estructurales y su ubicación.

B) Posteriormente se determina el destino o uso de la edificación y en función de ello se establece la clasificación de la construcción, adicionalmente se procede a la ubicación de la estructura, lo anterior se realiza haciendo referencia a los artículos 174, 175 y 219 del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 1993.

C) Se prosigue con la estimación de los pesos en cada nivel de la estructura. Para obtener este dato es necesario conocer las cargas vivas y las cargas muertas de diseño. las cuales son inherentes al funcionamiento de la estructura.

Para la estimación de las cargas vivas se recurre a la tabla de cargas vivas unitarias que se establece en los artículos 198 y 199 del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 1993.

Las cargas muertas se calculan por medio de un análisis de cargas considerando el peso volumétrico de todos los conceptos que intervienen en la construcción y que actúen como acciones permanentes (artículos 186, 196 y 197 del R.C.D.F. 1993).

D) Obtención de las dimensiones iniciales de trabes y columnas de la estructura convencional.

Para calcular las secciones iniciales de traveses y columnas se recurre a emplear alguno de los modelos estructurales mencionados anteriormente. Inicialmente se utiliza el modelo de cortante para obtener las dimensiones aproximadas de las columnas. Las dimensiones de las traveses se proponen basándose en diseños similares.

Posteriormente se usa el modelo del marco plano, empleando las dimensiones aproximadas de traveses y columnas que se obtuvieron con el modelo de cortante. Para aplicar el modelo del marco plano se usará el programa de cómputo SAP-90 (Habibullah y Wilson, 1992), el cual tiene la opción de poder incluir la influencia del efecto $P-\Delta$. Se lleva a cabo el análisis estructural aplicando al modelo matemático las solicitaciones de diseño correspondientes. Las secciones de los elementos estructurales se modifican de tal manera que la distribución de masas y rigideces sea la adecuada hasta lograr que el período fundamental de vibración sea el deseado. Antes de proceder a realizar una nueva iteración se deben corregir los pesos y masas de cada nivel ya que la carga muerta producto del peso propio de los miembros estructurales se altera cuando se proponen nuevas secciones en cada iteración. Simultáneamente se verifica que los desplazamientos de la estructura sean menores que el límite de desplazamientos laterales.

Adicionalmente, se verifica que los elementos estructurales posean la capacidad adecuada para resistir las fuerzas internas inducidas por las acciones de diseño, es decir, se procede con el diseño por flexión, por flexocompresión, fenómenos de inestabilidad, etc. De ocurrir lo contrario se procede a realizar una nueva propuesta de secciones y se prosigue con el análisis y diseño hasta que el diseño final resulte confiable en cuanto a seguridad y resistencia.

E) Estimación de las rigideces de entrepiso definitivas K_T del marco convencional. Una vez que se obtienen las secciones definitivas de los elementos estructurales del marco convencional se procede a calcular las rigideces laterales de entrepiso totales K_T .

2.6 MÉTODO DE DISEÑO PARA EL MARCO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

A continuación se describe la secuencia del proceso de diseño del marco con disipadores de energía:

2.6.1. Elección de la distribución espacial de los disipadores en el marco con disipadores

Se definieron dos arreglos espaciales de disipadores. El primer arreglo de los disipadores consiste en ubicar un disipador en cada uno de los 20 niveles en la crujía central del marco. En la Figura 2.7 se muestra el primer arreglo espacial de disipadores, a partir de este momento, a este marco con disipadores se le denomina "Marco TADAS simple".

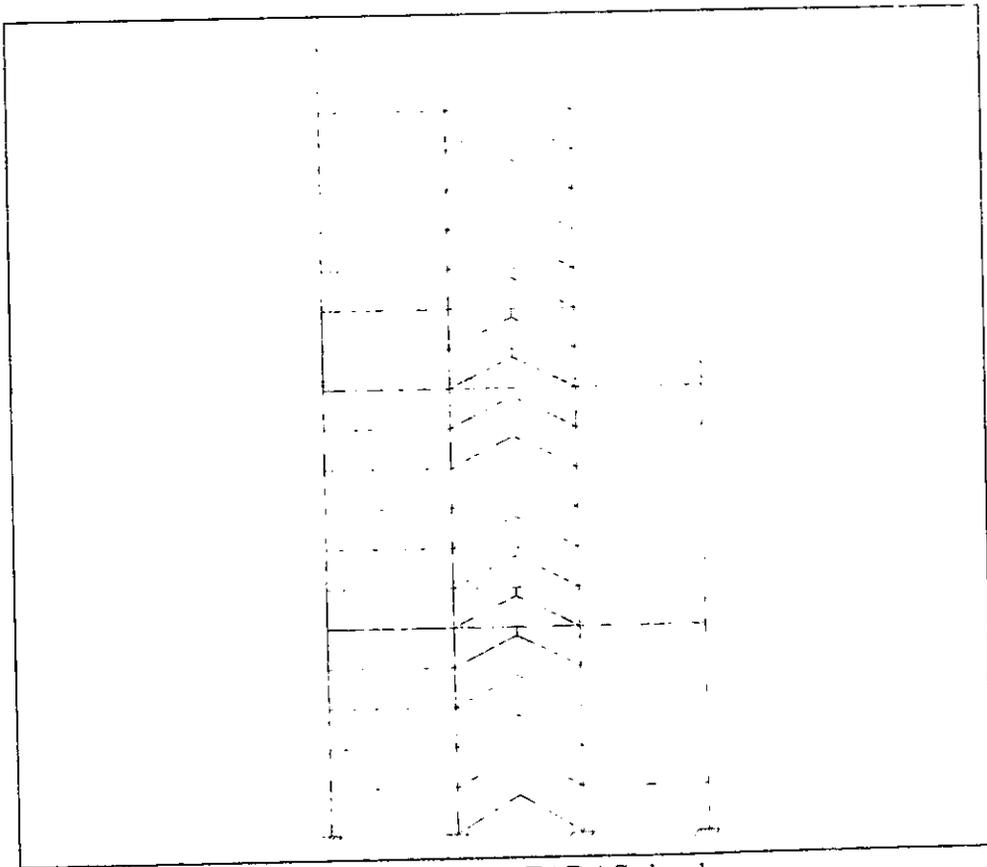


Figura 2.7 Marco TADAS simple.

El segundo arreglo espacial de los disipadores consiste en ubicar y alternar los disipadores de la forma siguiente: 2 en el primer nivel y 1 en el segundo nivel y así sucesivamente en toda la altura del marco (Figura 2.8), se puede apreciar en la figura que la distribución espacial de los disipadores es uniforme en todo el marco. Más adelante se explicarán los motivos fundamentales que propiciaron establecer este segundo arreglo espacial de disipadores. De ahora en adelante a este marco con disipadores se le denomina “Marco TADAS doble”.

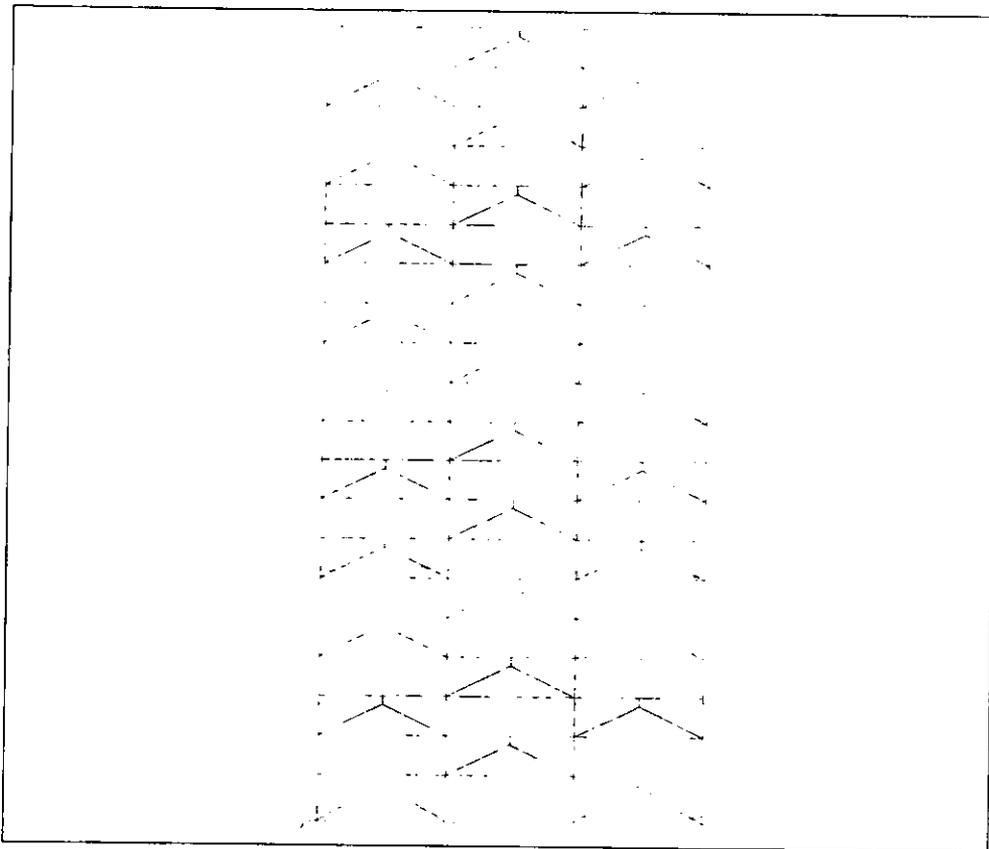


Figura 2.8 Marco TADAS doble.

2.6.2 Definición del valor de los factores α_1 y α_2

En esta etapa se establece el porcentaje de rigidez lateral que aporta el marco sin disipadores, es decir α_1 y también se define el porcentaje de rigidez que aporta el sistema

disipador α_2 . En esta tesis, se consideran los siguientes valores para los factores mencionados: $\alpha_1=0.25$ y $\alpha_2=0.75$.

2.6.3 Determinación de las secciones de columnas y traveses de la estructura sin disipadores

Para obtener las dimensiones de las traveses y columnas del marco sin disipadores, se reducen las secciones transversales de las traveses y columnas del marco convencional de tal manera que se obtenga un marco (estructura) con la rigidez K_{sd} . Dicha disminución está en función del porcentaje de rigidez (α_1) que aportará el marco sin disipadores. Para el caso de las columnas de acero de sección transversal tipo cajón se considera lo siguiente: el espesor de las placas es constante e igual tanto para los patines como para el alma de la sección. La expresión siguiente determina la dimensión de un lado de la sección en cajón:

$$L_d = \sqrt[3]{\frac{A}{18} - \frac{2e^2}{3A}} + e \quad (2.3)$$

donde:

$$A = \sqrt[3]{(-18\alpha_1 e^3 + 36\alpha_1 e^2 L - 27\alpha_1 e L^2 + 9\alpha_1 L^3 + 3(C+D))} \quad (2.4)$$

en esta última expresión:

$$C = 4e^6 + 108\alpha_1^2 e^6 - 432\alpha_1^2 e^5 L + 756\alpha_1^2 e^4 L^2 \quad (2.5)$$

$$D = -756\alpha_1^2 e^3 L^3 + 459\alpha_1^2 e^2 L^4 - 162\alpha_1^2 e L^5 + 27\alpha_1^2 L^6 \quad (2.6)$$

En las expresiones anteriores L_d es la dimensión de la sección transversal reducida de las secciones en cajón de las columnas del marco con disipadores; L es la dimensión original de la sección en cajón de las columnas del marco convencional; e es el espesor de las placas, que es el mismo tanto para los patines como para las almas de la sección en cajón y se conserva constante

de una sección en cajón del marco convencional a la correspondiente sección en cajón del marco con disipadores. En el apéndice A se demuestra la obtención de la expresión 2.3.

Como se puede apreciar en las ecuaciones 2.3 a 2.6 las únicas variables son α_1 , e y L . De estas tres variables α_1 es muy importante ya que interviene en todos los términos y refleja la magnitud de la rigidez lateral que aporta el marco sin disipadores. Puesto que $\alpha_1=0.25$, el momento de inercia de las secciones de las columnas del marco con disipadores que se obtienen con la expresión 2.3, equivale aproximadamente al 25% del momento de inercia de las columnas del marco convencional. El criterio para obtener las secciones de las trabes del marco con disipadores es el siguiente: se disminuye la sección en función del momento de inercia, el cual es también aproximadamente el 25% del momento de inercia de las trabes del marco convencional. Finalmente, la dimensión L_d obtenida de las secciones en cajón debe ajustarse a un tamaño comercial, las dimensiones de las trabes también se ajustan a un perfil estructural comercial, en consecuencia la rigidez lateral del marco sin disipadores inicialmente estimada por $K_{sd} = \alpha_1 K_T$ variará ligeramente.

2.6.4 Obtención de la rigidez lateral K_{sd} que realmente aporta el marco sin disipadores

Con las secciones comerciales de los elementos estructurales que se obtienen en el inciso anterior para el marco sin disipadores, se procede a realizar un análisis estructural para poder estimar la rigidez lateral del marco sin disipadores K_{sd} .

2.6.5 Cálculo de la rigidez lateral que debe aportar el sistema disipador TADAS

La rigidez K_d que realmente debe proporcionar el sistema disipador TADAS, se puede estimar con la expresión siguiente:

$$K_d = K_T - K_{sd} \quad (2.7)$$

donde K_T es la rigidez lateral total del marco convencional y K_{sd} es la rigidez lateral que realmente aporta el marco sin disipadores.

2.6.6 Determinación de las propiedades geométricas y mecánicas de los disipadores TADAS

Primeramente se debe saber cómo trabaja el sistema disipador TADAS. Por la peculiaridad de las conexiones del dispositivo TADAS, se considera que su extremo superior está perfectamente empotrado en la placa base. En esta conectividad las placas triangulares de acero están insertadas y soldadas apropiadamente a la placa base superior, y en el extremo opuesto, es decir en el vértice inferior, las placas de acero están conectadas a las diagonales de contraventeo por medio de unos pernos de acero que están insertados en agujeros ovalados, con lo cual se conforma una articulación. De acuerdo con lo anterior, ante la acción de una carga lateral el dispositivo TADAS trabaja exclusivamente a flexión, la curvatura por flexión es simple y uniforme sobre la altura completa de las placas y por efecto de la variación de su sección transversal alcanza a plastificarse en todo el volumen de las placas (Figura 2.9).

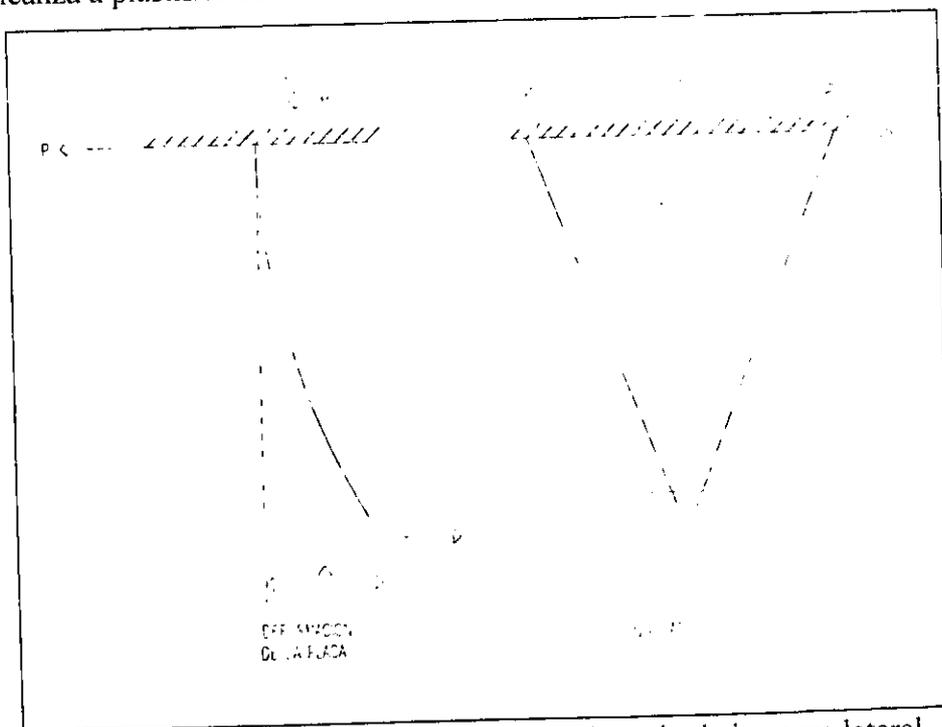


Figura 2.9 Comportamiento de la placa triangular bajo carga lateral.

Se puede vincular la rigidez lateral del sistema disipador \mathbf{K}_d obtenida en el inciso anterior con la expresión que define la rigidez lateral del dispositivo TADAS de la siguiente manera:

La rigidez de un elemento de sección transversal constante que está empotrado en uno de sus extremos y articulado en el otro extremo esta definida por la expresión 2.8:

$$K = \frac{3EI}{h^3} \quad (2.8)$$

donde E es el módulo de elasticidad del material del elemento, I es el momento de inercia de la sección transversal y h es la altura o la longitud total del elemento.

El momento de inercia de una placa triangular de ancho b y espesor t está definido por la ecuación siguiente (Tsai *et al.*, 1993c):

$$I = \frac{\left(\frac{2}{3}b\right)t^3}{12} = \frac{bt^3}{18} \quad (2.9)$$

sustituyendo la expresión 2.9 en 2.8 obtenemos la expresión siguiente:

$$K = \frac{3Ebt^3}{18h^3} \quad (2.10)$$

como el dispositivo TADAS consiste en una serie de placas triangulares de acero conectadas paralelamente, la rigidez lateral elástica teórica del dispositivo TADAS es N veces el valor de K de la ecuación 2.10. Se supone que la base de la placa está completamente empotrada y se desprecian las deformaciones por cortante, se considera únicamente las deformaciones por flexión de las placas, al simplificar términos se obtiene la expresión siguiente (Tsai *et al.*, 1993c):

$$K_{TADAS} = \frac{NEbt^3}{6h^3} \quad (2.11)$$

donde \mathbf{K}_{TADAS} es la rigidez lateral del dispositivo TADAS, E es el módulo de elasticidad del material empleado para las placas, N es el número de las placas triangulares, t es el espesor de las placas, b y h son respectivamente el ancho de la base y la altura de la placa triangular. Se puede

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

apreciar en la expresión 2.11 que la rigidez lateral del dispositivo TADAS es directamente proporcional al número de placas N , al módulo de elasticidad E , al ancho b y al espesor t , e inversamente proporcional al cubo de la altura h , por lo tanto con el fin de incrementar su rigidez lateral es preferible seleccionar una relación (h/t) pequeña para las placas.

En realidad, la rigidez del sistema disipador TADAS (\mathbf{K}_d) está formada por (Tsai *et al.*, 1993c):

a) La rigidez de las placas triangulares (dispositivo) TADAS (\mathbf{K}_{TADAS}).

b) La rigidez de las diagonales que las soportan ($\mathbf{K}_{diagonales}$)

Esto es:

$$\frac{1}{K_d} = \frac{1}{K_{TADAS}} + \frac{1}{K_{diagonales}} \Rightarrow K_d = \frac{K_{TADAS} K_{diagonales}}{K_{TADAS} + K_{diagonales}} \quad (2.12)$$

Ya que el sistema disipador TADAS es un sistema en serie, sin embargo por simplicidad se supondrá que $\mathbf{K}_{diagonales}$ es lo suficientemente grande como para desprestigiar el término $\frac{1}{K_{diagonales}}$, finalmente se obtiene que la rigidez del sistema disipador TADAS es función solamente de la rigidez del dispositivo TADAS, de esta forma se obtiene lo siguiente: $\mathbf{K}_d = \mathbf{K}_{TADAS}$, es decir la rigidez del sistema disipador es función únicamente de la rigidez que suministran las placas triangulares de acero (dispositivo TADAS).

Para obtener la rigidez lateral teórica del dispositivo TADAS, se tiene efectuar una propuesta inicial del número de placas triangulares de acero N , del ancho b de las mismas, del espesor t y del peralte h de las placas.

2.6.7 Cálculo de las propiedades geométricas de un elemento prismático equivalente al dispositivo disipador TADAS

Una vez que se tiene la primer propuesta de la geometría de las placas triangulares de acero TADAS y con la finalidad de modelar apropiadamente el disipador en el programa de cómputo SAP-90, es necesario determinar las propiedades geométricas y mecánicas de un elemento prismático que sea equivalente al dispositivo disipador TADAS. Es decir se requiere determinar el momento de inercia equivalente de dicho elemento así como la resistencia de fluencia que le corresponde al dispositivo disipador. Como el dispositivo TADAS trabaja únicamente a flexión la resistencia está dada por su momento de fluencia M_y .

Para calcular el momento de inercia del elemento prismático que sea equivalente al dispositivo TADAS se iguala la ecuación 2.11 con 2.8:

$$K_{TADAS} = \frac{3EI}{h^3} \quad (2.13)$$

de esta última expresión se obtiene el momento de inercia equivalente del elemento prismático:

$$I_{equiv} = \frac{K_{TADAS} h^3}{3E} \quad (2.14)$$

donde K_{TADAS} se obtiene con la expresión 2.11, h es el peralte de la placa y E es el módulo de elasticidad del material empleado para las placas triangulares.

El momento de fluencia del dispositivo TADAS está definido por el producto de la fuerza de fluencia por el peralte del disipador, es decir $M_y = P_y h$, la fuerza de fluencia P_y se obtiene por (Tsai *et al.*, 1993c):

$$P_y = \frac{F_y N b t^2}{6h} \quad (2.15)$$

donde F_y es el esfuerzo de fluencia mínimo especificado del material empleado para el disipador, las demás variables ya se definieron anteriormente.

Con esto se tiene una aproximación de las dimensiones y las propiedades geométricas y mecánicas de los disipadores, las cuales se van modificando durante el curso del proceso de dimensionamiento.

2.6.8 Determinación de las características de las diagonales de contraventeo que están ligadas al dispositivo disipador TADAS

Debido a que estos elementos están biarticulados en las conexiones de extremo, se ejercen sobre ellos fuerzas axiales de tensión y compresión axial únicamente, los elementos pueden alcanzar la fluencia por tensión o pandearse por compresión axial, se pretende que las diagonales tengan un comportamiento completamente elástico, aunque es más crítica la susceptibilidad al pandeo.

Después de que se efectúa el primer análisis estructural del marco con disipadores se determina la magnitud de las fuerzas axiales y se procede a la revisión por tensión o compresión.

Para llevar a cabo la revisión por tensión de las diagonales, los elementos se diseñan de tal manera que la resistencia de diseño a tensión sea mayor que la magnitud de la fuerza axial que actúa en la diagonal.

Para efecto de revisar la resistencia a compresión de las diagonales, se tiene que calcular la relación de esbeltez máxima del elemento en los dos posibles planos de pandeo, y en función de esa relación de esbeltez se determina la resistencia a compresión por pandeo elástico o pandeo

inelástico. En el caso de que el pandeo resulte crítico, desde luego que es mejor evitarlo, es preferible suministrarle a las diagonales un radio de giro suficientemente grande para que la relación de esbeltez sea mínima y de este modo propiciar que el diseño quede regido por la resistencia por fluencia a tensión de la diagonal.

2.6.9 Cálculo de las propiedades geométricas y mecánicas definitivas de los dispositivos TADAS

Una vez que se tienen las dimensiones y las propiedades geométricas y mecánicas iniciales de los disipadores, se procede a realizar el primer análisis estructural del marco con disipadores. Se verifica que los desplazamientos calculados cumplan con los desplazamientos laterales admisibles y asimismo que el período fundamental de vibración del marco con disipadores (T_d) sea igual al período fundamental de vibración del marco convencional (T_c). De no conseguir lo anterior, se inicia un proceso de análisis iterativo modificando la geometría o el número de placas triangulares del dispositivo TADAS hasta lograr que el período de vibración de los dos sistemas estructurales sea idéntico.

La modificación de las dimensiones se puede realizar variando el número de placas N , el espesor t , el ancho b o el peralte h de las placas. Aunque es posible cambiar todas las variables, es más conveniente modificar sólo las dos primeras. En cuanto a las dos últimas variables, es preferible que después de la primera o segunda iteración se mantengan constantes.

El procedimiento para determinar las dimensiones anteriores, es el siguiente:

- El ancho b de las placas queda regido por el ancho del patín inferior de la trabe del nivel superior del entrepiso cuyo perfil estructural es de tipo IPR o W y el peralte h se controla de tal manera que la relación (h/t) sea lo más pequeña posible con el fin de que la rigidez del dispositivo disipador TADAS se incremente notablemente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Se deberá calcular la rigidez lateral total del marco con disipadores K_T con las fuerzas cortantes y desplazamientos que resultaron del primer análisis. La rigidez lateral real que proporciona el sistema disipador analizado es:

$$K_{d(\text{actual})} = K_T - K_{sd} \quad (2.16)$$

donde K_{sd} es la rigidez del marco sin disipadores obtenida en el inciso 2.6.4, la cual es constante en esta etapa, $K_{d(\text{actual})}$ se compara con la rigidez que debe proporcionar el sistema disipador TADAS K_d (obtenida en el inciso 2.6.5). Se revisa si T_d es igual a T_c , de no ser así se deberá modificar el número de placas N utilizando la siguiente expresión:

$$N_{\text{actual}} = \frac{K_d}{K_{d(\text{actual})}} N_{\text{anterior}} \quad (2.17)$$

El proceso es iterativo y converge hasta que el período del marco con disipadores coincida con el período del marco convencional. La rigidez $K_{d(\text{actual})}$ de la última iteración es la rigidez lateral definitiva del sistema disipador TADAS.

En este momento es cuando finaliza el proceso de dimensionamiento de la estructura con disipadores de energía, ya que se tienen las dimensiones de los elementos estructurales y las características geométricas y mecánicas definitivas de los disipadores de energía.

El marco equipado con dispositivos disipadores de energía tipo TADAS deberá cumplir con dos funciones estructurales:

- Primeramente el marco sin disipadores (solamente las traveses y columnas) deberá resistir los efectos que generan las cargas gravitacionales.
- Los dispositivos disipadores TADAS deberán diseñarse para cumplir con el límite permisible de desplazamientos laterales, de tal manera que los disipadores TADAS logren incursionar en

el rango inelástico, con el propósito de que disipen energía al actuar las acciones dinámicas horizontales.

Una vez que se tengan diseñados los sistemas estructurales se procederá a efectuar un análisis comparativo de las respuestas sísmicas obtenidas, tanto del marco convencional y del marco equipado con disipadores TADAS, para lo cual se realizará un análisis dinámico paso a paso de respuesta inelástica de los marcos ante la excitación sísmica SCT-EW85. También se evaluará la eficiencia estructural de los dispositivos disipadores TADAS, adicionalmente se analizará la influencia de los arreglos espaciales de disipadores en la respuesta sísmica del marco con disipadores. Para llevar a cabo el análisis inelástico se utilizarán los programas de cómputo DRAIN-2D (Kanaan y Powell, 1973) y DRAIN-2DX (Prakash *et al.*, 1993). La excitación dinámica aplicada a los marcos corresponde a la componente horizontal este-oeste del acelerograma del sismo del 19 septiembre de 1985 registrado en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT-EW85).

3 ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS MARCOS

En el presente capítulo se realiza el proceso de análisis y diseño estructural del marco convencional y del marco con disipadores de energía sísmica de acuerdo con las consideraciones del capítulo anterior y las disposiciones que establece el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 1993, en particular se hace referencia a su Título Sexto Seguridad Estructural de las Construcciones. En el proceso de diseño también se contemplan los lineamientos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas 1995.

3.1 DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES A DISEÑAR

El marco convencional y el marco con disipadores forman parte del sistema estructural de un edificio tridimensional de 20 niveles. El edificio tridimensional tiene una planta simétrica en sus dos direcciones ortogonales (Figura 3.1). En cada nivel el sistema de piso del edificio consiste en una losa maciza de concreto reforzado apoyada perimetralmente en las trabes. La estructuración del edificio está integrada por marcos "rígidos" (también designada estructuras tipo I ó estructuras continuas según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y

Construcción de Estructuras Metálicas 1995) de acero estructural cuya especificación y tipo es A-36. En este tipo de estructuras se considera que los elementos estructurales están conectados entre sí por medio de conexiones “rígidas” a momento flexionante, las cuales son capaces de reducir a un mínimo las rotaciones relativas entre los extremos de los miembros que concurren en un nudo y en el análisis estructural puede suponerse que la geometría de las mismas no se altera debido a que los ángulos originales entre los miembros estructurales que se conectan se conservan sin cambio al deformarse la estructura.

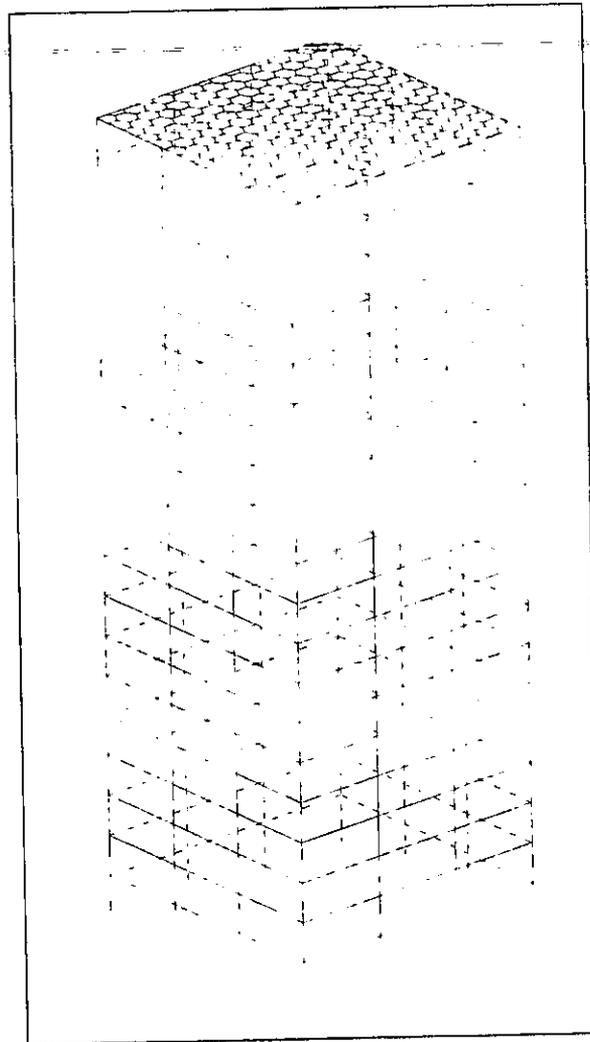


Figura 3.1 Edificio tridimensional de 20 niveles de acero estructural A-36.

Para llevar a cabo tanto el análisis elástico como el análisis de respuesta inelástica paso a paso, se considera solamente un marco exterior del conjunto de marcos que integran en ambas direcciones el edificio tridimensional, lo anterior se fundamenta en las siguientes consideraciones:

- La primera se refiere a que el sistema de piso que compone el edificio tiene la capacidad para desplazarse horizontalmente como un diafragma rígido en su plano, ejerciendo una influencia sobre los marcos estructurales que componen el edificio de tal manera que los desplazamientos laterales de cada punto de un nivel son idénticos ante la acción de fuerzas horizontales.
- La segunda consiste en que los cuatro marcos estructurales que componen el edificio tridimensional en la dirección X o Y, se integran por los mismos elementos estructurales y consecuentemente tienen la misma rigidez lateral. Por lo tanto en la etapa del análisis sísmico, es válido realizar el análisis de uno de los cuatro marcos estructurales con el fin de verificar los desplazamientos laterales de entrepiso de toda la estructura tridimensional. Para efectos sísmicos las masas, la rigidez lateral y los cortantes de entrepiso de uno de los marcos equivalen respectivamente a la cuarta parte de: las masas, la rigidez lateral y los cortantes de entrepiso totales del edificio tridimensional (debido a que se analiza uno de los cuatro marcos estructurales).
- **DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA CONVENCIONAL**

El marco convencional en estudio es de acero estructural cuya especificación y tipo es A-36, de veinte niveles y tres crujeas. En el primer entrepiso la altura es de 3.50 m y desde el segundo nivel hasta la azotea la altura de cada entrepiso es de 3.00 m, la distancia entre crujeas a eje de columnas es de 7.00 m. En la Figura 3.2 se muestra la elevación del marco estructural y la planta tipo del edificio. El tipo de perfil estructural seleccionado para las columnas de la estructura es de sección transversal tipo cajón (sección cuadrangular de cuatro placas), para las trabes el perfil estructural elegido es el denominado W del manual AISC ASD 1989 (Manual of

Steel Construction, Allowable Stress Design, American Institute of Steel Construction). Con la intención de suministrar soportes laterales a las traveses principales y disminuir el peralte de la losa debido a la amplitud del claro de los tableros que conforman el sistema de piso, se instalaron traveses secundarias de perfil tipo W en las dos direcciones de la planta del edificio. Las cargas que transmiten las traveses secundarias se estimaron como cargas concentradas al centro del claro de las traveses principales.

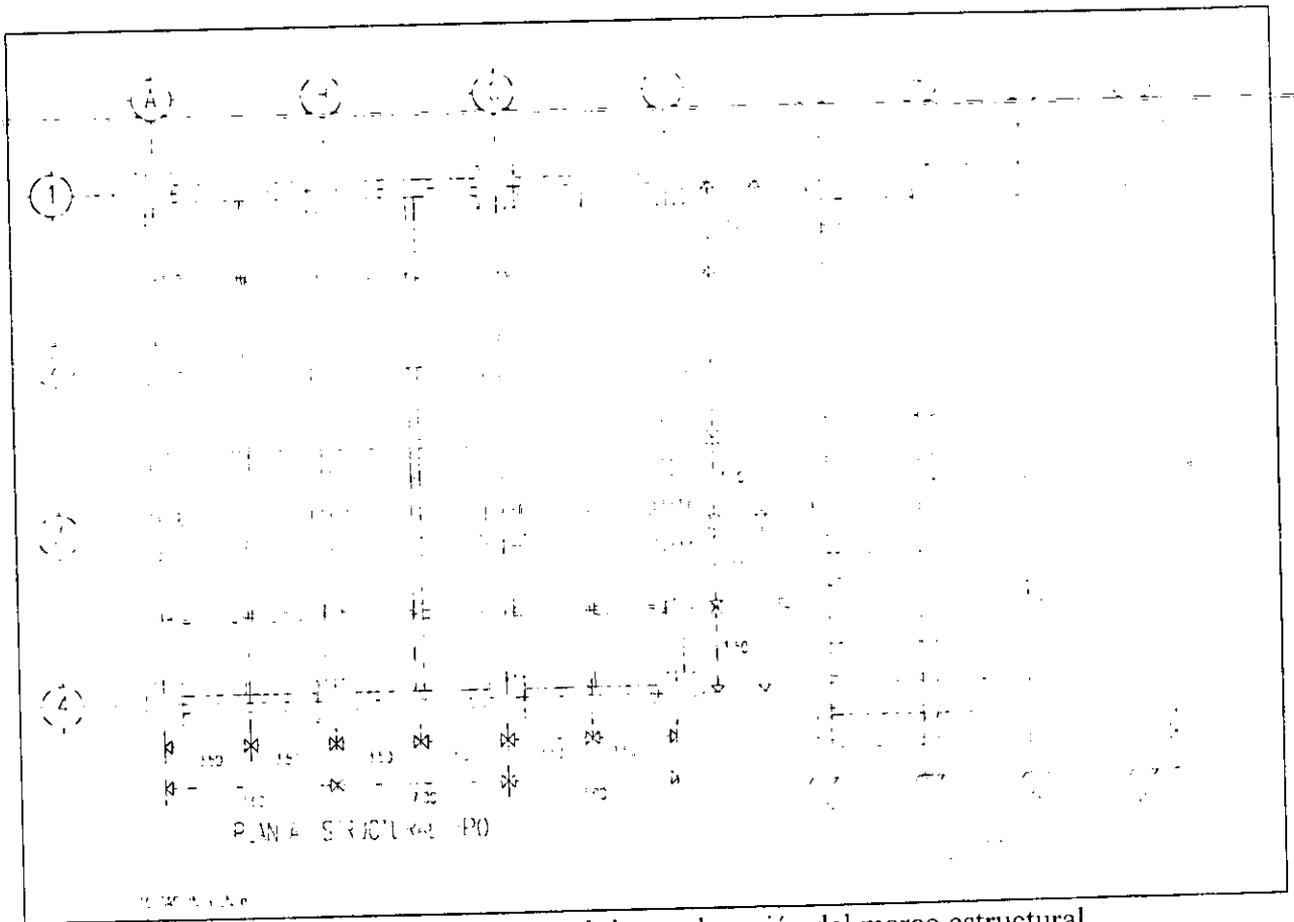


Figura 3.2 Planta estructural tipo y elevación del marco estructural.

La combinación óptima de perfiles estructurales del marco convencional será aquella que proporcione una rigidez lateral de entrepiso tal que el período fundamental de vibración sea de 2 segundos, sin embargo para las condiciones particulares del problema resultó muy difícil lograrlo, a pesar de que se efectuaron numerosas iteraciones, en dichas iteraciones se modificó la

geometría de los miembros estructurales (columnas y traves principales) y finalmente se obtuvo una combinación de secciones de tal manera que la distribución de masas y la rigidez lateral que suministran trabajando en conjunto genera un período fundamental de vibración de $T_c=1.9$ segundos.

Adicionalmente se revisó que los desplazamientos laterales de entrepiso inducidos por las acciones de diseño sí cumplen con el límite establecido por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 1993 en su artículo 209.

El destino de la edificación es para oficinas y por lo tanto se clasifica dentro de las construcciones tipo B tal como lo indica el artículo 174 del R.C.D.F. 1993.

• DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA CON DISIPADORES

Con respecto al marco con disipadores se tiene que la geometría general es idéntica a la del marco convencional (Figura 3.2), es decir las dimensiones de alturas de entrepiso y espaciamiento entre crujías no cambian; se emplearon las mismas consideraciones en lo que se refiere a la distribución y tipo de perfiles estructurales seleccionados para los miembros estructurales (traveses y columnas). Se le designa el mismo destino de la edificación, el sistema de piso y las dimensiones de los perfiles estructurales de las traveses secundarias son justamente iguales a las del marco convencional.

El marco con disipadores se distingue por lo siguiente:

- 1) Lo más relevante consiste en que el marco está equipado con los dispositivos disipadores TADAS, el cual tiene dos arreglos espaciales. En la Figura 3.3 se muestra el marco con disipadores TADAS simple y en la Figura 3.4 se presenta el marco con disipadores TADAS doble.

- 2) Las dimensiones de los perfiles estructurales de las columnas se calculan aplicando la ecuación 2.3 del inciso 2.6.3. Las dimensiones de las traveses se obtienen reduciendo proporcionalmente el momento de inercia de las traveses del marco convencional.

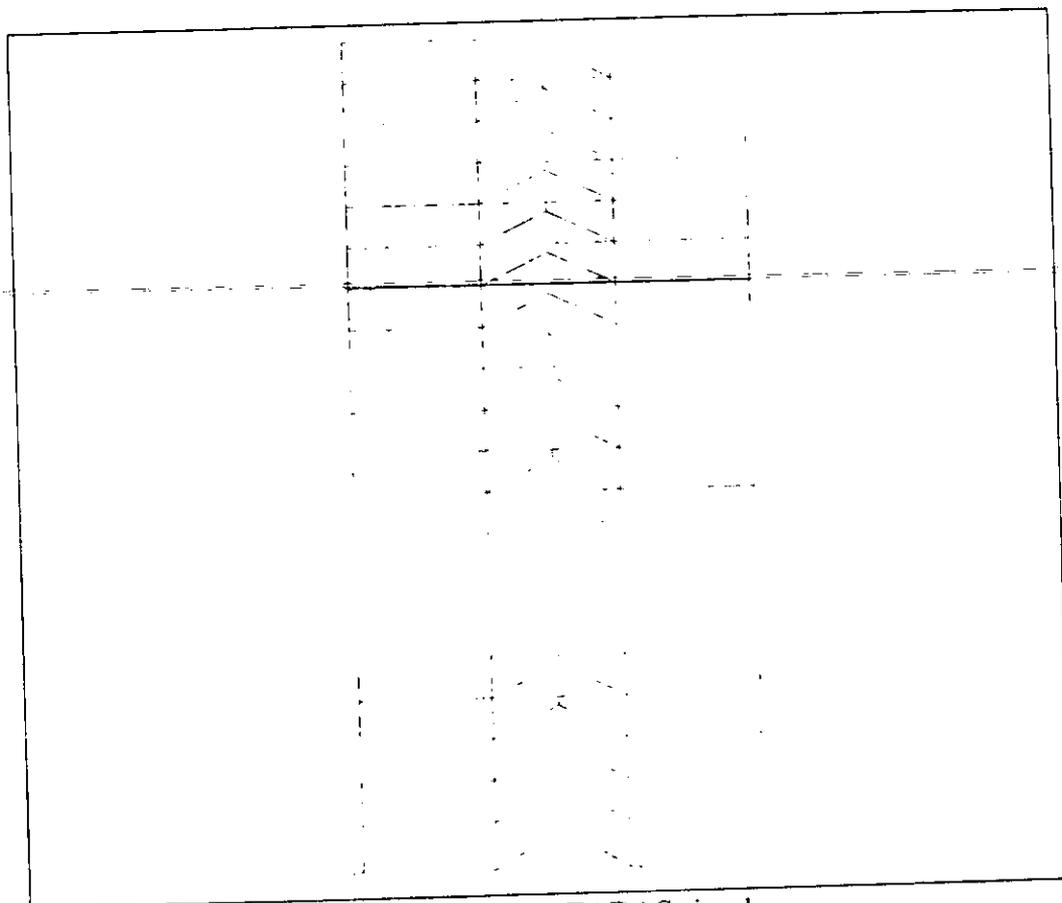


Figura 3.3 Marco TADAS simple.

- 3) El perfil seleccionado para las diagonales de contraventeo es el denominado T estructural (perfiles WT del Manual AISC 89). Cada diagonal está constituida por dos perfiles WT espalda con espalda. El tipo de material de las diagonales y de los disipadores TADAS es acero estructural clasificado como A-36.

El diseño del marco con disipadores se realiza a partir de la estructura diseñada convencionalmente, modificando las características geométricas de las columnas y traveses del

marco convencional. Los dispositivos disipadores TADAS se incorporan con la finalidad de que la distribución de masas y rigideces laterales de entrepiso causen que el período fundamental de vibración del marco con disipadores de energía sea $T_d=1.9$ segundos.

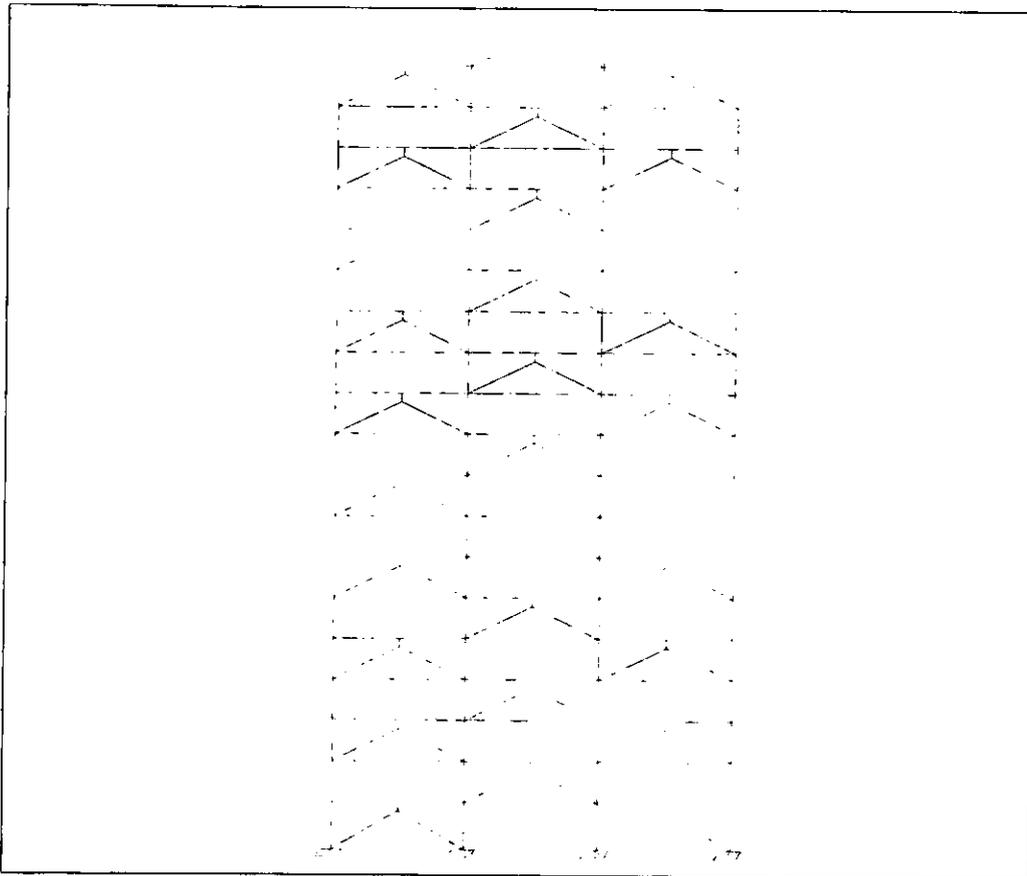


Figura 3.4 Marco TADAS doble.

- **UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS**

Tanto la estructura convencional y la estructura con disipadores se supone que se encuentran ubicadas en la Zona Sísmica III del Distrito Federal (Zona Lacustre clasificada en el artículo 175 y 219 del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 1993). Esta Zona de Lago se caracteriza por contener grandes depósitos de arcilla altamente compresible separados por estratos de arena, la capacidad de carga del terreno es muy limitada ya que la resistencia al

corte es baja, la profundidad de los estratos resistentes es variable llegando incluso hasta los 50 m de profundidad. Este tipo de suelo se caracteriza porque tiene un período dominante largo (1.5 a 4 segundos). Al coincidir el período dominante del terreno y el período de vibración de las estructuras se presenta el fenómeno de la resonancia, las aceleraciones inducidas por las ondas sísmicas se amplifican generando fuerzas inerciales muy significativas en los edificios, en algunos casos dichas fuerzas resultan muy superiores a las fuerzas sísmicas de diseño de los edificios propiciando que las estructuras se encuentren en una situación crítica porque los esfuerzos inducidos son elevados, es decir la demanda de resistencia sísmica ejercida sobre las estructuras es muy importante; lo anterior se traduce en daños irreversibles o colapsos estructurales.

Para los fines de este trabajo se pretende que tanto el marco convencional como el marco con disipadores ingresen o estén cerca de la resonancia, para esto es importante lograr que su período fundamental de vibración sea o este muy próximo a 2 segundos, ya que la excitación dinámica aplicada es la componente horizontal este-oeste del acelerograma del sismo del 19 de septiembre de 1985, registrado en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la Zona Sísmica III del Distrito Federal. En esta condición especial se analizará y comparará su respuesta sísmica y finalmente se procederá a evaluar la eficiencia e influencia de los dispositivos disipadores TADAS incorporados al marco sin disipadores. Para llevar a cabo el análisis de respuesta inelástica se utilizarán los programas de cómputo DRAIN-2D y DRAIN-2DX.

3.1.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL EMPLEADO EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS

El material empleado en el análisis y diseño del marco convencional y del marco con disipadores es acero estructural cuya especificación y tipo es A-36 con las siguientes propiedades mecánicas:

a) Esfuerzo de fluencia mínimo especificado: $F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$.

- b) Módulo de elasticidad: $E = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$.
- c) Módulo de elasticidad al esfuerzo cortante: $G = 7.84 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$.
- d) Esfuerzo último de resistencia en tensión mínimo especificado: $F_u = 2040 \text{ kg/cm}^2$.
- e) Relación de Poisson: $\mu = 0.3$.
- f) Peso volumétrico del acero estructural: $\gamma_a = 7.85 \text{ ton/m}^3$.

3.2 ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MARCO CONVENCIONAL

3.2.1 PREDIMENSIONAMIENTO

El procedimiento de análisis y diseño que se sigue en este trabajo es un proceso de diseño propuesto por Silva (1993). Fue aplicado inicialmente en estructuras de concreto y ahora se aplicará en una estructura de acero.

Durante el curso del proceso de diseño se incluye la estimación de:

- a) Pesos gravitacionales de cada nivel.
- b) Fuerza cortante basal.
- c) Fuerzas sísmicas que actuarán en cada nivel en función de los pesos gravitacionales y del coeficiente sísmico de diseño.
- d) Rigidez lateral de entrepiso mínima en el entrepiso superior.
- e) Variación de la rigidez lateral de entrepiso para obtener una variación práctica del tamaño de las columnas.
- f) Propuesta inicial de las secciones transversales de columnas y trabes.
- g) Pesos gravitacionales y masas de cada nivel, los cuales deberán incluir el peso de los elementos estructurales con los perfiles definitivos.
- h) Análisis estructural del marco con las dimensiones obtenidas en los pasos anteriores.
- i) Rigideces laterales de entrepiso definitivas del marco convencional K_T .

3.2.1.1 Intensidades de cargas de diseño en los marcos

A continuación se muestran los valores de las cargas de diseño para el marco convencional y el marco con disipadores que se utilizaron en el proceso de análisis y diseño. Se evalúan las cargas permanentes, acciones variables y acciones accidentales que correspondan ya que es necesario que las acciones sean combinadas de acuerdo con el artículo 186 y 188 del R.C.D.F. 1993.

• Carga muerta.(C.M.)

Por medio de un análisis de cargas se determinó la carga muerta que actúa en cada entrepiso considerando solamente los elementos constructivos que ocupan una posición permanente en el sistema de piso (ver Tabla 3.1), la carga muerta analizada es la misma para el marco convencional y para el marco con disipadores. La carga muerta producto del peso propio de los elementos estructurales de cada marco se calcula separadamente ya que las dimensiones de los perfiles estructurales son diferentes para cada uno de ellos y su peso va cambiando en toda la altura del marco.

Tabla 3.1 Análisis de cargas del sistema de piso.

CONCEPTO	PESO ENTREPISO (kg/m ²)	PESO AZOTEA (kg/m ²)
Losa maciza de concreto 15 cm	360	360
Firme para piso	70	
Mosaico	50	
Acabados	30	30
Instalaciones	40	40
Muros divisorios y canceleria	100	
Entortado y enladrillado		70
Relleno e impermeabilización		110
Adicional por Reglamento	40	40
CARGA MUERTA TOTAL	690	650

- Carga viva máxima ($C.V._{m\acute{a}x}$)

En funci3n del destino de la edificaci3n se determina la carga viva m\acute{a}xima. En este caso el uso que se le dar\acute{a} es de oficinas, de la tabla de cargas vivas del art\acute{iculo 199 del R.C.D.F. 1993 se obtienen los siguientes datos:

- Nivel 1 al 19 $C.V._{m\acute{a}x} = 250 \text{ kg/m}^2$
- Nivel de azotea $C.V._{m\acute{a}x} = 100 \text{ kg/m}^2$

- Carga viva instant\acute{anea} ($C.V._{inst}$)

La carga viva instant\acute{anea tambi\acute{en} est\acute{a} en funci3n del uso de la edificaci3n. Haciendo las mismas consideraciones se tienen las siguientes cargas:

- Nivel 1 al 19 $C.V._{inst} = 180 \text{ kg/m}^2$
- Nivel de azotea $C.V._{inst} = 70 \text{ kg/m}^2$

Las cargas anteriores se distribuyen de acuerdo al \u00e1rea tributaria que le corresponde a las trabes del sistema de piso y las trabes de los marcos, reparti\acute{endolas en los 8 marcos estructurales que componen el edificio (Figura 3.5).

El peso propio de trabes y columnas se incluye en el an\acute{alisis estructural, se calcula internamente en el programa de c3mputo SAP-90. Es necesario ingresar el dato del peso por metro lineal de cada uno de los perfiles propuestos para las columnas y trabes multiplicando el \u00e1rea de la secci3n transversal por el peso volum\acute{etrico del acero.

Las cargas que transmiten las trabes secundarias a las trabes principales de los marcos estructurales para cada una de las condiciones de carga se consideraron como cargas puntuales al centro del claro de las trabes, en la Tabla 3.2 se muestra la magnitud de estas cargas.

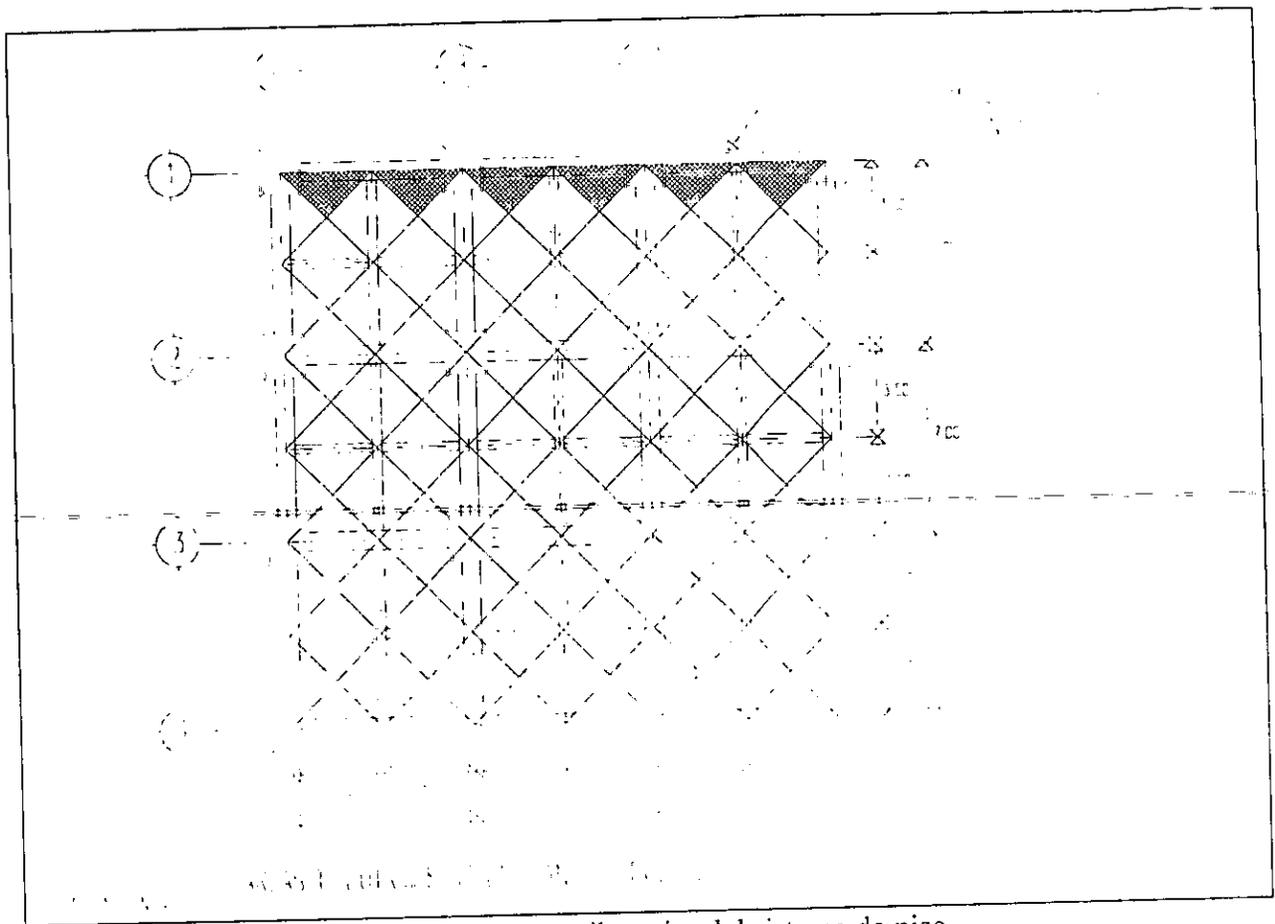


Figura 3.5 Areas tributarias del sistema de piso.

Tabla 3.2 Cargas puntuales por efecto de las traves secundarias.

Nivel	C.M. (ton)	C.V.máx (ton)	C.V. inst (ton)
20	3.14	0.47	0.33
1al 19	3.32	1.17	0.84

En la etapa del análisis y diseño sísmico se tienen que calcular las fuerzas sísmicas de diseño, para lo cual se debe considerar la categoría de combinaciones que incluye acciones permanentes, variables y accidentales (artículo 188 del R.C.D.F. 1993). Es decir, en cada combinación se tienen que emplear todas las acciones permanentes, las acciones variables con sus valores instantáneos y únicamente una acción accidental, que en este caso corresponde a las acciones sísmicas.

Para determinar las fuerzas sísmicas iniciales de diseño se aplicará el Método Estático de Análisis Sísmico (Meli, 1985), el cual es un método optativo para el análisis sísmico de estructuras (inciso 8.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo 1995), para ello se requiere emplear las intensidades de la carga muerta y de la carga viva instantánea.

- **Pesos gravitacionales de cada nivel de la estructura**

Area total de la planta: $A=21\text{m} * 21\text{m} = 441 \text{ m}^2$

Peso por nivel: (C.M. + C.V. inst)

Nivel 1 al 19:

$$W=441\text{m}^2*(690 \text{ Kg/m}^2+180 \text{ Kg/m}^2)= 383\ 670 \text{ kg} = 383.67 \text{ ton}$$

Nivel 20:

$$W= 441\text{m}^2*(650 \text{ Kg/m}^2+70 \text{ Kg/m}^2)= 317\ 520 \text{ kg} = 317.52 \text{ ton}$$

Peso total:

$$W_T= 383.67 * 19 + 317.52 * 1 = 7607.25 \text{ ton}$$

- **Determinación del factor de comportamiento sísmico Q**

La resistencia a fuerzas laterales en todos los entrepisos es suministrada por marcos “rígidos” de acero estructural, en este caso el factor de comportamiento sísmico que se le asigna a la estructura es Q igual a 3. Adicionalmente se debe revisar que la estructura cumpla con las once Condiciones de Regularidad que se indican en el inciso 6 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. De lo contrario el factor de comportamiento sísmico Q se debe reducir en un 20%, es decir el coeficiente de diseño sísmico c se incrementa en un 25%.

En la Figura 3.6 se muestra el espectro de diseño sísmico (para un factor de comportamiento sísmico Q igual a 1), correspondiente a la zona sísmica III del Distrito Federal para estructuras del grupo B, en donde c representa el coeficiente de diseño sísmico y a la ordenada espectral expresada como fracción de la aceleración de la gravedad.

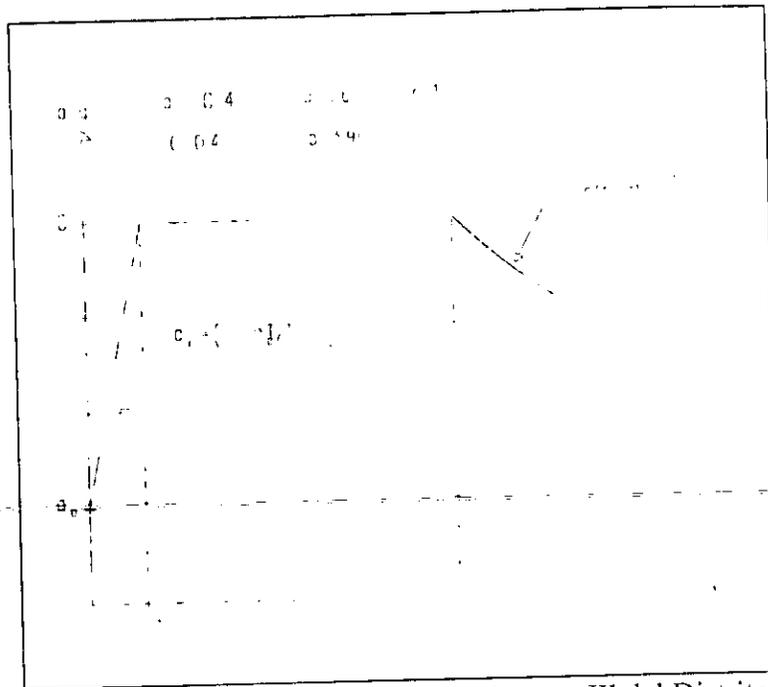


Figura 3.6 Espectro de diseño sísmico para la zona III del Distrito Federal.

- **Coefficiente de diseño sísmico**

El coeficiente sísmico para una edificación clasificada como del grupo B y localizada en la Zona III del Distrito Federal es igual a 0.40 (artículo 206 del R.C.D.F. 1993).

Al revisar si la estructura cumple las Condiciones de Regularidad, se determinó que no cumple el segundo requisito de las mismas:

- La relación de la altura a la dimensión menor de la base no excede de 2.5.

$$\frac{H}{b_{mm}} \leq 2.5 ; \frac{60.5}{21} = 2.88 > 2.5 \text{ No cumple}$$

Por lo tanto en el diseño sísmico el factor de comportamiento sísmico se reduce en 20%, resultando finalmente Q igual a 2.4. Es decir el coeficiente de diseño sísmico considerando el factor de comportamiento sísmico Q de 2.4, es de:

$$\frac{c}{Q} = \frac{0.4}{2.4} = 0.167$$

- **Cálculo de la fuerza cortante basal**

La fuerza cortante basal V_o se obtiene con la siguiente expresión:

$$V_o = \frac{c}{Q} W_T \quad (3.1)$$

Es decir:

$$V_o = 0.167 * 7607.25 = 1270.41 \text{ ton}$$

- **Cálculo y distribución de las fuerzas sísmicas que actuarán en cada nivel**

Las fuerzas sísmicas que se aplican en cada nivel se obtienen mediante el procedimiento que se describe a continuación (Análisis Sísmico Estático del R.C.D.F. 1993) y cuyos resultados se resumen en la Tabla 3.3:

- Se calcula la aceleración en cada nivel suponiendo que la aceleración varía linealmente con la altura y la aceleración a del nivel 20 es de 9.81 m/seg^2 . Se calcula el factor a/g donde g representa la aceleración de la gravedad $g=9.81 \text{ m/seg}^2$.
- Se estima la fuerza sísmica F_{si} de cada nivel por medio de la siguiente expresión:

$$F_{si} = W_i * \frac{a}{g} \quad (3.2)$$

donde W_i representa el peso de cada nivel.

- Se calcula la fuerza cortante sísmica V_{si} de cada entrepiso, la cual se obtiene como el valor acumulado de la fuerza sísmica aplicada en cada nivel.
- Se estima un factor correctivo con la finalidad de que la fuerza cortante basal coincida con la fuerza cortante basal de diseño calculada en la sección anterior. Este factor resulta del cociente entre la fuerza cortante basal y la fuerza cortante sísmica para el primer nivel obtenido en el inciso anterior:

$$f = \frac{V_o}{V_{s(\text{nivel})}} \quad (3.3)$$

e) La fuerza cortante sísmica corregida en cada entrepiso V_{sf} queda definida por la siguiente expresión:

$$V_{sf} = f * V_{si} \quad (3.4)$$

f) La fuerza sísmica corregida por nivel F_{sf} es la diferencia de las fuerzas cortantes sísmicas entre dos niveles consecutivos.

Tabla 3.3 Distribución de fuerzas sísmicas laterales.

Nivel	a g	Peso W_i (ton)	Fuerza Sísmica F_{Si} (ton)	Cortante Sísmico V_{Si} (ton)	V_{Si} (ton)	F_{Si} (ton)
20	1.00	317.52	317.52	317.52	101.03	101.03
19	0.95	383.67	364.65	682.17	217.06	116.03
18	0.90	383.67	345.62	1027.79	327.04	109.98
17	0.85	383.67	326.60	1354.38	430.96	103.92
16	0.80	383.67	307.57	1661.95	528.83	97.87
15	0.75	383.67	288.55	1950.50	620.64	91.81
14	0.70	383.67	269.52	2220.02	706.41	85.76
13	0.65	383.67	250.50	2470.51	786.11	79.71
12	0.60	383.67	231.47	2701.98	859.77	73.65
11	0.55	383.67	212.45	2914.43	927.37	67.60
10	0.50	383.67	193.42	3107.85	988.91	61.55
9	0.45	383.67	174.40	3282.24	1044.40	55.49
8	0.40	383.67	155.37	3437.61	1093.84	49.44
7	0.36	383.67	136.35	3573.96	1137.23	43.38
6	0.31	383.67	117.32	3691.28	1174.56	37.33
5	0.26	383.67	98.30	3789.57	1205.84	31.28
4	0.21	383.67	79.27	3868.85	1231.06	25.22
3	0.16	383.67	60.25	3929.09	1250.23	19.17
2	0.11	383.67	41.22	3970.31	1263.35	13.12
1	0.06	383.67	22.20	3992.51	1270.41	7.06
	Σ	7607.25				1270.41
	V_o	1270.41				
	FACTOR f	0.318				

3.2.1.2 Rigidez lateral de entrepiso mínima K_{Tmin} en el entrepiso superior

Para el predimensionamiento del marco convencional se aplica el modelo de cortante, cuya rigidez lateral de entrepiso se calcula por medio de la expresión 3.5:

$$K_T = \frac{12}{H^3} \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (3.5)$$

donde E es el módulo de elasticidad del material (acero estructural A-36), I es el momento de inercia de la sección transversal de una columna, H es la altura de entrepiso y n es el número de columnas en el entrepiso. Los valores de las variables son los siguientes:

$$E=2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

Dimensión mínima de la sección transversal en cajón de las columnas (l_{min}) = 30 cm

H=300 cm para el nivel 2 al 20

H=350 cm para el nivel 1

Número de columnas en cada nivel =16

Para calcular el momento de inercia de la sección en cajón, se considera que las cuatro placas de la sección tienen el mismo espesor, inicialmente el espesor para todas las placas se supone igual a 1.27 cm, por lo tanto el momento de inercia de las columnas con sección cuadrangular de cuatro placas se obtiene por:

$$I = \frac{l^4 - (l - 2e)^4}{12} \quad (3.6)$$

donde l representa la dimensión de la columna y e el espesor de las placas. Para determinar la rigidez de entrepiso mínima que corresponde al nivel 20, se sustituye la expresión 3.6 en 3.5. Para asociar la inercia mínima de las columnas del nivel 20, simplemente se sustituye l por l_{min} .

Finalmente, simplificando se obtiene:

$$K_{Tmin} = \frac{16E}{H^3} \left[l_{min}^4 - (l_{min} - 2e)^4 \right] \quad (3.7)$$

Si ahora se sustituyen los valores correspondientes del nivel 20 en la expresión 3.7. se determina la rigidez de entrepiso mínima:

$$K_{T_{min}} = 291.83 \text{ ton / cm}$$

3.2.1.3 Variación de la rigidez lateral de entrepiso

Para determinar la rigidez lateral de cada entrepiso K_{T_i} , se realiza lo siguiente: nuevamente se retoma la expresión 3.7, pero ahora se reagrupan todos los términos y se sustituye l_{min} por l , obteniendo la expresión 3.8, en la cual el miembro derecho de la ecuación es conocido y el miembro izquierdo resulta una ecuación de cuarto grado, la cual es difícil resolverla en términos de l . La alternativa consiste en igualar ambos miembros de la ecuación proponiendo un valor de la dimensión l hasta que el miembro izquierdo se aproxime al miembro derecho.

$$l^4 - (l - 2e)^4 = \frac{K_{T_i} H^3}{16E} \quad (3.8)$$

La variación de la rigidez lateral de entrepiso K_{T_i} se calcula normalizando la fuerza cortante final de cada entrepiso con respecto a la fuerza cortante basal. La rigidez lateral de cada entrepiso se calcula con la siguiente expresión:

$$K_{T_i} = \frac{K_{T_{min}}}{k_{20}} \frac{V_{f_i}}{V_o} \quad (3.9)$$

donde $k_{20} = \frac{V_{f_i(nivel\ 20)}}{V_o}$

Si se sustituye la rigidez lateral de entrepiso obtenida con la expresión 3.9 en la ecuación 3.8, sólo se requiere aproximar los dos miembros de la ecuación proponiendo valores de la dimensión l . Los resultados de este procedimiento y las propiedades geométricas de las secciones transversales propuestas se muestran en la Tabla 3.4. Con este procedimiento únicamente se obtiene una propuesta inicial de las dimensiones de las columnas del marco convencional.

Tabla 3.4 Predimensionamiento de columnas.

Nivel	V_{sf} (ton)	V_{sf}, V_o	K_{Ti} (ton/cm)	$K_{Ti} H^3$ $16E$	$l^4 - (l - 2e)^4$	Dimensión l (cm)	Area (cm^2)	Inercia (cm^4)
20	101.03	0.0795	291.83	241403	241406	30	145.95	20117
19	217.06	0.1709	626.97	518635	546318	39	191.67	45527
18	327.04	0.2574	944.63	781402	793370	44	217.07	66114
17	430.96	0.3392	1244.80	1029706	1037532	48	237.39	86461
16	528.83	0.4163	1527.48	1263544	1250352	51	252.63	104196
15	620.64	0.4885	1792.68	1482919	1490455	54	267.87	124205
14	706.41	0.5560	2040.40	1687829	1666494	56	278.03	138875
13	786.11	0.6188	2270.63	1878275	1855879	58	288.19	154657
12	859.77	0.6768	2483.37	2054257	2059097	60	298.35	171591
11	927.37	0.7300	2678.63	2215775	2276635	62	308.51	189720
10	988.91	0.7784	2856.40	2362828	2390927	63	313.59	199244
9	1044.40	0.8221	3016.68	2495417	2508982	64	318.67	209082
8	1093.84	0.8610	3159.48	2613542	2630861	65	323.75	219238
7	1137.23	0.8952	3284.80	2717202	2756625	66	328.83	229719
6	1174.56	0.9246	3392.62	2806399	2886335	67	333.91	240528
5	1205.84	0.9492	3482.97	2881131	2886335	67	333.91	240528
4	1231.06	0.9690	3555.82	2941398	3020052	68	338.99	251671
3	1250.23	0.9841	3611.20	2987202	3020052	68	338.99	251671
2	1263.35	0.9944	3649.08	3018541	3020052	68	338.99	251671
1	1270.41	1.0000	3669.48	4820128	4959381	80	399.95	413282

Como se había mencionado previamente al aplicar el modelo de cortante se desprecia la flexibilidad de trabes, las deformaciones axiales de columnas así como las deformaciones por cortante de los elementos, por lo que las rigideces laterales obtenidas no son reales, son únicamente una aproximación. Se debe entonces considerar el modelo de marcos planos (esqueletal) y efectuar el análisis estructural con las dimensiones obtenidas en el proceso anterior y revisar los desplazamientos laterales de la estructura. Si los desplazamientos cumplen con el límite del R.C.D.F. 1993 y simultáneamente el período de vibración es o está próximo a 2.0 segundos, las dimensiones serán las definitivas. En caso contrario se tendrá que aumentar las dimensiones considerando los siguientes ajustes:

- A) Se proponen las dimensiones de las trabes. Para las trabes principales se supone un perfil IPR 686x217.3 (W27x146), para las trabes secundarias se supone un perfil IPR 457x52.2

ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS MARCOS

(W18x50). Los pesos de estos miembros estructurales también se deben incluir en el peso y masa de cada nivel (Tabla 3.5).

B) Con los resultados de la Tabla 3.4 se estiman los pesos de cada nivel considerando el peso de las columnas, y nuevamente se calculan las fuerzas sísmicas y la fuerza cortante basal. Las fuerzas que se obtienen corresponden a la estructura tridimensional la cual está constituida por cuatro marcos con idénticas características en ambas direcciones (Figura 3.5), por lo tanto cada marco estructural tomará la cuarta parte (ver Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Fuerzas sísmicas corregidas.

Nivel	W_i (ton)	W_i Columnas (ton)	W_i Trabes (ton)	W_i Trab Sec (ton)	W_i Total (ton)	a/g	F_{Si} (ton)	V_{Si} (ton)	V_{Sj} (ton)	F_{Sj} (ton)	F_{Sj} 4 (ton)
20	317.52	5.50	36.5	6.57	363.34	1.00	363.34	363.34	115.62	115.62	28.91
19	383.67	7.22	36.5	6.57	433.10	0.95	411.62	774.96	246.61	130.99	32.75
18	383.67	8.18	36.5	6.57	434.44	0.90	391.36	1166.32	371.15	124.54	31.13
17	383.67	8.94	36.5	6.57	435.30	0.85	370.55	1536.87	489.07	117.92	29.48
16	383.67	9.52	36.5	6.57	435.97	0.80	349.50	1886.36	600.29	111.22	27.80
15	383.67	10.09	36.5	6.57	436.55	0.75	328.31	2214.68	704.77	104.48	26.12
14	383.67	10.48	36.5	6.57	437.02	0.70	307.00	2521.68	802.46	97.70	24.42
13	383.67	10.86	36.5	6.57	437.41	0.65	285.58	2807.26	893.34	90.88	22.72
12	383.67	11.24	36.5	6.57	437.79	0.60	264.12	3071.38	977.39	84.05	21.01
11	383.67	11.62	36.5	6.57	438.17	0.55	242.62	3314.00	1054.60	77.21	19.30
10	383.67	11.82	36.5	6.57	438.46	0.50	221.04	3535.05	1124.94	70.34	17.59
9	383.67	12.01	36.5	6.57	438.65	0.45	199.39	3734.43	1188.39	63.45	15.86
8	383.67	12.20	36.5	6.57	438.84	0.40	177.71	3912.15	1244.94	56.55	14.14
7	383.67	12.39	36.5	6.57	439.03	0.36	156.02	4068.17	1294.59	49.65	12.41
6	383.67	12.58	36.5	6.57	439.23	0.31	134.31	4202.47	1337.33	42.74	10.69
5	383.67	12.58	36.5	6.57	439.32	0.26	112.55	4315.03	1373.15	35.82	8.95
4	383.67	12.77	36.5	6.57	439.42	0.21	90.79	4405.82	1402.04	28.89	7.22
3	383.67	12.77	36.5	6.57	439.51	0.16	69.01	4474.83	1424.00	21.96	5.49
2	383.67	12.77	36.5	6.57	439.51	0.11	47.22	4522.05	1439.03	15.03	3.76
1	383.67	17.58	36.5	6.57	441.92	0.06	25.57	4547.62	1447.17	8.14	2.03
				Σ	8683.00						
				Vo	1447.17						
				Factor f	0.318						

C) Adicionalmente se requiere calcular la masa total de cada nivel con la expresión 3.10 (ver Tabla 3.6), ya que este dato es necesario para efectuar el análisis dinámico modal espectral (NTC por sismo 1995).

$$M_i = \frac{W_{i\text{Total}}}{9.81 \text{ m/seg}^2} \quad (3.10)$$

Tabla 3.6 Masas de cada nivel.

Nivel	W _i total (ton)	Masa total M _i (ton•seg ² /m)	Masa por marco M _i /4 (ton•seg ² /m)
20	363.34	37.04	9.26
19	433.10	44.15	11.04
18	434.44	44.29	11.07
17	435.30	44.37	11.09
16	435.97	44.44	11.11
15	436.55	44.50	11.13
14	437.02	44.55	11.14
13	437.41	44.59	11.15
12	437.79	44.63	11.16
11	438.17	44.67	11.17
10	438.46	44.70	11.17
9	438.65	44.71	11.18
8	438.84	44.73	11.18
7	439.03	44.75	11.19
6	439.23	44.77	11.19
5	439.32	44.78	11.20
4	439.42	44.79	11.20
3	439.51	44.80	11.20
2	439.51	44.80	11.20
1	441.92	45.05	11.26

Ya que se tienen los datos necesarios se procede a realizar el análisis de la estructura de acuerdo con las consideraciones que se indican en el próximo inciso.

3.2.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MARCO CONVENCIONAL

3.2.2.1 Consideraciones en el proceso de análisis

En el análisis de la estructura convencional y de la estructura con disipadores se emplearon las siguientes consideraciones:

- A) No se toma en cuenta la flexibilidad del suelo donde los marcos se encuentran apoyados, por lo tanto la base de los marcos se idealiza como un empotramiento perfecto.
- B) Dentro del análisis sísmico no se consideran excentricidades accidentales de las fuerzas sísmicas ni los efectos bidireccionales.
- C) Las columnas se diseñan únicamente por flexocompresión uniaxial.
- D) El desplazamiento relativo de entrepiso admisible es 0.012 de la diferencia de elevaciones:

$$\delta_{perm} = 0.012 * H_{entrepiso}$$

Durante el proceso de análisis estructural del marco convencional y del marco con disipadores se seguirán las disposiciones del R.C.D.F. 1993 particularmente se atienden los criterios marcados por el Título Sexto Seguridad Estructural de las Construcciones, en el cual se establece que se debe considerar el efecto combinado que inducen las acciones tales como: acciones permanentes (carga muerta, C.M.), acciones variables (carga viva máxima, instantánea y media, C.V.) y acciones accidentales (acciones sísmicas, efectos de viento), que generan las fuerzas internas en los miembros estructurales que integran una estructura (artículos 186 y 188 del R.C.D.F. 1993).

Con la finalidad de obtener las fuerzas internas de diseño para la estructura clasificada dentro del grupo B, se deberá contemplar una serie de combinaciones de acciones, las cuales deberán incluir el factor de carga apropiado, se consideran dos categorías de combinaciones:

- 1) Combinación de cargas en la cual intervengan acciones permanentes y acciones variables.

$$1) 1.4 (C.M. + C.V. \text{ máx})$$

- 2) Combinación de cargas en la que se incluyan acciones permanentes, acciones variables y acciones accidentales.

$$2) 1.1 (C.M. + C.V.\text{inst}) + 1.1 \text{ Sismo}$$

$$3) 1.1 (C.M. + C.V.\text{inst}) - 1.1 \text{ Sismo}$$

Los coeficientes de las combinaciones de acciones que se mostraron previamente se proponen como factores de carga (F.C.) en el artículo 194 del R.C.D.F. 1993.

El análisis estructural del marco convencional se realiza con las combinaciones de cargas mencionadas anteriormente. Las fuerzas sísmicas de diseño se obtienen ahora por medio de un análisis dinámico modal espectral (Bazán y Meli, 1985) en lugar del análisis sísmico estático, se utiliza el espectro de diseño sísmico de la Zona III (Figura 3.6) que propone el R.C.D.F. 1993 en sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. El factor de comportamiento sísmico es $Q=2.4$ ya que la estructura no cumple las Condiciones de Regularidad.

Dentro del proceso de análisis del marco convencional se incluyeron las dimensiones y las propiedades geométricas de las columnas propuestas en la Tabla 3.4, así como las propiedades geométricas de las trabes que se propusieron inicialmente. Para realizar el primer análisis estructural, se aplicó el modelo del marco plano utilizando el programa de cómputo SAP-90. En la intersección de las trabes con columnas se considera que existe una zona rígida en ambos extremos de las trabes, esta excentricidad es la distancia desde el eje de las columnas hasta el paño exterior de las mismas. A continuación se procede a revisar el período de vibración de la estructura y a verificar que los desplazamientos relativos de entrepiso cumplan con el límite indicado por el R.C.D.F. 1993. Cuando $\delta_{rel} > \delta_{perm}$ se deben corregir las dimensiones de los elementos estructurales.

Durante el curso del proceso cíclico de análisis y diseño del marco convencional se incluye la configuración y modelación estructural, las solicitaciones de diseño y las combinaciones de acciones, las condiciones de soporte, los tipos y propiedades mecánicas de los materiales, la selección de perfiles estructurales, las propiedades geométricas de las secciones transversales de los miembros estructurales, las especificaciones de diseño de la normatividad vigente y la verificación de la capacidad de los miembros ante los estados límite de falla y de servicio. Sin embargo el diseño final del marco convencional no tuvo una solución fácil y directa, el resultado final fue una secuencia de solución de una serie de problemas.

3.2.3 RIGIDECES LATERALES DE ENTREPISO K_T Y SECCIONES DEFINITIVAS DEL MARCO CONVENCIONAL

Con el fin de que el período de vibración del marco convencional coincidiera en 2.0 segundos se efectuaron múltiples iteraciones sucesivas, proponiendo una infinidad de secciones transversales tanto para las columnas como para las trabes de la estructura, sin embargo no fue posible que se cumplieran simultáneamente las tres condiciones impuestas (período de vibración de 2 segundos, desplazamientos laterales y obviamente el cumplimiento por resistencia de los elementos estructurales). Finalmente se logró obtener el diseño definitivo del marco convencional que cumple con los desplazamientos relativos de entrepiso y el cual tiene un período de vibración $T_c=1.9$ segundos. En la Tabla 3.7 se muestran las dimensiones definitivas de las secciones transversales de columnas y trabes del marco convencional. Las rigideces laterales de entrepiso definitivas del marco convencional se muestran en la Tabla 3.8. en la cual también se presentan las fuerzas sísmicas, fuerzas cortantes de entrepiso y desplazamientos del marco convencional para un factor Q igual a 2.4, dichas fuerzas sísmicas, cortantes y desplazamientos se obtuvieron con el programa de cómputo SAP-90 (Habibullah y Wilson, 1992).

Tabla 3.7 Secciones transversales definitivas de columnas y trabes del marco convencional.

SECCIONES DE COLUMNAS Y TRABES DEL MARCO CONVENCIONAL				
Nivel	Columnas		Trabes Principales	Trabes Secundarias
	Sección d x b _f (cm)	Espesor placas t _w y t _f (mm)	Perfil IPR* o W d x peso (mm x kg/m)	perfil IPR* o W d x peso (mm x kg/m)
19 y 20	110 x 110	38	406 x 148.9	356 x 38.9
17 y 18	115 x 115	38	406 x 148.9	356 x 38.9
16	115 x 115	38	457 x 144.3	356 x 38.9
13 al 15	120 x 120	38	457 x 144.3	356 x 38.9
10 al 12	125 x 125	38	610 x 155.0	356 x 38.9
7 al 9	130 x 130	44	610 x 155.0	356 x 38.9
5 y 6	135 x 135	44	610 x 155.0	356 x 38.9
4	135 x 135	44	686 x 151.9	356 x 38.9
1 al 3	140 x 140	44	406 x 148.9	356 x 38.9

d: peralte de la sección. b_f: ancho del patín. t_w: espesor de la placa del alma. t_f: espesor de la placa del patín. * Perfil IPR designación del manual IMCA

Tabla 3.8 Rigideces laterales de entrepiso definitivas del marco convencional.

Nivel	Fuerza Sísmica F_i (ton)	Cortante Sísmico V_i (ton)	Desplazam. Máximo δ máx (cm)	Desplazam. relativo δ relativo (cm)	Desplazam. relativo δ rel*Q (cm)	Desplazam. admisible δ permisible (cm)	Rigidez Lateral K_T (ton/cm)
20	24.13	24.13	24.32	0.93	2.22	3.6	26.04
19	30.89	55.02	23.39	1.02	2.44	3.6	54.12
18	27.06	82.08	22.38	1.12	2.69	3.6	73.28
17	25.01	107.09	21.26	1.22	2.94	3.6	87.54
16	23.97	131.06	20.03	1.32	3.16	3.6	99.54
15	20.00	151.06	18.72	1.39	3.34	3.6	108.67
14	19.34	170.39	17.33	1.43	3.44	3.6	118.88
13	17.70	188.09	15.89	1.44	3.46	3.6	130.62
12	16.32	204.42	14.45	1.43	3.43	3.6	142.95
11	15.73	220.14	13.02	1.44	3.45	3.6	153.23
10	12.90	233.04	11.59	1.45	3.47	3.6	161.09
9	12.48	245.52	10.14	1.44	3.46	3.6	170.11
8	11.22	256.74	8.70	1.43	3.43	3.6	179.54
7	9.70	266.44	7.27	1.41	3.38	3.6	189.41
6	8.59	275.03	5.86	1.35	3.25	3.6	203.23
5	6.10	281.14	4.51	1.27	3.06	3.6	220.79
4	4.84	285.97	3.23	1.16	2.79	3.6	245.82
3	3.22	289.20	2.07	0.99	2.38	3.6	292.12
2	1.75	290.95	1.08	0.73	1.74	3.6	400.39
1	0.60	291.55	0.35	0.35	0.85	4.2	825.14

Adicionalmente se debe verificar que los miembros estructurales que integran el marco convencional tengan la capacidad suficiente para resistir adecuadamente los elementos mecánicos de diseño. Si en el proceso de diseño se determina que alguno de los elementos estructurales es inadecuado para resistir las fuerzas internas de diseño, se deben ajustar las dimensiones del perfil estructural e iniciar nuevamente el proceso de análisis y diseño. Los estados límite de falla que se revisaron se explican en la siguiente sección.

3.2.4 REVISIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE DE FALLA Y DE SERVICIO

La adecuación de los miembros estructurales está determinada en parte por un conjunto de reglas llamadas especificaciones de diseño, en las cuales se incluyen fórmulas que permiten revisar la resistencia, rigidez, proporciones y otros criterios que pueden gobernar la aceptabilidad de los elementos estructurales (Johnston *et al.*, 1986).

La estructura convencional y cada uno de sus componentes estructurales deberán diseñarse para tener la resistencia adecuada ante las acciones de diseño más desfavorables, además deberán cumplir con el estado límite de servicio que sea aplicable. Para efecto de determinar la aceptabilidad de los miembros estructurales por resistencia, se aplicó el diseño por estados límite de falla o de resistencia (artículos 183 y 190 del R.C.D.F. 1993). El Diseño por Factor de Carga y Resistencia se basa en el concepto de estados límite de resistencia (situación de un elemento estructural que corresponde al agotamiento de su capacidad de carga o a que tenga daños irreversibles), el criterio para determinar una resistencia aceptable de diseño es el siguiente: se comparan las fuerzas internas de diseño generadas por la correspondiente combinación factorizada de solicitaciones contra la resistencia del elemento afectada por factores de reducción, esto es $\sum_{i=1}^N \gamma_i Q_i \leq \phi R_n$ (McCormack, 1991). Al aplicar este criterio siempre se tiene que cumplir que la resistencia de diseño de un elemento tiene que exceder de manera razonable la magnitud de sus elementos mecánicos de diseño. Para diseñar los marcos de acero estructural se tiene contemplado aplicar la filosofía de diseño viga débil-columna fuerte, es decir que la capacidad a flexión de las columnas que se conectan en un nudo sea mayor que la capacidad por flexión de las trabes que se conectan al mismo. Para llevar a cabo el diseño y revisión por estados límite se atenderán los lineamientos y especificaciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas 1995.

3.2.4.1 Diseño de trabes por flexión

Para los miembros estructurales sometidos a flexión, esto es las trabes secundarias y las trabes de los marcos se analizan los siguientes estados límite de falla para determinar la capacidad a momento flexionante:

- a) Pandeo local del patín a compresión por flexión.
- b) Pandeo local del alma a compresión por flexión.
- c) Pandeo lateral por flexotorsión del patín a compresión por flexión.
- d) Determinación de la capacidad a flexión.

Estos estados límite de falla dependen respectivamente, de la relación ancho/espesor de los patines de la sección, la relación ancho espesor del alma y de la distancia entre puntos soportados lateralmente del patín a compresión del elemento (Especificaciones LRFD, AISC 1993).

Con el fin de que un elemento de acero estructural sometido a flexión tenga la suficiente capacidad de rotación durante la formación de articulaciones plásticas y desarrolle completamente su capacidad de momento plástico deberá exentar las fallas prematuras por pandeo local de los elementos planos y por el pandeo lateral del patín a compresión de la sección (De Buen, 1993). El pandeo local se controla de tal manera que las relaciones ancho/espesor de los elementos planos (atiesados o no atiesados) que componen la sección transversal del elemento se mantengan dentro de los límites de esbeltez de los elementos planos establecidos para secciones clasificadas como tipo 1 (De Buen, 1993).

Adicionalmente, con el objeto de evitar la inestabilidad lateral, es decir el desplazamiento lateral del patín a compresión o la torsión del elemento, se debe verificar que la distancia entre soportes laterales del patín a compresión L_b debe ser menor que la longitud crítica característica entre soportes laterales L_u del perfil estructural, la cual es función de sus propiedades geométricas. En perfiles I o H si no se proporciona una longitud L_b adecuada entre soportes laterales la resistencia o capacidad por flexión disminuye notablemente (Especificaciones LRFD AISC, 1993; Smith, 1996). Para la revisión de la capacidad por flexión de un elemento de acero estructural se requiere la aplicación de diversas ecuaciones para las cuales se tienen que cumplir ciertas especificaciones de diseño, debido a esto se optó por hacer un programa codificado en lenguaje BASIC, para esto se requiere conformar el diagrama de flujo en el cual se muestre con claridad la secuencia de los pasos lógicos de diseño. En el apéndice B se presenta el diagrama de flujo que facilita el proceso de revisión por flexión de perfiles estructurales de sección I o H flexionados con respecto a su eje mayor.

3.2.4.2 Diseño de columnas por flexocompresión uniaxial

Debido a la importancia que representan las columnas para sustentar la estructura de una edificación, resulta evidente que se deberá evitar en lo posible cualquier tipo de falla eventual que pudiese ocurrir en ellas, verificando que le proporcionen estabilidad a la estructura ante cualquier tipo de sollicitación y que no se presente ningún mecanismo de falla de entrepiso. Los estados límite de falla que se analizan para la revisión de la capacidad a flexocompresión uniaxial de las columnas son los siguientes:

- a) Revisión de la resistencia en los extremos de la columna.
- b) Revisión por inestabilidad de la columna completa.
- c) Pandeo o inestabilidad por flexión debido a fuerzas axiales de compresión.
- d) Pandeo local del patín a compresión por flexión.
- e) Pandeo local del alma a compresión por flexión.
- f) Pandeo lateral del patín a compresión por flexión.

Para el caso de las columnas tiene más trascendencia analizar y verificar los dos estados límite iniciales, esto es verificar que todas las columnas cumplan con los estados límite por resistencia en los extremos de la columna y por inestabilidad de la columna completa.

Inicialmente se tiene que proceder a revisar el pandeo local de los elementos planos de la sección con el fin de exentar fenómenos de inestabilidad local prematuros, esto se logra si se le proporciona un espesor adecuado a las placas que componen la sección de tal manera que su relación ancho/espesor no rebase los límites establecidos para secciones tipo 1. A continuación se revisa el estado límite por pandeo lateral del patín a compresión de la sección en cajón, el cual generalmente no es crítico en secciones armadas de cuatro placas o secciones en cajón ya que la longitud crítica sin soportes laterales L_u de una sección en particular es bastante amplia. La falla por pandeo lateral se controla apropiadamente si se colocan soportes laterales a una distancia L_b

menor que la longitud crítica L_u . En este aspecto las secciones en cajón son más eficientes y son superiores a los perfiles estructurales IPR. Finalmente, si se diseñan las secciones de las columnas de tal manera que se evite la inestabilidad local, el pandeo lateral y la inestabilidad por compresión axial, se tendrán secciones capaces de desarrollar su capacidad de momento plástico reducido por la presencia de la fuerza axial y sólo se revisará que las secciones cumplan las ecuaciones de interacción por resistencia en los extremos y por inestabilidad de la columna completa, lo cual es completamente preferible.

El diseño de columnas de marcos rígidos regulares (cabe aclarar que esta clasificación es distinta de aquella en la cual se revisan las Condiciones de Regularidad indicadas en las NTC por Sismo 1995, es decir, una estructura es “regular” si está compuesta por un conjunto de marcos planos cuya geometría no difiere sustancialmente de unos a otros, paralelos y ligados entre sí en todos los niveles, por un sistema de piso de resistencia y rigidez suficientes para obligar a que todos los marcos trabajen en conjunto para soportar las fuerzas laterales, clasificación definida en las NTC- Metálicas 1995), puede llevarse a cabo sin considerar los efectos de esbeltez debidos a desplazamientos lineales de sus extremos (es decir, sin tener en cuenta efectos geométricos de segundo orden) cuando las columnas forman parte de un entrepiso en el que se satisface la relación:

$$\frac{\delta}{H} \leq 0.08 \frac{V}{W} \quad (3.11)$$

donde δ es el desplazamiento horizontal relativo “real” de los niveles que limitan el entrepiso, H la altura de entrepiso, V la fuerza cortante de entrepiso y W la suma de cargas de diseño (cargas muertas y cargas vivas factorizadas) acumuladas desde el entrepiso superior hasta el entrepiso considerado; si las fuerzas horizontales de diseño son producidas por sismo, y se han calculado con valores reducidos, teniendo en cuenta el factor de comportamiento sísmico Q , los desplazamientos obtenidos en el análisis deben multiplicarse por Q antes de utilizarlos en la expresión anterior. Cuando los efectos de esbeltez producidos por los desplazamientos laterales de los entrepisos no son significativos, es conservador utilizar en el diseño un factor de longitud efectiva $K = 1.0$, sin embargo el valor real es menor (De Buen, 1993). En la Tabla 3.9 se muestra

el cálculo de los efectos de esbeltez, en la cual se verifica que no son significativos los efectos de segundo orden. En el análisis estructural del marco convencional que se realizó con el programa SAP-90, también se incluyó el efecto P- Δ y se determinó que es despreciable.

Tabla 3.9 Estimación de los efectos de esbeltez.

Nivel	Altura H (cm)	Desplaza. Relativo $\delta_{rel} * Q$ (cm)	Fuerza Cortante V_i (ton)	Peso W_i (ton)	Peso W_i acum (ton)	$\delta_{rel} * Q/H$	$0.08V_i/W_i$
20	300	2.22	24.13	103.849	103.849	0.00740	0.01859
19	300	2.44	55.02	130.356	234.205	0.00813	0.01879
18	300	2.69	82.08	130.752	364.957	0.00897	0.01799
17	300	2.94	107.09	131.148	496.105	0.00980	0.01727
16	300	3.16	131.06	130.940	627.045	0.01053	0.01672
15	300	3.34	151.06	131.336	758.381	0.01113	0.01593
14	300	3.44	170.39	131.732	890.113	0.01147	0.01531
13	300	3.46	188.09	131.732	1,021.845	0.01153	0.01473
12	300	3.43	204.42	132.608	1,154.453	0.01143	0.01417
11	300	3.45	220.14	133.004	1,287.458	0.01150	0.01368
10	300	3.47	233.04	133.004	1,420.462	0.01157	0.01312
9	300	3.46	245.52	134.984	1,555.447	0.01153	0.01263
8	300	3.43	256.74	136.964	1,692.411	0.01143	0.01214
7	300	3.38	266.44	136.964	1,829.375	0.01127	0.01165
6	300	3.25	275.03	137.426	1,966.802	0.01083	0.01119
5	300	3.06	281.14	137.888	2,104.690	0.01020	0.01069
4	300	2.79	285.97	137.750	2,242.440	0.00930	0.01020
3	300	2.38	289.20	138.078	2,380.518	0.00793	0.00972
2	300	1.74	290.95	138.540	2,519.058	0.00580	0.00924
1	350	0.85	291.55	140.608	2,659.666	0.00243	0.00877

En el apéndice B también se presenta el diagrama de flujo desarrollado para llevar a cabo la revisión por flexocompresión uniaxial de las columnas, primero se muestra el diagrama de flujo para la revisión por inestabilidad ante carga de compresión axial y posteriormente el diagrama de flujo para el diseño por flexocompresión de las columnas.

Adicionalmente, se presenta en el apéndice B en un diagrama de flujo la secuencia de diseño para la revisión del pandeo de conjunto de un entrepiso ante la acción de cargas verticales. Este estado límite de falla es función de la rigidez lateral de entrepiso y es necesario verificarlo tal y como lo especifican las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas 1995, este método se comparó con el criterio que propone De Buen (De Buen, 1993) para el cálculo y revisión del pandeo de conjunto. En la Tabla 3.10 se muestra la valuación del pandeo de conjunto de cada entrepiso según las NTC-Metálicas 1995, los resultados obtenidos con los dos métodos son muy similares y por lo tanto se verificó que no es crítico el pandeo de conjunto.

Tabla 3.10 Valuación del pandeo de conjunto de entrepiso según las NTC-Metálicas 1995.

N	H (cm)	Sección Columna d x b _f (cm)	Placa t _w y t _f (cm)	Area (cm ²)	P _v (ton)	Rigidez K _T (ton/cm)	Σ(P _v) (ton)	Σ(P _v)/2 (ton)	$P_{crit} = \frac{F_r K_T H}{1.2}$ (ton)	P _{crit} (ton)	Σ(P _u) (ton)	P _{crit} /ΣP _u >2.5
20	300	110X110	3.81	1618	4094	26.0	16377	8188.8	5859.0	3515.4	59.2	59.3
19	300	110X110	3.81	1618	4094	54.1	16377	8188.8	12177.0	10279.3	126.8	81.0
18	300	115X115	3.81	1694	4287	73.2	17148	8574.4	16488.0	11822.0	195.4	60.5
17	300	115X115	3.81	1694	4287	87.5	17148	8574.4	19696.5	12410.4	264.0	47.0
16	300	115X115	3.81	1694	4287	99.5	17148	8574.4	22396.5	12774.9	332.5	38.4
15	300	120X120	3.81	1770	4480	108.6	17919	8959.9	24450.7	13468.3	401.9	33.5
14	300	120X120	3.81	1770	4480	118.8	17919	8959.9	26748.0	13696.7	471.3	29.1
13	300	120X120	3.81	1770	4480	130.6	17919	8959.9	29389.5	13915.2	540.7	25.7
12	300	125X125	3.81	1846	4672	142.9	18691	9345.5	32163.7	14622.3	611.3	23.9
11	300	125X125	3.81	1846	4672	153.2	18691	9345.5	34476.7	14769.9	681.9	21.7
10	300	125X125	3.81	1846	4672	161.0	18691	9345.5	36245.2	14870.0	752.5	19.8
9	300	130X130	4.44	2229	5641	170.1	22567	11283.5	38274.7	17615.9	824.1	21.4
8	300	130X130	4.44	2229	5641	179.5	22567	11283.5	40396.5	17757.4	895.7	19.8
7	300	130X130	4.44	2229	5641	189.4	22567	11283.5	42617.2	17890.4	967.3	18.5
6	300	135X135	4.44	2318	5866	203.2	23465	11732.9	45726.7	18680.6	1039.9	18.0
5	300	135X135	4.44	2318	5866	220.7	23465	11732.9	49677.7	18874.5	1112.5	17.0
4	300	135X135	4.44	2318	5866	245.8	23465	11732.9	55309.5	19103.1	1185.0	16.1
3	300	140X140	4.44	2407	6091	292.1	24364	12182.2	65727.0	20099.0	1258.5	16.0
2	300	140X140	4.44	2407	6091	400.3	24364	12182.2	90087.7	20593.5	1332.0	15.5
1	350	140X140	4.44	2407	6091	825.1	24364	12182.2	216599.2	21372.9	1410.0	15.2

3.2.4.3 Estados límite de servicio

En lo que refiere a los estados límite de servicio, se revisaron únicamente dos estados límite de desplazamientos que son los siguientes (artículos 184 y 209 del R.C.D.F. 1993):

- 1) Para las trabes la flecha permisible esta en función de su claro y del peralte, el límite se cumple sí el desplazamiento vertical calculado es menor que la relación del claro entre 240 + 0.5 cm, es decir $\delta_{calculado} < \frac{L}{240} + 0.5 \text{ cm}$.
- 2) En el diseño sísmico de estructuras que no tienen muros de cortante ligados a la estructura principal, el desplazamiento relativo de entrepiso admisible debido a las fuerzas sísmicas de diseño es 0.012 la diferencia de elevaciones: $\delta_{perm} = 0.012 \cdot h$. El cumplimiento de este requerimiento es muy importante en el diseño sísmico de edificios. Los desplazamientos relativos de entrepiso del marco convencional ante las fuerzas sísmicas de diseño cumplen absolutamente con los desplazamientos admisibles, en la Tabla 3.8 se muestran dichos desplazamientos.

3.2.5 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DEFINITIVAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Las características geométricas y mecánicas definitivas de las columnas y trabes que integran el marco convencional se presentan en la Tabla 3.11 y 3.12, la revisión de la capacidad de las secciones ante los estados límite de falla correspondientes explicados en la sección 3.2.2 se realizó con las ecuaciones que están integradas en los diagramas de flujo del apéndice B, en la Figura 3.7 se muestra el perfil IPR o W típico de las trabes y la sección de cuatro placas típica (sección en cajón) de las columnas. En la Figura 3.8 se muestra la distribución y numeración de los elementos estructurales del marco convencional para facilitar su identificación.

Tabla 3.11 Características geométricas y mecánicas de las columnas del marco convencional.

Nivel	Elemento	Sección Columna d x b _r (cm)	Placas t _w y t _f (cm)	Area A (cm ²)	Inercia I _x (cm ⁴)	Inercia I _y (cm ⁴)	Módulo elástico de sección S _x (cm ³)	Módulo plástico de sección Z _x (cm ³)	Constante de Torsión J (cm ⁴)
20	89 al 92	110 x 110	3.81	1618.3	3045393	3045393	55371	64472	4562200
19	85 al 88	110 x 110	3.81	1618.3	3045393	3045393	55371	64472	4562200
18	81 al 84	115 x 115	3.81	1694.5	3495751	3495751	60796	70683	5237500
17	77 al 80	115 x 115	3.81	1694.5	3495751	3495751	60796	70683	5237500
16	69 al 76	115 x 115	3.81	1694.5	3495751	3495751	60796	70683	5237500
15	65 al 68	120 x 120	3.81	1770.7	3988473	3988473	66475	77181	5976300
14	61 al 64	120 x 120	3.81	1770.7	3988473	3988473	66475	77181	5976300
13	57 al 60	120 x 120	3.81	1770.7	3988473	3988473	66475	77181	5976300
12	53 al 56	125 x 125	3.81	1846.9	4525464	4525464	72407	83964	6781500
11	45 al 52	125 x 125	3.81	1846.9	4525464	4525464	72407	83964	6781500
10	41 al 44	125 x 125	3.81	1846.9	4525464	4525464	72407	83964	6781500
9	37 al 40	130 x 130	4.44	2229.9	5866625	5866625	90256	105041	8788900
8	33 al 36	130 x 130	4.44	2229.9	5866625	5866625	90256	105041	8788900
7	29 al 32	130 x 130	4.44	2229.9	5866625	5866625	90256	105041	8788900
6	21 al 28	135 x 135	4.44	2318.7	6595141	6595141	97706	113570	9881300
5	17 al 20	135 x 135	4.44	2318.7	6595141	6595141	97706	113570	9881300
4	13 al 16	135 x 135	4.44	2318.7	6595141	6595141	97706	113570	9881300
3	9 al 12	140 x 140	4.44	2407.5	7381626	7381626	105452	122431	11061000
2	5 al 8	140 x 140	4.44	2407.5	7381626	7381626	105452	122431	11061000
1	1 al 4	140 x 140	4.44	2407.5	7381626	7381626	105452	122431	11061000

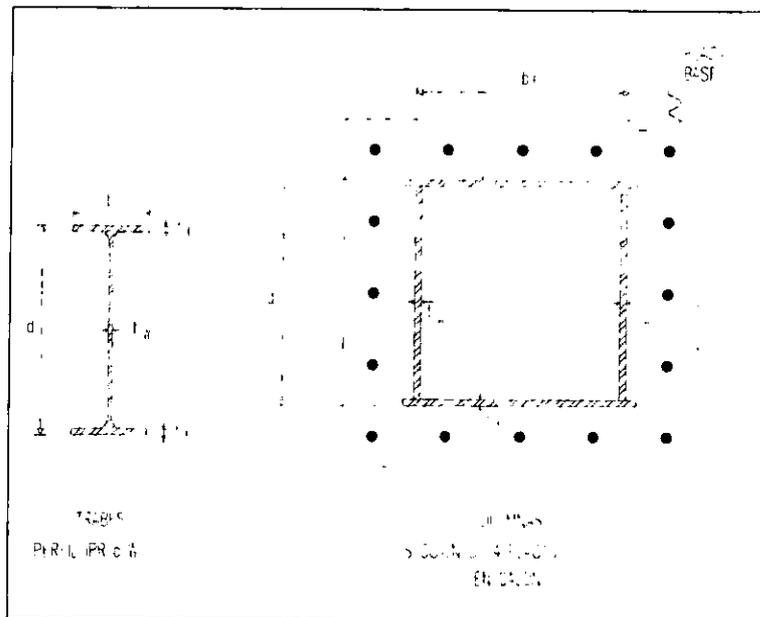


Figura 3.7 Secciones típicas de las traves y columnas del marco convencional.

Tabla 3.12 Características geométricas y mecánicas de las trabes del marco convencional.

Nivel	Elemento	Perfil IPR o W d x peso (mm x kg/m)	Area A (cm ²)	Inercia I _x (cm ⁴)	Inercia I _y (cm ⁴)	Módulo plástico de sección Z _x (cm ³)	Constante de torsión J (cm ⁴)	Constante de alabeo C _a (cm ⁶)
20	207 al 212	406 x 148.9	189.7	62018	7742	3245	321.7	3195576.8
19	201 al 206	406 x 148.9	189.7	62018	7742	3245	321.7	3195576.8
18	195 al 200	406 x 148.9	189.7	62018	7742	3245	321.7	3195576.8
17	189 al 194	406 x 148.9	189.7	62018	7742	3245	321.7	3195576.8
16	183 al 188	457 x 144.3	183.9	72840	8366	3458	244	4242866.7
15	177 al 182	457 x 144.3	183.9	72840	8366	3458	244	4242866.7
14	171 al 176	457 x 144.3	183.9	72840	8366	3458	244	4242866.7
13	165 al 170	457 x 144.3	183.9	72840	8366	3458	244	4242866.7
12	159 al 164	610 x 155.0	197.4	129031	10780	4736	196	9452462.5
11	153 al 158	610 x 155.0	197.4	129031	10780	4736	196	9452462.5
10	147 al 152	610 x 155.0	197.4	129031	10780	4736	196	9452462.5
9	141 al 146	610 x 155.0	197.4	129031	10780	4736	196	9452462.5
8	135 al 140	610 x 155.0	197.4	129031	10780	4736	196	9452462.5
7	129 al 134	610 x 155.0	197.4	129031	10780	4736	196	9452462.5
6	123 al 128	610 x 155.0	197.4	129031	10780	4736	196	9452462.5
5	117 al 122	610 x 155.0	197.4	129031	10780	4736	196	9452462.5
4	111 al 116	686 x 151.9	193.6	150675	5786	4998	220	6444860.8
3	105 al 110	406 x 148.9	189.7	62018	7742	3245	321.7	3195576.8
2	99 al 104	406 x 148.9	189.7	62018	7742	3245	321.7	3195576.8
1	93 al 98	406 x 148.9	189.7	62018	7742	3245	321.7	3195576.8

3.3 ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MARCO CON DISIPADORES

El método de diseño del marco con disipadores contiene tres fases principales y consiste en lo siguiente:

- 1) Se analiza la estructura convencional para después convertirla en una estructura con disipadores.
- 2) Se disminuyen las secciones transversales de las trabes y columnas de la estructura convencional hasta obtener una estructura con rigidez K_{sd} denominada marco sin disipadores en función del parámetro α_1 .

- 3) Se incorporan los disipadores a la estructura obtenida en el paso anterior para que aporten la rigidez K_d necesaria para complementar la rigidez total K_T .

Al final la estructura convencional y la estructura con disipadores deberán tener el mismo período de vibración, es decir $T=1.9$ segundos.

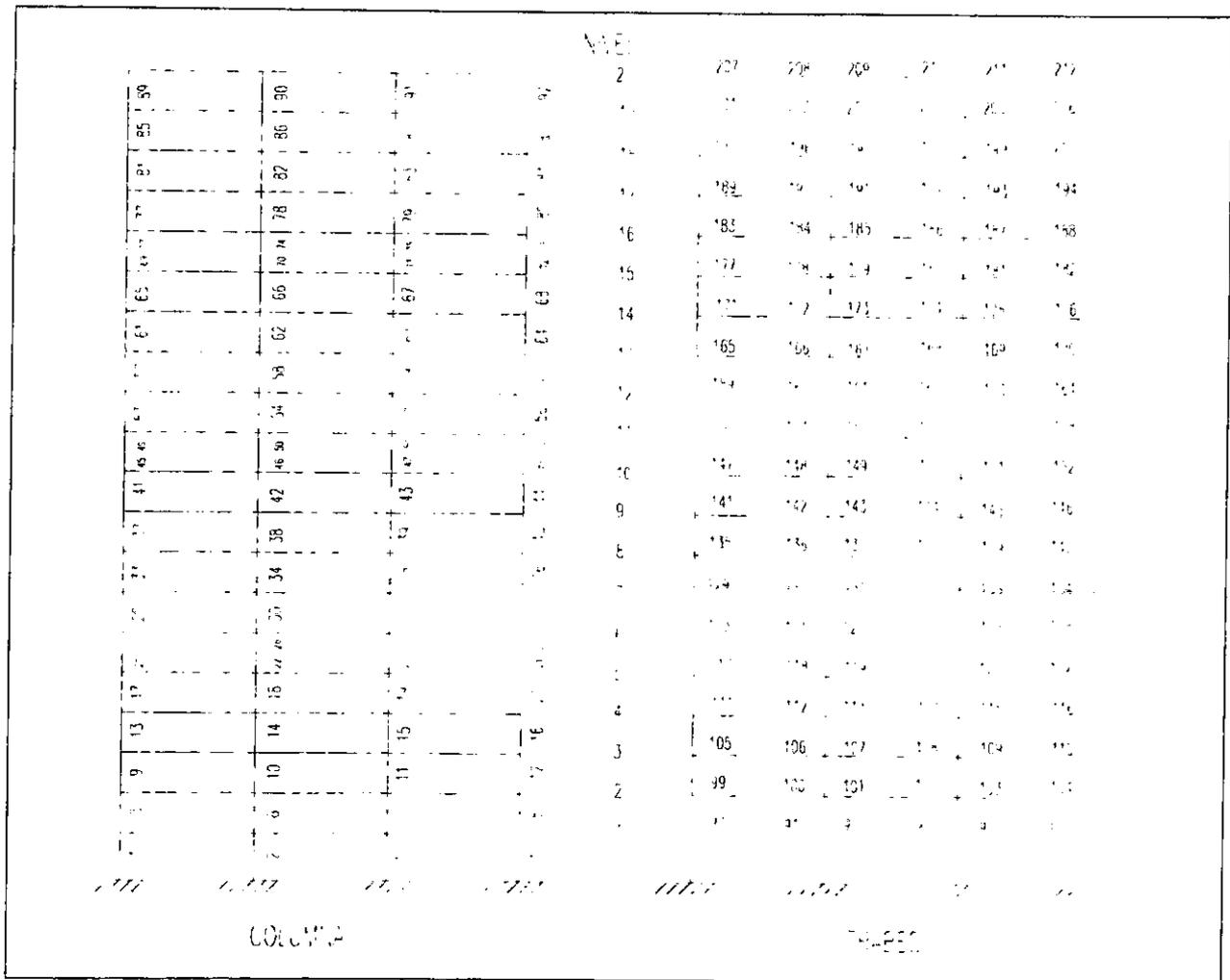


Figura 3.8 Distribución y numeración de elementos estructurales del marco convencional.

Durante el proceso de dimensionamiento del marco con disipadores se incluye el cálculo de:

- a) Rigideces laterales de entrepiso de la estructura sin disipadores K_{sd} .

- b) Propiedades mecánicas de los dispositivos disipadores TADAS.
- c) Rigidez lateral de entrepiso real de los disipadores TADAS.
- d) Propiedades geométricas definitivas de los dispositivos disipadores TADAS.

Enseguida se procede con cada una de las etapas del proceso de dimensionamiento y diseño del marco con disipadores que se describió en el capítulo 2. Primeramente se calcularán las dimensiones de los elementos estructurales basándose en el diseño definitivo del marco convencional, así mismo se estimarán las características geométricas y mecánicas de los dispositivos disipadores de energía sísmica tipo TADAS.

3.3.1 ELECCION DEL ARREGLO DE LOS DISIPADORES

Inicialmente se estimó conveniente que los elementos disipadores TADAS se ubicaran en la crujía central del marco en toda su altura (Figura 3.9), esta distribución espacial se denomina "Marco con disipadores TADAS simple", sin embargo debido a los resultados del diseño de este marco se optó por otra alternativa en la ubicación y arreglo de los dispositivos, dicho arreglo espacial se denomina "Marco con disipadores TADAS doble", el cual se explicará más adelante.

3.3.2 PREDIMENSIONAMIENTO DEL MARCO CON DISIPADORES

En el capítulo 2 se vio que el sistema estructural del marco con disipadores está compuesto por un marco denominado marco sin disipadores cuya rigidez lateral K_{sd} es α_1 veces la rigidez lateral del marco convencional y por el sistema disipador TADAS que aporta el complemento de la rigidez lateral K_d (Figura 2.1), que se necesita para que el marco con disipadores tenga la misma rigidez lateral del marco convencional, es decir:

$$K_T = K_{sd} + K_d = \alpha_1 K_T + \alpha_2 K_T$$

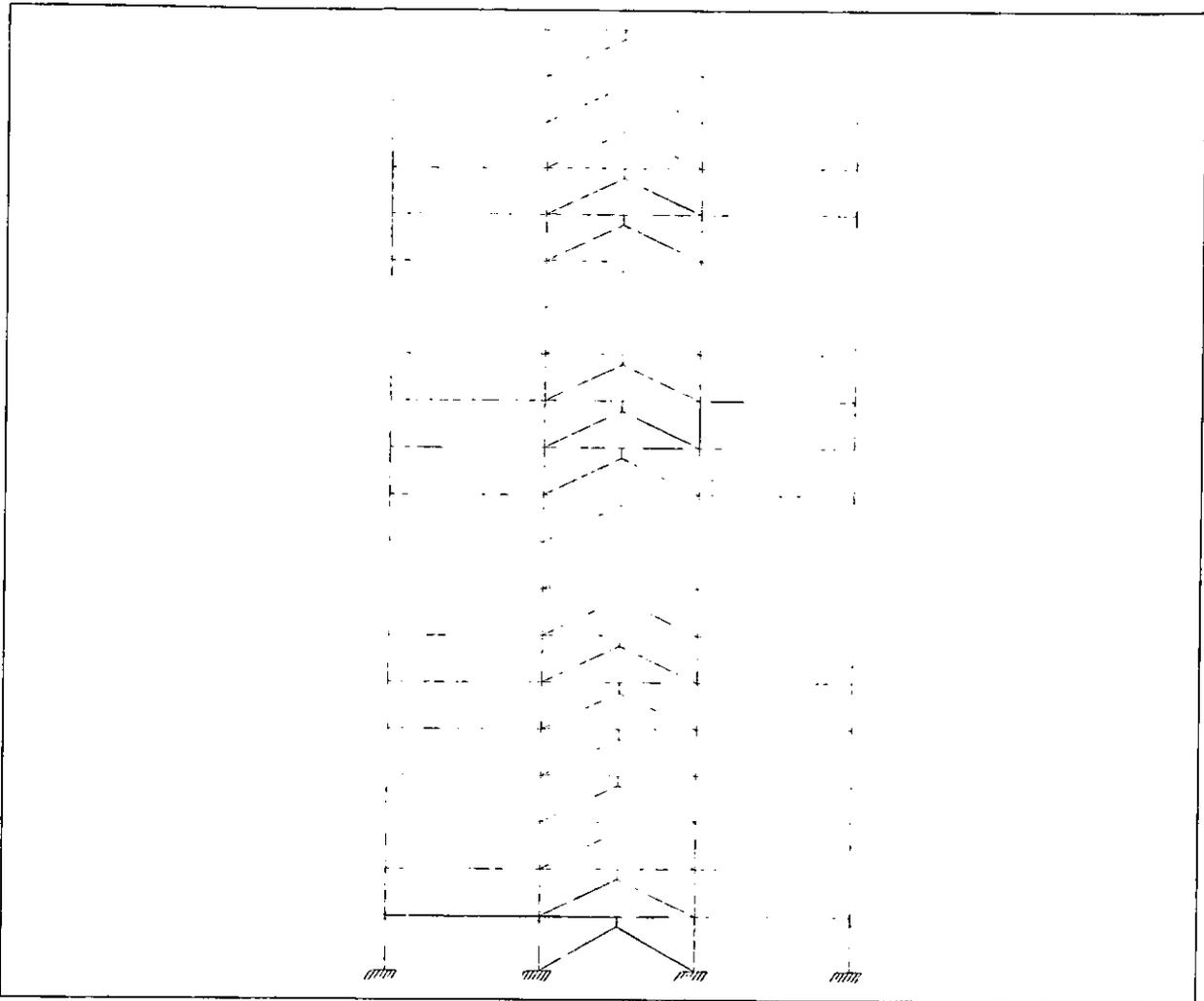


Figura 3.9 Marco con disipadores TADAS simple.

3.3.2.1 Estimación de los pesos de cada nivel

Las intensidades de carga de diseño son las mismas intensidades que se utilizaron para el diseño del marco convencional, lo único que se requiere es actualizar el peso propio producto de los elementos estructurales del marco con disipadores. Estos pesos se corrigen internamente dentro del programa SAP-90 ingresando los datos del peso y masa por metro lineal de los miembros estructurales.

3.3.2.2 Estimación de las rigideces laterales de entrepiso K_T

La estructura con disipadores se dimensiona a partir del marco convencional, cuyas secciones transversales se presentaron en la Tabla 3.11 y 3.12. En particular cabe señalar que en este método de diseño del marco con disipadores se parte de una estructura analizada y diseñada convencionalmente con la finalidad de obtener sus mismas características (período de vibración y la rigidez lateral de entrepiso) para fines comparativos.

Por esta razón, las rigideces laterales de entrepiso del marco con disipadores son las del marco convencional, mostradas dentro del inciso 3.2.3 en la Tabla 3.8.

3.3.2.3 Definición del valor de los factores α_1 y α_2

El marco con disipadores a diseñar está compuesto por el marco sin disipadores el cual aporta el 25% de la rigidez lateral total y el sistema disipador TADAS que suministra el 75% de la rigidez lateral de entrepiso, es decir:

$$\alpha_1 = 0.25 \text{ y } \alpha_2 = 0.75$$

3.3.2.4 Determinación de las secciones de traveses y columnas del marco con disipadores

Las dimensiones de las columnas del marco con disipadores se calculan con la siguiente expresión (ecuación 2.3):

$$L_d = \sqrt[3]{\frac{A}{18} \left[\frac{\sqrt{2} e^2}{3 A} + e \right]}$$

donde A esta definido por la expresión 2.4.

Las dimensiones de las trabes del marco con disipadores se obtienen en función de las dimensiones de las trabes del marco convencional reduciendo proporcionalmente el momento de inercia, es decir que la inercia sea aproximadamente el 25% de la inercia de las trabes del marco convencional ya que el factor $\alpha_1=0.25$, finalmente el momento de inercia obtenido se deberá ajustar a la inercia de un perfil estructural comercial.

Las dimensiones de las columnas del marco con disipadores se obtienen al sustituir las dimensiones de las secciones correspondientes del marco convencional de la Tabla 3.8 en las expresiones 2.3 a 2.6. Las dimensiones calculadas empleando dichas ecuaciones se modifican ligeramente ya que se deben ajustar a un tamaño comercial. Por esta razón el factor α_1 de la Tabla 3.14 no es exactamente igual a 0.25. En la Tabla 3.13 se muestran las dimensiones de las columnas del marco con disipadores. También se muestran los perfiles estructurales de las trabes del marco con disipadores.

Tabla 3.13 Secciones transversales de columnas y trabes del marco con disipadores.

SECCIONES DE COLUMNAS Y TRABES DEL MARCO CON DISIPADORES				
Nivel	Columnas		Trabes Principales	Trabes Secundarias
	Sección d x b _f (cm)	Espesor placas t _w y t _f (mm)	Perfil IPR* o W d x peso (mm x kg/m)	perfil IPR* o W d x peso (mm x kg/m)
19 y 20	70 x 70	38	406 x 46.2	356 x 38.9
17 y 18	75 x 75	38	406 x 46.2	356 x 38.9
16	75 x 75	38	406 x 53.7	356 x 38.9
13 al 15	75 x 75	38	406 x 53.7	356 x 38.9
10 al 12	80 x 80	38	457 x 74.5	356 x 38.9
7 al 9	85 x 85	44	457 x 74.5	356 x 38.9
5 y 6	85 x 85	44	457 x 74.5	356 x 38.9
4	85 x 85	44	533 x 74.4	356 x 38.9
1 al 3	90 x 90	44	406 x 46.2	356 x 38.9

d: peralte de la sección. b_f: ancho del patín. t_w: espesor de la placa del alma. t_f: espesor de la placa del patín. * Perfil IPR designación del manual IMCA

3.3.2.5 Obtención de la rigidez lateral K_{sd} que aporta el marco sin disipadores

Se procede a efectuar un análisis estructural del marco sin disipadores para calcular la rigidez de entrepiso K_{sd} . Para el análisis se utiliza nuevamente el programa SAP-90, las rigideces laterales se obtienen dividiendo la fuerza cortante sísmica que actúa en un entrepiso determinado entre el desplazamiento relativo de dicho entrepiso. En la Tabla 3.14 se presentan los desplazamientos máximos que se obtuvieron del análisis, así como la rigidez lateral calculada y el factor α_1 .

Tabla 3.14 Rigideces laterales de entrepiso K_{sd} del marco sin disipadores.

Nivel	Fuerza Sísmica F_i (ton)	Cortante Sísmico V_i (ton)	Desplazam. Máximo δ máx (cm)	Desplazam. Relativo δ relativo (cm)	Rigidez Lateral K_{sd} (ton/cm)	Rigidez Lateral K_T (ton/cm)	Factor α_1
20	72.4	72.4	288.165	11.177	6.48	26.04	0.249
19	92.66	165.06	276.988	12.255	13.47	54.12	0.249
18	81.17	246.23	264.733	13.479	18.27	73.28	0.249
17	75.03	321.26	251.254	14.615	21.98	87.54	0.251
16	71.92	393.18	236.639	15.665	25.10	99.54	0.252
15	59.99	453.17	220.974	16.537	27.40	108.67	0.252
14	58.01	511.18	204.437	17.067	29.95	118.88	0.252
13	53.11	564.29	187.370	17.074	33.05	130.62	0.253
12	48.96	613.25	170.295	16.885	36.32	142.95	0.254
11	47.18	660.43	153.410	16.947	38.97	153.23	0.254
10	38.71	699.14	136.463	17.046	41.02	161.09	0.255
9	37.44	736.58	119.418	17.009	43.31	170.11	0.255
8	33.65	770.23	102.409	16.921	45.52	179.54	0.254
7	29.1	799.33	85.489	16.631	48.06	189.41	0.254
6	25.78	825.11	68.857	16.045	51.42	203.23	0.253
5	18.31	843.42	52.812	15.048	56.05	220.79	0.254
4	14.51	857.93	37.764	13.658	62.82	245.82	0.256
3	9.67	867.6	24.107	11.605	74.76	292.12	0.256
2	5.25	872.85	12.501	8.462	103.15	400.39	0.258
1	1.81	874.66	4.039	4.039	216.55	825.14	0.262

3.3.2.6 Cálculo de la rigidez lateral de entrepiso K_d que proporciona el sistema disipador TADAS

Esta es la rigidez lateral que necesita poseer el sistema disipador TADAS con el fin de que el período fundamental de vibración del marco TADAS simple sea idéntico al del marco convencional ($T=1.9$ segundos). Las rigideces laterales del sistema disipador TADAS se calculan con la expresión 2.7:

$$K_d = K_T - K_{sd}$$

Estas rigideces laterales se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Rigideces laterales de entrepiso K_d del sistema disipador.

Nivel	Rigidez Lateral Marco convencional K_T (ton/cm)	Rigidez Lateral Marco sin disipadores K_{sd} (ton/cm)	Rigidez Lateral Sistema disipador $K_d = K_T - K_{sd}$ (ton/cm)
20	26.04	6.48	19.56
19	54.12	13.47	40.65
18	73.28	18.27	55.02
17	87.54	21.98	65.56
16	99.54	25.10	74.44
15	108.67	27.40	81.27
14	118.88	29.95	88.93
13	130.62	33.05	97.57
12	142.95	36.32	106.63
11	153.23	38.97	114.26
10	161.09	41.02	120.07
9	170.11	43.31	126.80
8	179.54	45.52	134.02
7	189.41	48.06	141.35
6	203.23	51.42	151.80
5	220.79	56.05	164.74
4	245.82	62.82	183.01
3	292.12	74.76	217.36
2	400.39	103.15	297.24
1	825.14	216.55	608.60

Para lograr aproximarse a esta rigidez lateral del sistema disipador K_d , se requiere modificar la rigidez K_{TADAS} , la cual se obtiene en función de la geometría de las placas de acero TADAS. Es decir, durante el curso del proceso de dimensionamiento del dispositivo disipador TADAS se va modificando el número y la geometría de las placas triangulares de acero que integran el sistema disipador TADAS hasta lograr que el período de vibración del marco con disipadores TADAS simple sea igual al del marco convencional.

3.3.3 PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISIPADORES TADAS

Inicialmente se proponen las dimensiones de las placas y en función de la geometría de las placas triangulares de acero se puede obtener la rigidez lateral elástica del dispositivo disipador TADAS, tal rigidez se calcula con la expresión 2.11:

$$K_{TADAS} = \frac{NEbt^3}{6h^3}$$

la rigidez lateral teórica calculada con la expresión anterior se requiere para poder determinar las propiedades geométricas de un elemento prismático que sea equivalente al disipador.

Con el fin de modelar los disipadores TADAS en el programa de cómputo SAP-90, se considera el tamaño real de las placas triangulares de acero, es decir se considera que existe una zona rígida en las trabes que se conectan con los elementos disipadores, esta zona rígida tiene una longitud que se inicia a partir del eje de intersección de estos dos miembros hasta el punto de conexión con la placa base en la cual se tienen soldadas las placas triangulares TADAS. Adicionalmente se procede a calcular las propiedades geométricas del elemento prismático que sea equivalente al dispositivo disipador TADAS, es decir calcular el momento de inercia equivalente del elemento prismático con la expresión 2.14:

$$I_{equiv} = \frac{K_{TADAS} h^3}{3E}$$

En la Tabla 3.16 se muestra la propuesta inicial de la geometría de las placas y el momento de inercia equivalente del elemento prismático, también se muestra el momento de fluencia del elemento disipador.

Tabla 3.16 Predimensionamiento y momentos de inercia de los dispositivos disipadores TADAS del marco TADAS simple.

Nivel	Número De placas N	b (cm)	t (cm)	h TADAS (cm)	Relación (h/t)	K TADAS (ton/cm)	I equiv (cm ⁴)	M _y (ton-m)
20	4	10	3.81	32.5	8.53	21.91	149.33	2.61
19	8	10	3.81	32.5	8.53	43.82	298.66	5.23
18	10	10	3.81	32.5	8.53	54.78	373.33	6.53
17	8	10	4.44	32.5	7.32	69.35	472.67	7.10
16	7	13	4.44	32.5	7.32	78.89	537.66	8.07
15	7	13	4.44	32.5	7.32	78.89	537.66	8.07
14	5	13	5.08	32.5	6.40	84.40	575.20	7.55
13	5	13	5.08	32.5	6.40	84.40	575.20	7.55
12	5	15	5.08	32.5	6.40	97.38	528.28	8.07
11	6	15	5.08	32.5	6.40	116.86	633.94	9.69
10	6	15	5.08	32.5	6.40	116.86	633.94	9.69
9	6	15	5.08	32.5	6.40	116.86	633.94	9.69
8	7	15	5.08	32.5	6.40	136.34	739.60	11.30
7	7	15	5.08	32.5	6.40	136.34	739.60	11.30
6	8	15	5.08	32.5	6.40	155.81	845.25	12.91
5	8	15	5.08	32.5	6.40	155.81	845.25	12.91
4	6	12	6.35	32.5	5.12	182.59	696.79	10.77
3	9	10	6.35	32.5	5.12	228.24	1555.53	16.33
2	10	10	6.35	30.5	4.80	306.83	2091.16	19.33
1	13	10	7.62	30.5	4.00	689.27	4697.57	36.19

También se proponen los perfiles estructurales de las diagonales del sistema disipador, como se vio en el capítulo 2 inciso 2.6.8 estos elementos están articulados en ambos extremos y deberán tener la capacidad suficiente para que su resistencia de diseño sea mayor que la fuerza actuante de tensión o compresión. Se propone que cada diagonal este compuesta por 2 perfiles WT 7x60 espalda con espalda (2 TR 178 mm x 89.6 kg/m). El área de cada diagonal es de 228.39 cm².

3.3.3.1 Análisis del marco con disipadores

Ya que se tienen las dimensiones de los elementos estructurales (Tabla 3.13), de los disipadores (Tabla 3.16) y de las diagonales se procede a realizar el primer análisis estructural del marco TADAS simple. También se revisa el período de vibración y los desplazamientos laterales inducidos por las solicitaciones de diseño.

Dentro del proceso de análisis del marco con disipadores se considera que el marco sin disipadores debe ser capaz de resistir las cargas gravitacionales (cargas muertas y cargas vivas) y que el sistema disipador TADAS debe soportar los efectos que le son inducidos por las acciones sísmicas. Para ello se realizan dos tipos de análisis con las siguientes combinaciones de acciones:

1) El primer análisis es para el marco sin disipadores ante las combinaciones de cargas gravitacionales siguientes:

I) 1.4 (C.M. + C.V. máx)

II) 1.1 (C.M. + C.V. inst)

2) El segundo análisis consiste en someter al marco con disipadores únicamente a la acción sísmica horizontal:

III) 1.1 (Sismo)

Las fuerzas sísmicas de diseño se obtienen al realizar un análisis dinámico modal espectral utilizando el espectro de diseño de la Zona Sísmica III del Distrito Federal. El coeficiente sísmico es $c=0.4$, y debido a que no se permiten deformaciones inelásticas de los elementos estructurales del marco con disipadores (trabes y columnas), las ordenadas espectrales no se reducen y el factor de comportamiento sísmico es $Q=1$, sin embargo el marco con disipadores no cumple el segundo requisito de las Condiciones de Regularidad de las NTC por Sismo y el factor resulta $Q=0.8$.

Finalmente se suman los efectos de las combinaciones de carga II y III para obtener la combinación que incluye acciones permanentes, acciones variables y acciones accidentales. Las columnas se diseñan con la envolvente de cargas verticales y fuerzas horizontales combinadas y las trabes con la envolvente de elementos mecánicos de las tres combinaciones de carga.

3.3.4 CAMBIO DE PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LOS DISIPADORES Y DE LAS DIAGONALES

Una vez que se realiza el primer análisis del marco con disipadores se revisan los desplazamientos laterales y se obtiene el valor del período fundamental de vibración T_d , y se compara contra el período del marco convencional ($T_c=1.9$ segundos). De no resultar iguales los períodos de vibración se modifican las propiedades geométricas del dispositivo disipador en función de la geometría o del número de placas triangulares de acero del dispositivo TADAS. El proceso a seguir es el siguiente:

a) Se calcula la rigidez lateral total del marco con disipadores K_T con las fuerzas cortantes sísmicas y desplazamientos que resultaron del primer análisis, se determina la rigidez lateral real que aporta el sistema disipador denominada:

$$K_{d(\text{actual})} = K_T - K_{sd}$$

K_{sd} es la rigidez del marco sin disipadores obtenida en el inciso 3.3.2.5.

b) $K_{d(\text{actual})}$ se compara contra la rigidez que debe suministrar el sistema disipador K_d (esta rigidez es la rigidez obtenida en el inciso 3.3.2.6).

c) Se revisa si el período T_d es igual al período T_c , de no ser así se debe corregir el número de placas N , con la siguiente expresión (ecuación 2.17):

$$N_{\text{actual}} = \frac{K_d}{K_{d(\text{actual})}} N_{\text{anterior}}$$

El proceso es iterativo y se detiene hasta que N_{actual} es similar a $N_{anterior}$. Para diseñar el marco con disipadores se hicieron múltiples iteraciones modificando el número y las dimensiones de las placas triangulares de acero de los disipadores TADAS, procediendo a realizar el análisis estructural respectivo para obtener los desplazamientos y el valor del período de vibración en cada iteración. Es importante mencionar que durante el proceso iterativo del análisis estructural, también se modificó la rigidez axial de las diagonales de contraventeo, sin embargo se observó que si se incrementa o se disminuye el área axial de estos elementos, no se modifica en forma notable los desplazamientos laterales ni el período de vibración. Por lo tanto la rigidez de las diagonales no es un factor importante que influya en la rigidez lateral del marco con disipadores. La hipótesis simplificadora que se realizó en la sección 2.6.6 del capítulo 2, la cual consiste en despreciar la rigidez axial de las diagonales al estimar la rigidez lateral del sistema disipador TADAS resulta adecuada y es aceptable.

En la Tabla 3.17 se muestran las propiedades geométricas de los disipadores para la segunda iteración y en la Tabla 3.21 se muestran las propiedades geométricas definitivas de los dispositivos disipadores TADAS. Con estas últimas se logra que el período de vibración del marco con disipadores TADAS simple sea $T_d=1.9$ segundos.

Tabla 3.17 Propiedades geométricas de los disipadores TADAS para la segunda iteración.

Nivel	Número de placas N	b (cm)	t (cm)	h TADAS (cm)	Relación (h/t)	K TADAS (ton/cm)	I equiv (cm ⁴)	M _v (ton-m)
20	6	10	3.81	32.5	8.53	32.87	224.00	3.92
19	11	10	3.81	32.5	8.53	60.26	410.66	7.18
18	12	10	3.81	32.5	8.53	65.73	447.99	7.84
17	14	10	4.44	32.5	7.32	121.37	827.16	12.42
16	12	13	4.44	32.5	7.32	135.24	921.70	13.84
15	15	13	4.44	32.5	7.32	169.05	1152.12	17.30
14	18	13	5.08	32.5	6.40	303.83	2070.72	27.17
13	20	13	5.08	32.5	6.40	337.59	2300.80	30.19
12	16	15	5.08	32.5	6.40	311.62	1690.51	25.83
11	14	15	5.08	32.5	6.40	272.67	1479.20	22.60
10	11	15	5.08	32.5	6.40	214.24	1162.22	17.76
9	8	15	5.08	32.5	6.40	155.81	845.25	12.91
8	9	15	5.08	32.5	6.40	175.29	950.91	14.53

Tabla 3.17 (continuación).

Nivel	Número de placas N	b (cm)	t (cm)	h _{TADAS} (cm)	Relación (h/t)	K _{TADAS} (ton/cm)	I _{equiv} (cm ⁴)	M _y (ton-m)
7	9	15	5.08	32.5	6.40	175.29	950.91	14.53
6	10	15	5.08	32.5	6.40	194.77	1056.57	16.14
5	9	15	5.08	32.5	6.40	175.29	950.91	14.53
4	5	12	6.35	32.5	5.12	152.16	580.66	8.97
3	10	10	6.35	32.5	5.12	253.60	1728.37	18.14
2	12	10	6.35	30.5	4.80	368.20	2509.39	23.20
1	15	10	7.62	30.5	4.00	795.31	5420.28	41.76

Aquí termina el proceso de dimensionamiento del marco con disipadores TADAS simple, ahora se procede a revisar la capacidad de las secciones ante los estados límite de falla.

3.3.5 REVISIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE DE FALLA Y DE SERVICIO

La revisión de los elementos estructurales que componen el marco con disipadores TADAS simple ante los estados límite de falla se realizó utilizando los programas codificados en lenguaje BASIC, cuyos diagramas de flujo se muestran en el apéndice B. Los programas mencionados contemplan las ecuaciones aplicables de diseño así como las especificaciones establecidas por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas 1995. Los estados límite de falla que se aplicaron a los miembros estructurales del marco con disipadores TADAS simple se explicaron en el inciso 3.2.4. Todos los miembros estructurales cumplen con dichos estados límite a excepción de dos columnas. Más adelante se explica la solución adoptada. Por otra parte la resistencia que suministran los dispositivos disipadores TADAS es función de su efectividad estructural y su diseño queda regido, en esta tesis, por el cumplimiento de los desplazamientos laterales.

Los desplazamientos relativos de entrepiso del marco con disipadores TADAS simple se presentan en la Tabla 3.18. En ella, también se muestran las fuerzas sísmicas, los cortantes sísmicos y las rigideces laterales de entrepiso. Obsérvese que los desplazamientos relativos de entrepiso son menores que el desplazamiento admisible.

Tabla 3.18 Rigideces laterales de entrepiso definitivas del marco con disipadores TADAS simple.

Nivel	Fuerza Sismica F_i (ton)	Cortante Sismico V_i (ton)	Desplazam. Máximo δ máx (cm)	Desplazam. Relativo δ relativo (cm)	Desplazam. Relativo δ rel*Q (cm)	Desplazam. Admisible δ admisible (cm)	Rigidez Lateral K_T (ton/cm)
20	73.06	73.06	69.43	3.09	2.47	3.6	23.65
19	81.33	154.39	66.34	3.37	2.69	3.6	45.85
18	75.00	229.39	62.97	3.61	2.89	3.6	63.59
17	68.74	298.13	59.37	3.71	2.97	3.6	80.33
16	62.96	361.08	55.66	3.75	3.00	3.6	96.39
15	57.40	418.49	51.91	3.80	3.04	3.6	110.27
14	52.76	471.25	48.11	3.81	3.05	3.6	123.57
13	48.45	519.70	44.30	3.77	3.02	3.6	137.77
12	45.15	564.85	40.53	3.67	2.94	3.6	153.87
11	41.81	606.65	36.86	3.72	2.97	3.6	163.30
10	38.41	645.06	33.14	3.78	3.02	3.6	170.80
9	35.31	680.36	29.37	3.79	3.03	3.6	179.71
8	31.95	712.32	25.58	3.79	3.03	3.6	188.03
7	28.24	740.56	21.79	3.77	3.02	3.6	196.33
6	24.26	764.82	18.02	3.74	2.99	3.6	204.77
5	20.04	784.85	14.29	3.64	2.92	3.6	215.36
4	15.60	800.46	10.64	3.48	2.78	3.6	230.12
3	10.81	811.27	7.16	3.24	2.59	3.6	250.44
2	6.19	817.46	3.92	2.56	2.05	3.6	318.97
1	2.26	819.72	1.36	1.36	1.09	4.2	602.73

3.3.6 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DEFINITIVAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Las características geométricas y mecánicas de los elementos estructurales que componen el marco con disipadores TADAS simple se presentan en la Tabla 3.19 y 3.20. Dichas características corresponden a los miembros estructurales que se obtuvieron en la sección 3.3.2.4 (ver Tabla 3.13).

Las propiedades geométricas definitivas de los dispositivos disipadores TADAS y de las diagonales de contraventeo se presentan en la Tabla 3.21 y 3.22 respectivamente. Las diagonales

están compuestas por 2 perfiles WT espalda con espalda con una separación de 25 mm. En la Figura 3.10 se muestra la distribución y numeración de los elementos estructurales, disipadores y diagonales del marco con disipadores TADAS simple.

El diseño del marco con disipadores TADAS simple ha finalizado, ya que se tienen las propiedades geométricas y mecánicas definitivas de los elementos estructurales, de los dispositivos disipadores TADAS y de las diagonales de contraventeo. Se cumple plenamente con los desplazamientos laterales, el período de vibración es el deseado, y finalmente se ha llevado a cabo la revisión de la resistencia de los elementos estructurales.

Tabla 3.19 Características geométricas y mecánicas de las columnas del marco con disipadores.

Nivel	Elemento	Sección Columna d x b _r (cm)	Placas t _w y t _r (cm)	Area A (cm ²)	Inercia I _x (cm ⁴)	Inercia I _y (cm ⁴)	Módulo Elástico de Sección S _x (cm ³)	Módulo Plástico de Sección Z _x (cm ³)	Constante de Torsión J (cm ⁴)
20	77 al 80	70 x 70	3.81	1008.7	739005	739005	21114	25066	1104800
19	73 al 76	70 x 70	3.81	1008.7	739005	739005	21114	25066	1104800
18	69 al 72	75 x 75	3.81	1084.9	919037	919037	24508	28991	1374600
17	65 al 68	75 x 75	3.81	1084.9	919037	919037	24508	28991	1374600
16	61 al 64	75 x 75	3.81	1084.9	919037	919037	24508	28991	1374600
15	57 al 60	75 x 75	3.81	1084.9	919037	919037	24508	28991	1374600
14	53 al 56	75 x 75	3.81	1084.9	919037	919037	24508	28991	1374600
13	49 al 52	75 x 75	3.81	1084.9	919037	919037	24508	28991	1374600
12	45 al 48	80 x 80	3.81	1161.1	1126192	1126192	28155	33203	1685100
11	41 al 44	80 x 80	3.81	1161.1	1126192	1126192	28155	33203	1685100
10	37 al 40	80 x 80	3.81	1161.1	1126192	1126192	28155	33203	1685100
9	33 al 36	85 x 85	4.44	1430.7	1552270	1552270	36524	43267	2321400
8	29 al 32	85 x 85	4.44	1430.7	1552270	1552270	36524	43267	2321400
7	25 al 28	85 x 85	4.44	1430.7	1552270	1552270	36524	43267	2321400
6	21 al 24	85 x 85	4.44	1430.7	1552270	1552270	36524	43267	2321400
5	17 al 20	85 x 85	4.44	1430.7	1552270	1552270	36524	43267	2321400
4	13 al 16	85 x 85	4.44	1430.7	1552270	1552270	36524	43267	2321400
3	9 al 12	90 x 90	4.44	1519.5	1858968	1858968	41310	48798	2781000
2	5 al 8	90 x 90	4.44	1519.5	1858968	1858968	41310	48798	2781000
1	1 al 4	90 x 90	4.44	1519.5	1858968	1858968	41310	48798	2781000

Tabla 3.20 Características geométricas y mecánicas de las traveses del marco con disipadores.

Nivel	Elemento	Perfil IPR o W d x peso (mm x kg/m)	Area A (cm ²)	Inercia I _x (cm ⁴)	Inercia I _y (cm ⁴)	Módulo plástico de Sección Z _x (cm ³)	Constante de Torsión J (cm ⁴)	Constante de Alabeo Ca (cm ⁶)
20	195 al 200	406 x 46.2	58.8	15609	516	885	19.1	198448.0
19	189 al 194	406 x 46.2	58.8	15609	516	885	19.1	198448.0
18	183 al 188	406 x 46.2	58.8	15609	516	885	19.1	198448.0
17	177 al 182	406 x 46.2	58.8	15609	516	885	19.1	198448.0
16	171 al 176	406 x 53.7	68.4	18647	1020	1049	22.5	392062.3
15	165 al 170	406 x 53.7	68.4	18647	1020	1049	22.5	392062.3
14	159 al 164	406 x 53.7	68.4	18647	1020	1049	22.5	392062.3
13	153 al 158	406 x 53.7	68.4	18647	1020	1049	22.5	392062.3
12	147 al 152	457 x 74.5	94.8	33298	1669	1655	51.6	816349.0
11	141 al 146	457 x 74.5	94.8	33298	1669	1655	51.6	816349.0
10	135 al 140	457 x 74.5	94.8	33298	1669	1655	51.6	816349.0
9	129 al 134	457 x 74.5	94.8	33298	1669	1655	51.6	816349.0
8	123 al 128	457 x 74.5	94.8	33298	1669	1655	51.6	816349.0
7	117 al 122	457 x 74.5	94.8	33298	1669	1655	51.6	816349.0
6	111 al 116	457 x 74.5	94.8	33298	1669	1655	51.6	816349.0
5	105 al 110	457 x 74.5	94.8	33298	1669	1655	51.6	816349.0
4	99 al 104	533 x 74.4	94.8	40957	1036	1803	47.5	690137.1
3	93 al 98	406 x 46.2	58.8	15609	516	885	19.1	198448.0
2	87 al 92	406 x 46.2	58.8	15609	516	885	19.1	198448.0
1	81 al 86	406 x 46.2	58.8	15609	516	885	19.1	198448.0

Tabla 3.21 Propiedades geométricas definitivas de los disipadores TADAS del marco con disipadores TADAS simple.

Nivel	Elemento	Número de placas N	b (cm)	t (cm)	h _{TADAS} (cm)	Relación (h/t)	K _{TADAS} (ton/cm)	I _{equiv} (cm ⁴)	M _v (ton-m)
20	260	11	10	3.81	32.5	8.53	60.26	410.66	7.18
19	259	17	10	3.81	32.5	8.53	93.12	634.66	11.10
18	258	20	10	3.81	32.5	8.53	109.56	746.65	13.06
17	257	26	10	4.44	32.5	7.32	225.40	1536.16	23.06
16	256	37	13	4.44	32.5	7.32	416.99	2841.90	42.67
15	255	43	13	4.44	32.5	7.32	484.61	3302.75	49.58
14	254	43	13	5.08	32.5	6.40	725.82	4946.72	64.91
13	253	38	13	5.08	32.5	6.40	641.43	4371.52	57.36
12	252	29	15	5.08	32.5	6.40	564.82	3064.05	46.81
11	251	23	15	5.08	32.5	6.40	447.96	2430.11	37.13
10	250	21	15	5.08	32.5	6.40	409.01	2218.79	33.90
9	249	21	15	5.08	32.5	6.40	409.01	2218.79	33.90
8	248	21	15	5.08	32.5	6.40	409.01	2218.79	33.90

Tabla 3.21 (continuación).

Nivel	Elemento	Número de placas N	b (cm)	t (cm)	h TADAS (cm)	Relación (h/t)	K TADAS (ton/cm)	I equiv (cm ⁴)	M _v (ton-m)
7	247	21	15	5.08	32.5	6.40	409.01	2218.79	33.90
6	246	20	15	5.08	32.5	6.40	389.53	2113.14	32.28
5	245	17	15	5.08	32.5	6.40	331.10	1796.17	27.44
4	244	12	12	6.35	32.5	5.12	365.18	1393.57	21.53
3	243	18	10	6.35	32.5	5.12	456.48	3111.06	32.66
2	242	27	10	6.35	30.5	4.80	828.45	5646.12	52.20
1	241	45	10	7.62	30.5	4.00	2385.93	16260.83	125.28

Tabla 3.22 Características geométricas y mecánicas de las diagonales de contraventeo del marco con disipadores TADAS simple.

Nivel	Elemento	Perfil WT d x peso (pulg x lb/ft)	Perfil TR IMCA d x peso (mm x kg/m)	Area A (cm ²)	Inercia I _x (cm ⁴)	Inercia I _y (cm ⁴)	Radio giro r _x (cm)	Radio giro r _y (cm)
20	239 y 240	2 WT 5 x 15	2 TR 127 x 22.5	57.03	1712.1	696.0	5.48	3.49
19	237 y 238	2 WT 6 x 22.5	2 TR 152 x 33.5	85.29	2843.8	2082.0	5.77	4.94
18	235 y 236	2 WT 6 x 32.5	2 TR 152 x 48.3	123.10	3390.1	7260.0	5.25	7.68
17	233 y 234	2 WT 6 x 43.5	2 TR 152 x 64.8	165.16	5128.4	9990.0	5.57	7.78
16	231 y 232	2 WT 7 x 49.5	2 TR 178 x 74.0	188.39	6664.1	16732.0	5.95	9.42
15	229 y 230	2 WT 7 x 60	2 TR 178 x 89.6	228.39	8765.9	20562.0	6.20	9.49
14	227 y 228	2 WT 7 x 66	2 TR 178 x 98.3	250.32	9994.3	22810.0	6.32	9.55
13	225 y 226	2 WT 7 x 72.5	2 TR 178 x 107.9	274.84	10891.8	28138.0	6.30	10.12
12	223 y 224	2 WT 7 x 79.5	2 TR 178 x 118.3	301.93	12513.7	31134.0	6.44	10.15
11	221 y 222	2 WT 7 x 88	2 TR 178 x 130.9	334.19	14726.0	34880.0	6.64	10.22
10	219 y 220	2 WT 7 x 88	2 TR 178 x 130.9	334.19	14726.0	34880.0	6.64	10.22
9	217 y 218	2 WT 7 x 96.5	2 TR 178 x 143.6	366.45	16821.4	38792.0	6.78	10.29
8	215 y 216	2 WT 7 x 105.5	2 TR 178 x 157.0	400.00	19559.0	42706.0	6.99	10.33
7	213 y 214	2 WT 7 x 105.5	2 TR 178 x 157.0	400.00	19559.0	42706.0	6.99	10.33
6	211 y 212	2 WT 7 x 105.5	2 TR 178 x 157.0	400.00	19559.0	42706.0	6.99	10.33
5	209 y 210	2 WT 7 x 116.5	2 TR 178 x 173.4	441.29	22811.5	47950.0	7.19	10.42
4	207 y 208	2 WT 7 x 116.5	2 TR 178 x 173.4	441.29	22811.5	47950.0	7.19	10.42
3	205 y 206	2 WT 7 x 116.5	2 TR 178 x 173.4	441.29	22811.5	47950.0	7.19	10.42
2	203 y 204	2 WT 7 x 116.5	2 TR 178 x 173.4	441.29	22811.5	47950.0	7.19	10.42
1	201 y 202	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49

Sin embargo, como se mencionó en la sección 3.3.5, algunos elementos estructurales del marco con disipadores TADAS simple no cumplieron con los estados límite de falla y no tienen resistencia suficiente ante las fuerzas internas inducidas por las acciones de diseño.

Específicamente se trata de las columnas interiores 2 y 3 del primer nivel (ver Figura 3.10), estos miembros estructurales no cumplen con las ecuaciones de interacción por inestabilidad de la columna completa y por resistencia en los extremos del elemento flexocomprimido ante la combinación crítica de solicitaciones que incluye la acción sísmica. Se adoptó la solución que a continuación se explica.

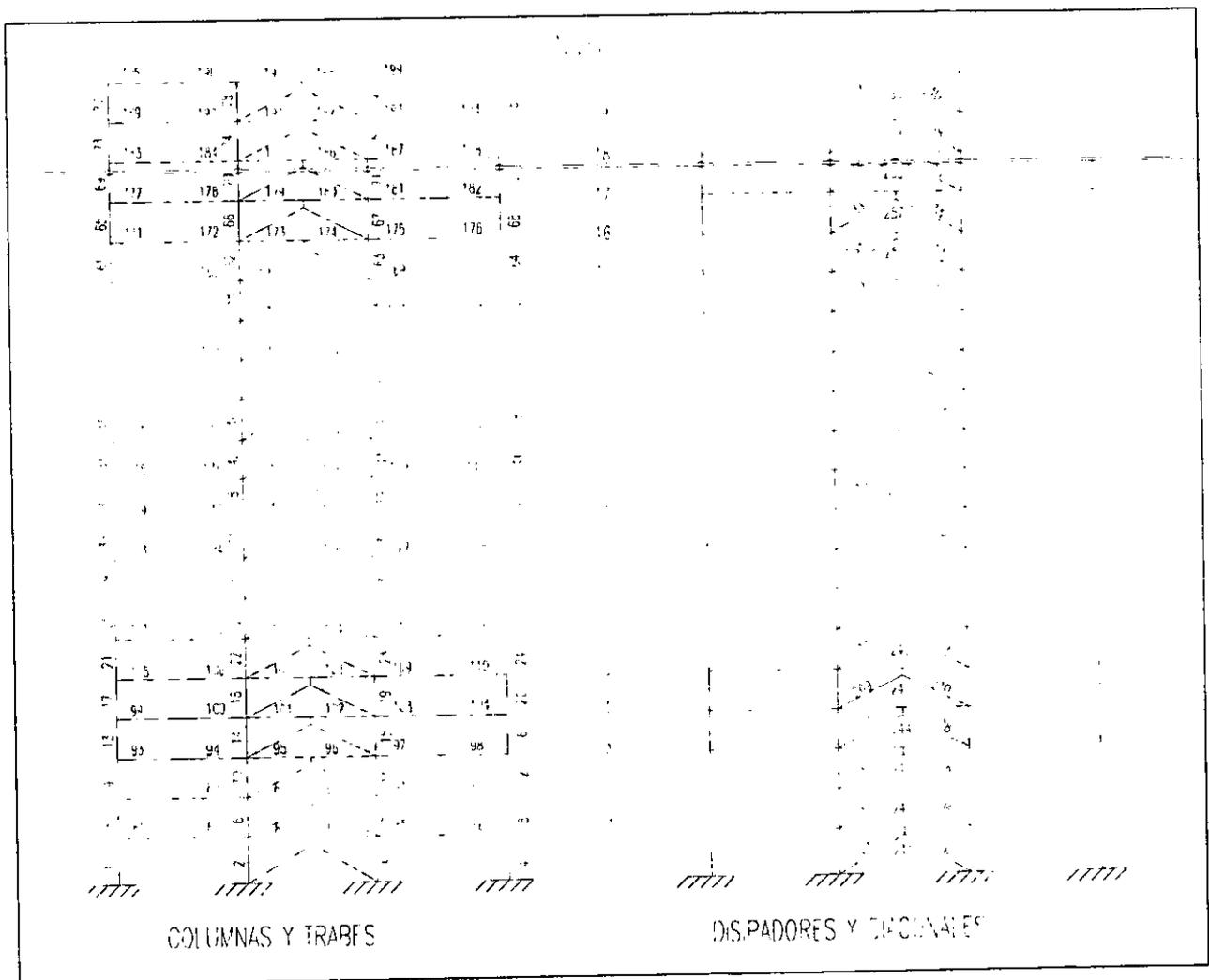


Figura 3.10 Distribución y numeración de los elementos estructurales del marco TADAS simple.

Se consideró la alternativa de modificar la ubicación de los dispositivos. La distribución de los disipadores se hizo de tal manera que su ubicación sea uniforme y simétrica en toda la altura y amplitud de la estructura (Silva, 1993; Silva y Ruiz, 1993; Urrego *et al.*, 1993; Urrego,

1994), de esta forma se estableció el arreglo espacial que conforma al marco con disipadores TADAS doble (Figura 3.11). El análisis y diseño del marco con disipadores TADAS doble también se realiza a partir de la estructura diseñada convencionalmente. Para fines comparativos se mantienen las mismas consideraciones de análisis y los mismos parámetros establecidos para el diseño del marco con disipadores TADAS simple, es decir la distribución de masas y rigideces debe ser tal que se tiene que cumplir con los desplazamientos laterales y el período fundamental de vibración debe ser igual al del marco convencional ($T=1.9$ segundos).

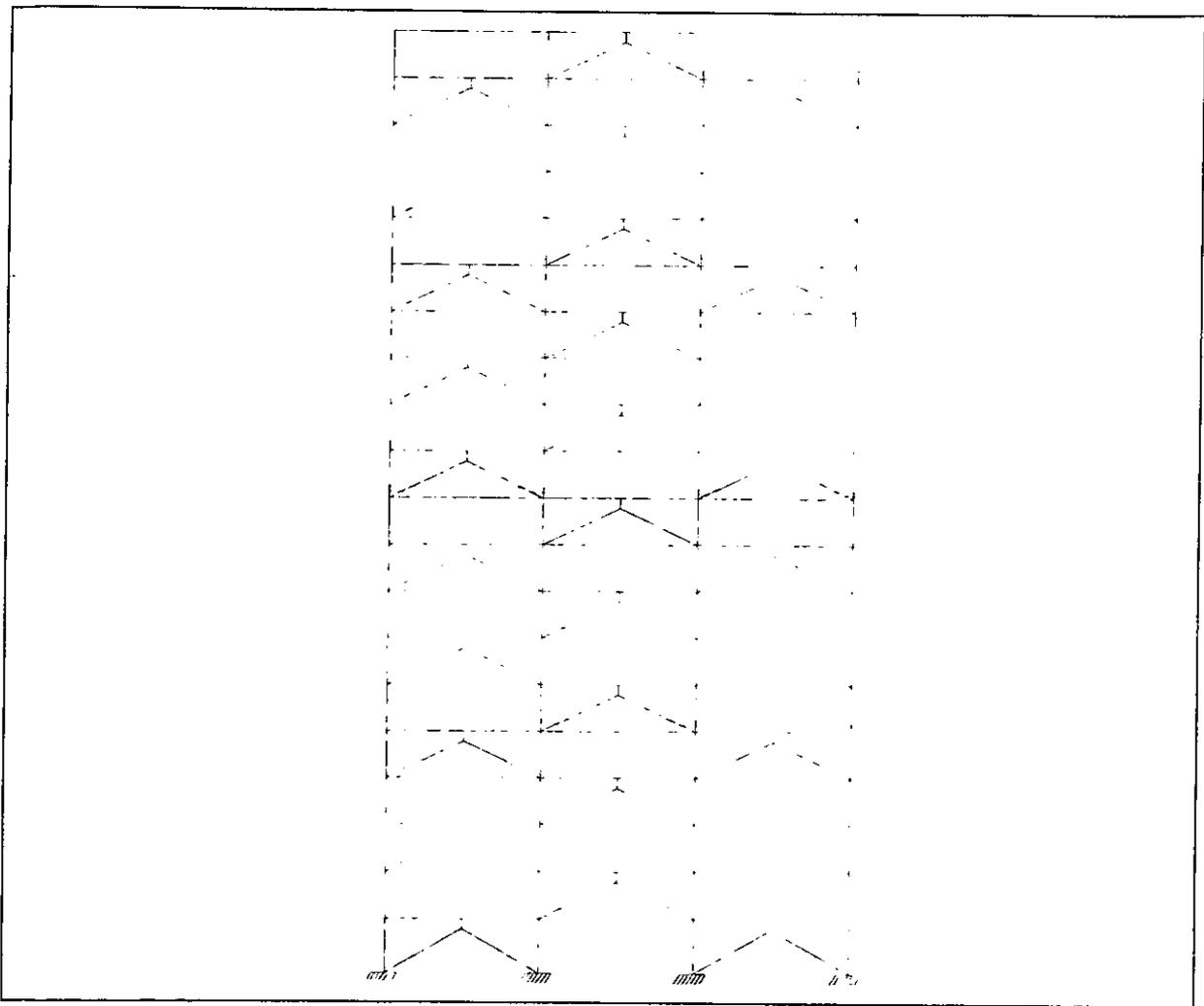


Figura 3.11 Marco con disipadores TADAS doble.

Para el predimensionamiento del marco con disipadores TADAS doble se requiere establecer el valor de los factores α_1 y α_2 , estos valores no sufren ningún cambio es decir, $\alpha_1 = 0.25$ y $\alpha_2 = 0.75$. El proceso completo de diseño no cambia, por lo tanto las secciones transversales de los elementos estructurales del marco con disipadores TADAS doble son las mismas secciones obtenidas para el marco sin disipadores, determinadas en la sección 3.3.2.4 (Tablas 3.19 y 3.20). Las rigideces laterales del marco sin disipadores son las que se muestran en la Tabla 3.14. Por lo tanto únicamente se requiere calcular las nuevas características geométricas y mecánicas de los dispositivos disipadores TADAS en el marco TADAS doble y las propiedades de las diagonales de contraventeo con el fin de que el período de vibración de este marco sea $T_d = 1.9$ segundos.

En la Tabla 3.23 se muestra la primer propuesta de la geometría de las placas y los momentos de inercia para el primer análisis de este marco. El período de vibración en este primer análisis es apenas $T_d = 1.46$ segundos.

Tabla 3.23 Predimensionamiento de los disipadores TADAS en el marco TADAS doble.

Nivel	Número de placas N	b (cm)	t (cm)	h TADAS (cm)	Relación (h/t)	K TADAS (ton/cm)	I equiv (cm ⁴)	M _y (ton-m)
20	11	10	3.81	32.5	8.53	60.26	410.66	7.18
19	8.5	10	3.81	32.5	8.53	46.56	317.33	5.55
18	20	10	3.81	32.5	8.53	109.56	746.65	13.06
17	13	10	4.44	32.5	7.32	112.70	768.08	11.53
16	37	13	4.44	32.5	7.32	416.99	2841.90	42.67
15	21.5	13	4.44	32.5	7.32	242.30	1651.37	24.79
14	43	13	5.08	32.5	6.40	725.82	4946.72	64.91
13	19	13	5.08	32.5	6.40	320.71	2185.76	28.68
12	29	15	5.08	32.5	6.40	564.82	3064.05	46.81
11	11.5	15	5.08	32.5	6.40	223.98	1215.05	18.56
10	21	15	5.08	32.5	6.40	409.01	2218.79	33.90
9	10.5	15	5.08	32.5	6.40	204.50	1109.40	16.95
8	21	15	5.08	32.5	6.40	409.01	2218.79	33.90
7	10.5	15	5.08	32.5	6.40	204.50	1109.40	16.95
6	20	15	5.08	32.5	6.40	389.53	2113.14	32.28
5	8.5	15	5.08	32.5	6.40	165.55	898.08	13.72
4	12	12	6.35	32.5	5.12	365.18	1393.57	21.53

Tabla 3.23 (continuación).

Nivel	Número de placas N	b (cm)	t (cm)	h _{TADAS} (cm)	Relación (h/t)	K _{TADAS} (ton/cm)	I _{equiv} (cm ⁴)	M _v (ton-m)
3	9	10	6.35	32.5	5.12	228.24	1555.53	16.33
2	27	10	6.35	30.5	4.80	828.45	5646.12	52.20
1	22.5	10	7.62	30.5	4.00	1192.96	8130.41	62.64

Se efectuaron numerosas iteraciones y finalmente se consigue que el período de vibración del marco con disipadores TADAS doble sea $T_d=1.9$ segundos, las fuerzas sísmicas, cortantes de entrepiso así como los desplazamientos relativos de entrepiso y las rigideces laterales de entrepiso se muestran en la Tabla 3.24. La ecuación 2.17 se utilizó para aproximar en cada iteración el número de placas triangulares de acero. Las propiedades geométricas definitivas de los dispositivos disipadores TADAS en el marco con disipadores TADAS doble se muestran en la Tabla 3.25.

Tabla 3.24 Rigideces laterales de entrepiso definitivas del marco con disipadores TADAS doble.

Nivel	Fuerza Sísmica F _i (ton)	Cortante Sísmico V _i (ton)	Desplazam. Máximo δ máx (cm)	Desplazam. Relativo δ relativo (cm)	Desplazam. Relativo δ rel*Q (cm)	Desplazam. Admisible δ admisible (cm)	Rigidez Lateral K _T (ton/cm)
20	73.06	73.06	77.65	3.19	2.55	3.6	22.88
19	81.33	154.39	74.46	3.51	2.81	3.6	43.99
18	75.00	229.39	70.95	3.84	3.07	3.6	59.79
17	68.74	298.13	67.11	4.01	3.21	3.6	74.27
16	62.96	361.08	63.10	4.17	3.34	3.6	86.53
15	57.40	418.49	58.93	4.32	3.45	3.6	96.98
14	52.76	471.25	54.61	4.37	3.50	3.6	107.75
13	48.45	519.70	50.24	4.35	3.48	3.6	119.54
12	45.15	564.85	45.89	4.39	3.51	3.6	128.72
11	41.81	606.65	41.50	4.41	3.53	3.6	137.47
10	38.41	645.06	37.09	4.43	3.54	3.6	145.67
9	35.31	680.36	32.66	4.36	3.49	3.6	155.90
8	31.95	712.32	28.30	4.42	3.54	3.6	161.09
7	28.24	740.56	23.88	4.42	3.54	3.6	167.49
6	24.26	764.82	19.45	4.42	3.53	3.6	173.19
5	20.04	784.85	15.04	4.22	3.38	3.6	185.88
4	15.60	800.46	10.82	3.84	3.07	3.6	208.70
3	10.81	811.27	6.98	3.32	2.66	3.6	244.22

Tabla 3.24 (continuación).

Nivel	Fuerza Sísmica F_i (ton)	Cortante Sísmico V_i (ton)	Desplazam. Máximo δ máx (cm)	Desplazam. Relativo δ relativo (cm)	Desplazam. Relativo δ rel*Q (cm)	Desplazam. Admisible δ admisible (cm)	Rigidez Lateral K_r (ton/cm)
2	6.19	817.46	3.66	2.48	1.98	3.6	329.74
1	2.26	819.72	1.18	1.18	0.94	4.2	695.03

Tabla 3.25 Propiedades geométricas definitivas de los disipadores TADAS en el marco con disipadores TADAS doble.

Nivel	Elemento	Número de placas N	b (cm)	t (cm)	h TADAS (cm)	Relación (h/t)	K_{TADAS} (ton/cm)	I equiv (cm ⁴)	M_r (ton-m)
20	290	4	10	3.81	32.5	8.53	21.91	149.33	2.61
19	288 y 289	3	10	3.81	32.5	8.53	16.43	112.00	1.96
18	287	7	10	3.81	32.5	8.53	38.34	261.33	4.57
17	285 y 286	4	8.75	4.44	32.5	7.32	30.34	206.79	3.10
16	284	8	13	4.44	32.5	7.32	90.16	614.46	9.22
15	282 y 283	4	11.375	4.44	32.5	7.32	39.44	268.83	4.04
14	281	7	13	5.08	32.5	6.40	118.16	805.28	10.57
13	279 y 280	4	11.375	5.08	32.5	6.40	59.08	402.64	5.28
12	278	6	15	5.08	32.5	6.40	116.86	633.94	9.69
11	276 y 277	3	15	5.08	32.5	6.40	58.43	316.97	4.84
10	275	7	15	5.08	32.5	6.40	136.34	739.60	11.30
9	273 y 274	4	15	5.08	32.5	6.40	77.91	422.63	6.46
8	272	8	15	5.08	32.5	6.40	155.81	845.25	12.91
7	270 y 271	4	15	5.08	32.5	6.40	77.91	422.63	6.46
6	269	8	15	5.08	32.5	6.40	155.81	845.25	12.91
5	267 y 268	4	13.125	5.08	32.5	6.40	68.17	369.80	5.65
4	266	7	12	6.35	32.5	5.12	213.02	812.92	12.56
3	264 y 265	5	9	6.35	32.5	5.12	114.12	777.76	8.16
2	263	14	10	6.35	30.5	4.80	429.56	2927.62	27.07
1	261 y 262	13	9.615	7.62	30.5	4.00	662.73	4516.72	34.80

En la Tabla 3.26 se presentan las propiedades geométricas definitivas de las diagonales de contraventeo del marco con disipadores TADAS doble, la sección transversal de las diagonales se compone de dos perfiles WT espalda con espalda con una separación de 25 mm. En la Figura 3.12 se presenta la distribución y numeración de los elementos estructurales, disipadores y diagonales que integran el marco con disipadores TADAS doble.

Tabla 3.26 Características geométricas y mecánicas de las diagonales de contraventeo del marco con disipadores TADAS doble.

Nivel	Elemento	Perfil WT d x peso (pulg x lb/ft)	Perfil TR IMCA d x peso (mm x kg/m)	Area A (cm ²)	Inercia I _x (cm ⁴)	Inercia I _y (cm ⁴)	Radio giro r _x (cm)	Radio giro r _y (cm)
20	259 y 260	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
19	255 al 258	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
18	253 y 254	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
17	249 al 252	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
16	247 y 248	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
15	243 al 246	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
14	241 y 242	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
13	237 al 240	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
12	235 y 236	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
11	231 al 234	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
10	229 y 230	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
9	225 al 228	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
8	223 y 224	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
7	219 al 222	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
6	217 y 218	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
5	213 al 216	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
4	211 y 212	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
3	207 al 210	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
2	205 y 206	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49
1	201 al 204	2 WT 7 x 128.5	2 TR 178 x 191.2	487.74	26974.4	53694.0	7.44	10.49

Los elementos estructurales del marco con disipadores TADAS doble se revisaron ante las fuerzas internas inducidas por las solicitaciones de diseño empleando los programas codificados en lenguaje BASIC, cuyos diagramas de flujo se muestran en el apéndice B. El análisis estructural del marco reflejó que la magnitud de los elementos mecánicos es más uniforme en todos los miembros estructurales y las fuerzas internas no se concentran en la crujía central del marco como sucede en el marco con disipadores TADAS simple. Las columnas 2 y 3 (ver Figura 3.12) del primer nivel del marco con disipadores que tenían problemas por resistencia ahora cumplen plenamente los estados límite de falla de las ecuaciones de interacción por inestabilidad de la columna completa y por resistencia en los extremos del elemento flexocomprimido.

Ahora ya se tiene diseñado el marco con disipadores TADAS doble, su período de vibración $T_d=1.9$ segundos es el deseado, los desplazamientos laterales de entrepiso cumplen con

el límite admisible y las secciones de los miembros estructurales son adecuadas para resistir los elementos mecánicos. El archivo de datos para el análisis en el programa SAP-90 del marco con disipadores TADAS doble se muestra en el apéndice C.

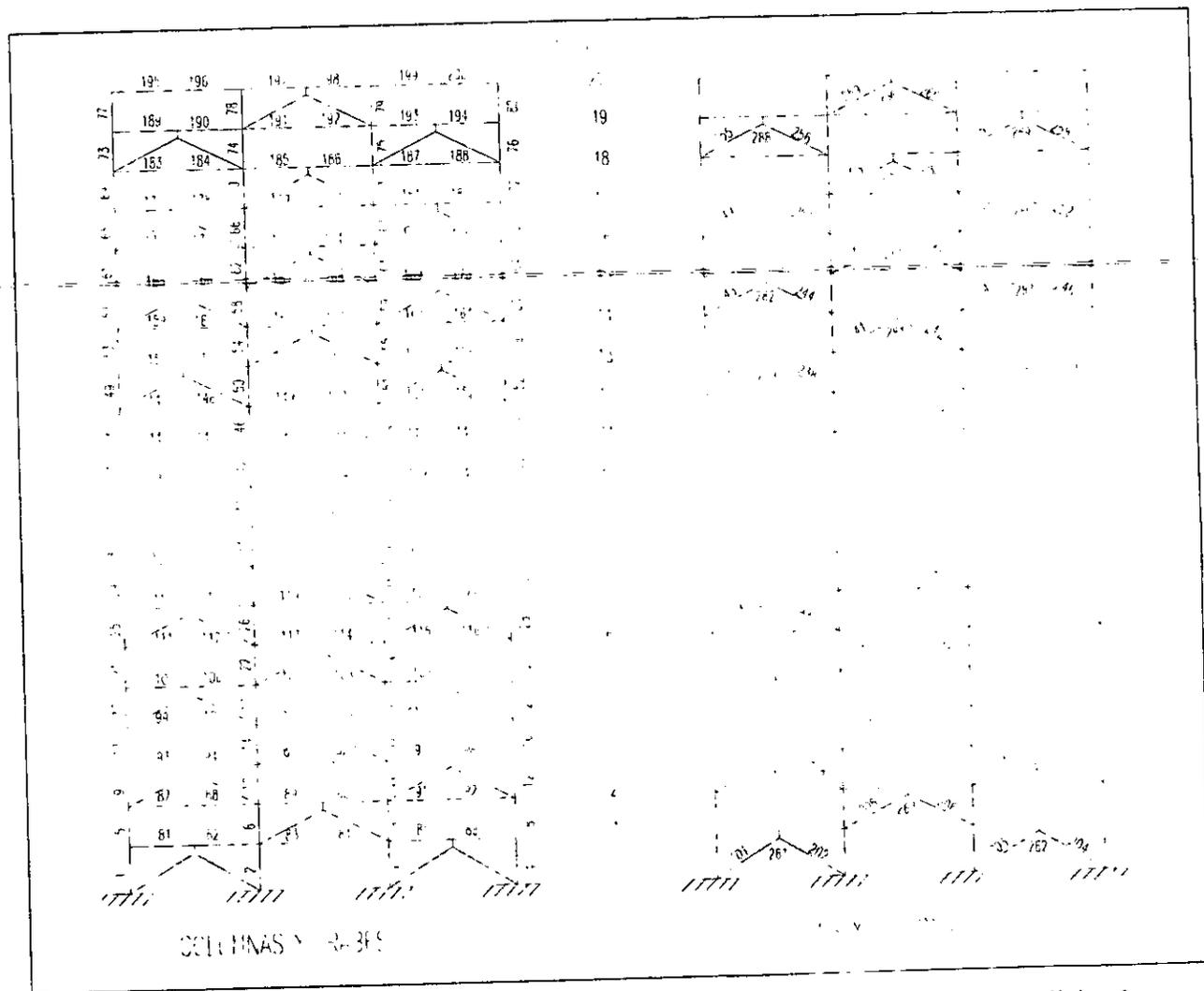


Figura 3.12 Distribución y numeración de elementos estructurales del marco con disipadores TADAS doble.

4 ANÁLISIS DINÁMICO INELÁSTICO

En el presente capítulo se realiza un análisis de tipo comparativo de la respuesta dinámica inelástica de los sistemas estructurales diseñados en el capítulo anterior, las tres estructuras de acero tienen un período fundamental de vibración de *1.9 segundos*. Se estudia y discute el comportamiento estructural de las estructuras comparando las deformaciones, rotaciones de las articulaciones plásticas y elementos mecánicos inducidos por un movimiento sísmico real. Se estudia también la eficiencia estructural de los dispositivos disipadores de energía TADAS. Para cada estructura se hizo un análisis dinámico paso a paso de respuesta inelástica con los programas de cómputo DRAIN-2D (Kanaan y Powell, 1973) y DRAIN-2DX (Prakash *et al.*, 1993) excitados con el acelerograma de un sismo real. En el diseño de las estructuras con disipadores se pretende que la energía sísmica introducida a las estructuras se disipe por medio del trabajo inelástico de los dispositivos disipadores TADAS con el fin de evitar que los elementos estructurales desarrollen deformaciones inelásticas que se traducen en daños estructurales, es decir que las estructuras no disipen energía exclusivamente por el comportamiento dúctil de sus miembros estructurales. A continuación se describen las características del sismo seleccionado.

4.1 ELECCIÓN DE LA EXCITACIÓN

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo 1995 del R.C.D.F. 1993 recomiendan en su inciso 9.2 que al realizar un análisis dinámico paso a paso de respuesta inelástica se deben considerar por lo menos cuatro movimientos representativos independientes entre sí. En este trabajo se utilizó únicamente el acelerograma del evento sísmico del 19 de septiembre de 1985 componente este-oeste registrado en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes localizada en la zona sísmica III del Distrito Federal. El problema radica en que para realizar el análisis dinámico no lineal de una estructura, la capacidad y tiempo de computadora que se requieren son elevadas y el volumen de información (datos y resultados) para un solo sismo es muy grande, más aún si se tiene que hacer para varios temblores. Indudablemente el sismo SCT-EW85 ha sido uno de los más trascendentes ya que sus efectos mostraron y reflejaron la vulnerabilidad y deficiencias estructurales de muchas estructuras que se encontraban ubicadas principalmente en la zona sísmica III del Distrito Federal.

El acelerograma del sismo SCT-EW85 se muestra en la Figura 4.1 y el espectro de respuesta del sismo seleccionado para un 5% del amortiguamiento crítico se muestra en la Figura 4.2. Su epicentro se localizó frente a las costas de Guerrero y Michoacán, la magnitud en la escala de Richter fue de 8.1 grados con réplicas sucesivas, siendo la más importante la que sucedió al día siguiente el 20 de septiembre por la noche con una magnitud de 7.5 grados (Wakabayashi y Martínez, 1988). El sismo es de banda angosta, el período dominante es aproximadamente de 2 segundos y la aceleración máxima en la dirección este-oeste fue de 168 gals. Las aceleraciones máximas de crestas sucesivas, positivas y negativas se mantienen cerca del 10% de la aceleración de la gravedad durante más de 22 segundos; este nivel sostenido es muy superior al que se había registrado en otros sismos. En el espectro de respuesta se observa que la ordenada máxima de aceleraciones coincide con el período de 2 segundos, es decir cuando coincide el período de la estructura y el de la excitación se presenta el fenómeno de resonancia dinámica.

En este trabajo se utilizó el sismo recortado de SCT-EW85 (Figura 4.3), lo anterior se debe a que si se hubiese realizado el análisis dinámico paso a paso utilizando el acelerograma del sismo completo, el proceso de cómputo se prolonga más tiempo y exige mayor capacidad en recursos del *hardware* (tener un procesador de alta velocidad y aumentar la capacidad de almacenamiento del disco duro), lo que no se justifica ya que no se obtiene mayor exactitud en los cálculos de las respuestas máximas. En el sismo recortado se excluyen la fase inicial y la fase final que tienen aceleraciones con baja intensidad (Figura 4.1), solamente se incluye la fase más intensa de aceleraciones que es la que acumula el 90% de la energía total del sismo SCT-EW85 (Figura 4.3), la cual tiene un intervalo de duración aproximadamente de 35 segundos (Urrego, 1994).

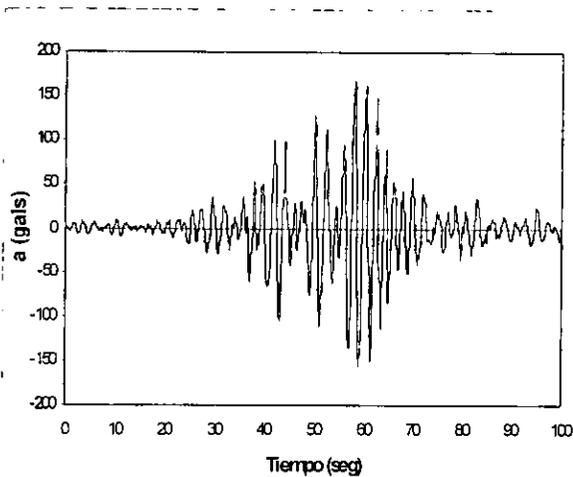


Figura 4.1 Acelerograma del sismo SCT-EW85.

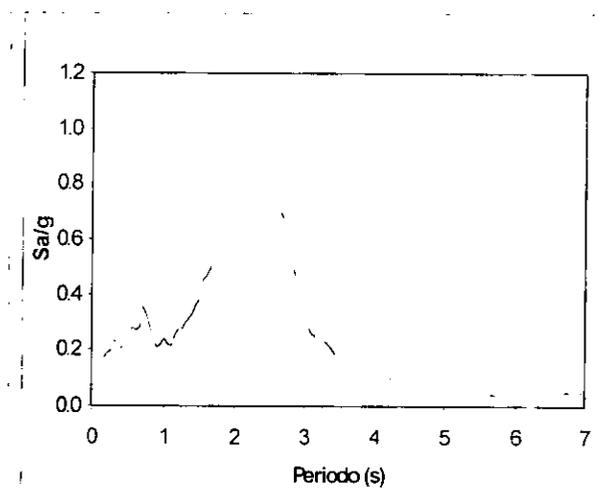


Figura 4.2 Espectro de respuesta del sismo SCT-EW85.

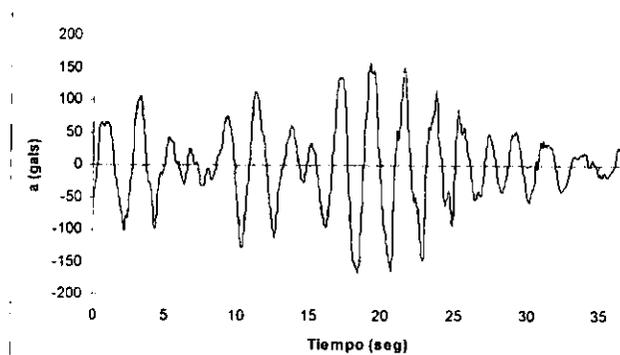


Figura 4.3 Acelerograma recortado del sismo SCT-EW85.

4.2 MODELACIÓN ESTRUCTURAL

Con la finalidad de efectuar el análisis dinámico de respuesta inelástica se tiene que llevar a cabo la modelación estructural en los programas de cómputo DRAIN-2D y DRAIN-2DX de los marcos diseñados. Estos programas realizan análisis dinámicos paso a paso de respuesta inelástica de estructuras en 2 dimensiones con cualquier configuración sometidas a movimientos sísmicos. Para conformar el archivo de datos se requiere ingresar la siguiente información:

- a) Configuración de la estructura por medio de la asignación de nudos y ubicación de los miembros estructurales.
- b) Propiedades geométricas y mecánicas de todos los elementos estructurales que intervienen en la modelación.
- c) Pesos o masas aplicadas en cada nivel.
- d) Cargas estáticas en los nudos.
- e) Los factores de amortiguamiento α que define el amortiguamiento proporcional a la masa y β que define el amortiguamiento proporcional a la rigidez tangente instantánea.
- f) Definición del tipo de modelo estructural para cada miembro estructural de los marcos, el cual es función de la forma de trabajar de cada miembro. Para los marcos aquí estudiados, sus miembros estructurales se modelaron con los elementos que a continuación se describen:

- Columnas

Las columnas se modelaron en el programa como elementos “viga-columna” (Beam Column Elements o tipo 2) sin ningún tipo de degradación, ya sea de rigidez o de resistencia. Este elemento posee rigidez a la flexión y rigidez axial. La rigidez a flexión de estos elementos disminuye cuando se forman articulaciones plásticas en sus extremos suponiendo que las articulaciones tienen un comportamiento inelástico bilineal (es decir una componente elástica y una elastoplástica). La rama de postfluencia es función de las características del material de la columna, en este caso para el acero estructural A-36 se considera 5% de la rigidez inicial. Dentro del programa la interacción fuerza normal y momento flexionante se considera con el

diagrama de interacción. El efecto $P-\Delta$ se considera en el programa al incluir la rigidez geométrica que es función de la fuerza axial inducida por cargas estáticas.

- Trabes

Las trabes de los marcos se modelaron como elementos “viga” (Beam Elements o tipo 5) sin degradación de rigidez ni degradación de resistencia. La rigidez a la flexión de este elemento disminuye al ocurrir la fluencia en las articulaciones plásticas en los extremos del elemento, las cuales también se idealizan con comportamiento inelástico bilineal. La rama de postfluencia se considera igual al 5% de la rigidez inicial. Los resultados que presenta el DRAIN-2D para este elemento son el momento flexionante máximo y el tiempo de ocurrencia. El programa también indica cuando ocurren las articulaciones plásticas máximas, positivas y negativas; así como la magnitud de las rotaciones plásticas acumuladas.

- Diagonales

Estos elementos se modelaron como elementos “armadura” (Truss Elements o tipo 1). Este elemento biarticulado se caracteriza por trabajar solamente a fuerzas axiales de tensión o compresión. Durante el análisis el programa permite dos opciones: que la diagonal fluya a tensión y compresión, o que solamente fluya en tensión y se pandee elásticamente a compresión. Es preferible que las diagonales de los marcos estudiados se comporten elásticamente durante la excitación sísmica, es decir que en estos elementos no se presente ninguna de las dos condiciones anteriores. Para cada diagonal se introduce el área axial de los perfiles estructurales calculados en el proceso de diseño, ya que se verificará si el área axial calculada es adecuada de tal manera que el esfuerzo de tensión axial inducido en el análisis dinámico paso a paso no supere el esfuerzo de tensión admisible especificado en las normas de diseño. El control de la inestabilidad por compresión está implícito en el perfil estructural diseñado ya que las diagonales poseen un radio de giro suficientemente grande lo que se traduce en una relación de esbeltez pequeña, de esta manera el esfuerzo de compresión admisible aumenta y se conserva la estabilidad original. Al final del análisis dinámico no lineal se procederá a verificar si las diagonales se comportan elásticamente.

- Disipadores

Los disipadores TADAS se modelaron como elementos “viga” (Beam Elements o tipo 5) sin ningún tipo de degradación ya sea de rigidez o de resistencia. El comportamiento idealizado de la relación momento-rotación es bilineal y la pendiente de la segunda rama de la curva esfuerzo-deformación unitaria del dispositivo TADAS se consideró igual al 5% de la rigidez inicial. Como los dispositivos disipadores TADAS trabajan exclusivamente a flexión se requiere ingresar solamente los valores de los momentos de fluencia.

- g) Fuerzas y momentos de empotramiento en los extremos de cada elemento por efecto de la aplicación de las cargas estáticas gravitacionales.
- h) Diagramas de interacción de las columnas.
- i) Momentos de fluencia de los disipadores.
- j) Momentos de fluencia de las trabes.
- k) Archivo de datos del evento sísmico, esto es el registro de la historia de valores tiempo-aceleración de la excitación sísmica.

4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LOS MARCOS

A continuación se muestra el análisis comparativo de la respuesta dinámica paso a paso de los marcos ante el sismo SCT-EW85 calculada con el programa DRAIN-2D. Específicamente se analizan los siguientes resultados:

- a) Envolvente de desplazamientos. Es decir los valores máximos de los desplazamientos de cada nivel con respecto a la base.
- b) Envolvente de los desplazamientos relativos de entrepiso.
- c) Las envolventes de fuerzas axiales, de fuerzas cortantes y de momentos flexionantes en la línea de columnas α , β , ϕ y γ (Figura 4.4).
- d) Las envolventes de momentos flexionantes y de fuerzas cortantes en las trabes de las crujeas κ , λ y μ (Figura 4.4).

- e) Formación de articulaciones plásticas en los marcos con disipadores y en el marco convencional.
- f) Ciclos histéreticos y energía disipada por los TADAS. Para el marco con disipadores TADAS simple y el marco con disipadores TADAS doble se analiza la energía disipada por cada dispositivo disipador.
- g) Demanda de ductilidad global y demanda de ductilidad de los entrepisos de cada marco durante el sismo.
- h) Demanda de ductilidad de los dispositivos disipadores.

La línea de columnas α , β , ϕ y γ , y las crujeías κ , λ y μ , de los sistemas estructurales que se analizan se muestran en la Figura 4.4.

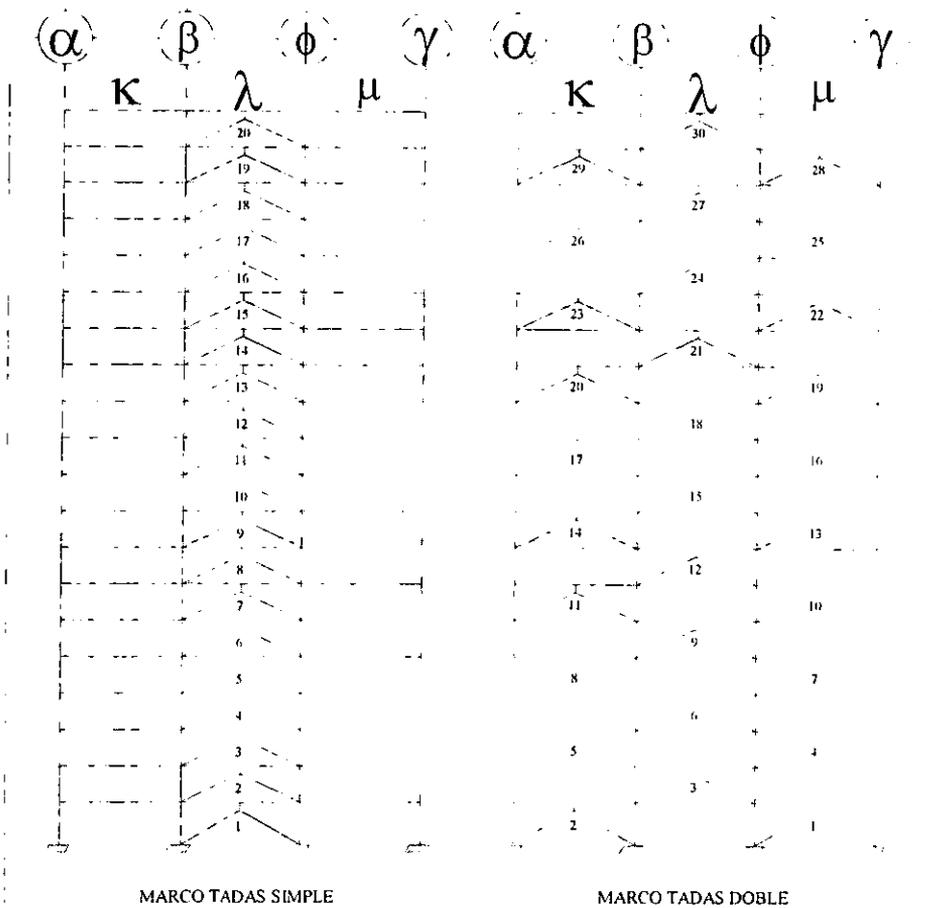


Figura 4.4 Elementos estructurales cuyos elementos mecánicos se analizan.

4.3.1 ENVOLVENTE DE DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS DE CADA NIVEL

En la Figura 4.5 se muestran los desplazamientos laterales máximos de cada nivel respecto a la base de la estructura. Se observa que los desplazamientos del marco con disipadores TADAS doble y del marco convencional son muy similares en los niveles 1 al 13, los desplazamientos del marco con disipadores TADAS simple son de mayor amplitud excepto en los niveles 14 al 20, los cuales disminuyen e inclusive son inferiores a los desplazamientos máximos en esos niveles de los otros marcos estructurales. El marco convencional presenta un desplazamiento máximo en el nivel 20 de 62.8 cm, mientras que el marco TADAS doble tiene un desplazamiento máximo en el mismo nivel de 54.6 cm, es decir un 13% menor que el marco convencional, en tanto que el marco TADAS simple presenta un desplazamiento máximo en el nivel 20 de 51.9 cm, aproximadamente 17% menor que el del marco convencional.

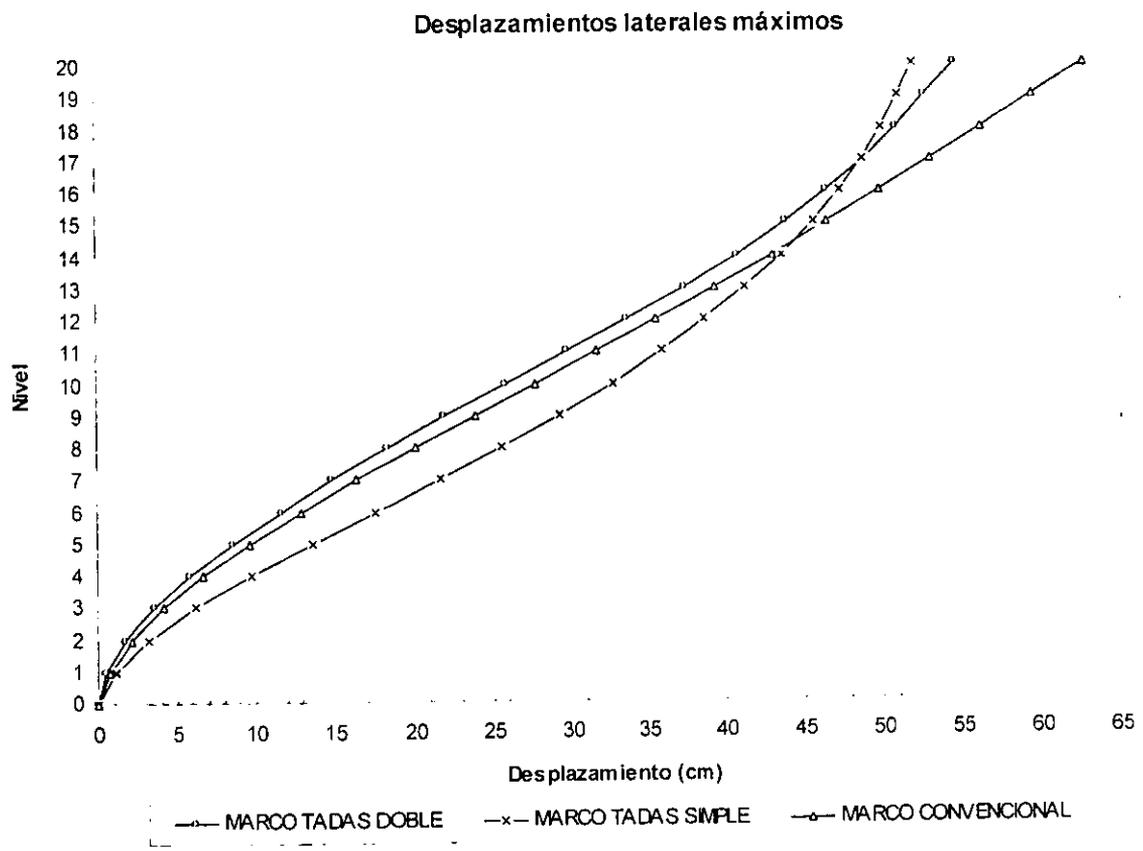


Figura 4.5 Desplazamientos laterales máximos de cada nivel.

El desplazamiento permisible en el último nivel que indica el R.C.D.F. 1993 es de $\delta_{\text{máx}} = 0.012*(H_T) = 0.012*(6050 \text{ cm}) = 72.6 \text{ cm}$. Si se comparan los desplazamientos máximos de los marcos en el nivel 20 obtenidos del análisis dinámico contra el desplazamiento permisible se observa que se cumple plenamente con el límite establecido, ya que los desplazamientos máximos que resultaron del análisis son inferiores a 72.6 cm, lo anterior es válido siempre y cuando los desplazamientos relativos cumplan con el límite de los desplazamientos relativos que es de 3.6 cm, más adelante se muestra la gráfica de envolventes de desplazamientos relativos.

Los desplazamientos laterales máximos que se muestran en la Figura 4.5 ocurren dentro del intervalo de tiempo en el cual las aceleraciones son máximas, para el marco con disipadores TADAS doble ocurren entre los segundos 17.81 y 18.18; para el marco con disipadores TADAS simple ocurren dentro del lapso comprendido entre los segundos 18.94 y 19.20; finalmente para el marco convencional se presentan entre los segundos 18.78 y 19.08.

4.3.2 ENVOLVENTE DE DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS DE ENTREPISO

Los desplazamientos relativos se muestran en la Figura 4.6. La gráfica de desplazamientos para cada marco tiene forma parabólica, pero el valor máximo para los tres marcos se ubica en distintos entrepisos. El marco TADAS simple presenta un valor máximo en el entrepiso 6 y sus primeros 8 entrepisos se deforman más que los de los otros dos marcos. Los entrepisos 1 al 9 del marco TADAS doble son los que experimentan menos deformación y el desplazamiento relativo máximo de este marco corresponde al entrepiso 11. Se observa claramente que los entrepisos 12 al 20 del marco convencional son los que se deforman más. Todos los desplazamientos cumplen absolutamente con el límite establecido por el R.C.D.F. 1993, es decir $\delta_{\text{adm}} = 0.012h_e$, donde h_e es la altura del entrepiso considerado, de aquí resulta $\delta_{\text{adm}} = 0.012*(30 \text{ cm}) = 3.6 \text{ cm}$.

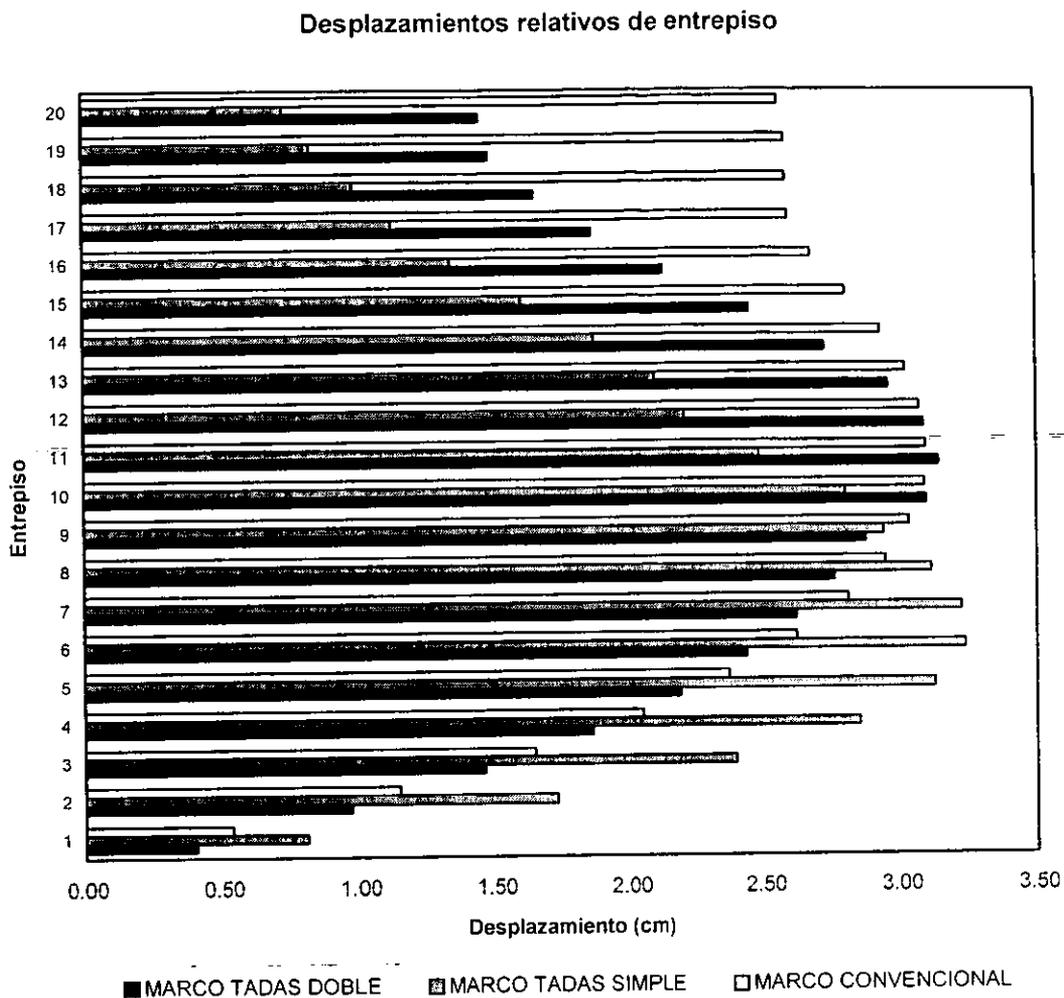


Figura 4.6 Desplazamientos relativos de entrepiso.

En la Figura 4.6 se observa que los desplazamientos relativos de entrepiso máximos corresponden al marco TADAS simple, esto se explica debido a que en varios niveles de este sistema estructural se generaron las rotaciones plásticas con mayor magnitud (Figura 4.27), las cuales reflejan principalmente el daño estructural de las trabes, inclusive se llegan a presentar rotaciones plásticas en dos columnas de acero de este marco.

4.3.3 ENVOLVENTES DE FUERZAS AXIALES, DE FUERZAS CORTANTES Y DE MOMENTOS FLEXIONANTES EN LA LÍNEA DE COLUMNAS α , β , ϕ Y γ

A continuación se muestran las gráficas de las envolventes de los elementos mecánicos máximos que se desarrollaron en las líneas de columnas α , β , ϕ y γ de los marcos con disipadores y del marco convencional (Figura 4.4).

En las Figuras 4.7 a 4.18 se aprecia una gran diferencia entre la magnitud de las fuerzas internas que actúan en el marco con disipadores y la magnitud de las fuerzas internas que actúan en el marco convencional. Es magnífica la notable reducción en los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes cuando se utiliza el sistema disipador TADAS (Figuras 4.7, 4.8, 4.11 a 4.14, 4.17 y 4.18). En lo referente a las fuerzas axiales sucede algo muy particular, también se advierte una gran reducción pero solamente en la línea de columnas α y γ (Figuras 4.9 y 4.16), ya que en la línea de columnas β y ϕ es dominante la magnitud de las fuerzas axiales del marco TADAS simple (Figuras 4.10 y 4.15). En estas dos líneas de columnas se desarrollan las mayores fuerzas axiales y esto se debe a que en este arreglo espacial los dispositivos disipadores TADAS están ubicados en la crujía central (Figura 3.3 o 3.10), por lo cual influyen en la distribución de los elementos mecánicos y se concentran en forma muy desfavorable en esta crujía.

Los momentos flexionantes que actúan en la línea de columnas α del marco con disipadores TADAS doble son aproximadamente, en promedio, 74% menores que los que se desarrollan en la misma línea de columnas del marco convencional. En el marco con disipadores TADAS simple en la línea de columnas α los momentos flexionantes también resultan menores en un 72% con respecto a la misma línea de columnas del marco convencional. En los otros dos elementos mecánicos en la línea α se obtienen porcentajes de reducción muy significativos.

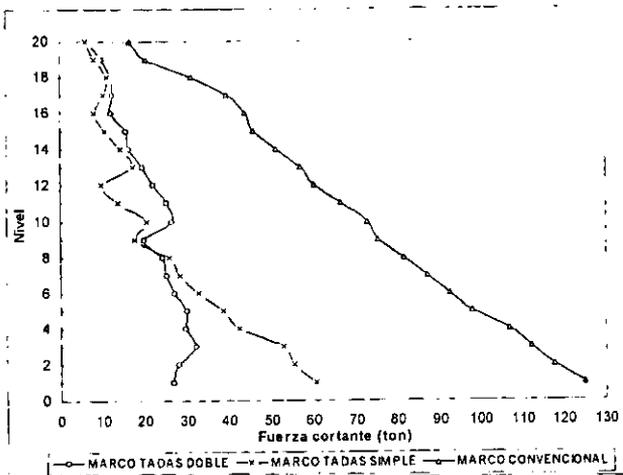


Figura 4.7 Fuerzas cortantes en la línea de columnas α.

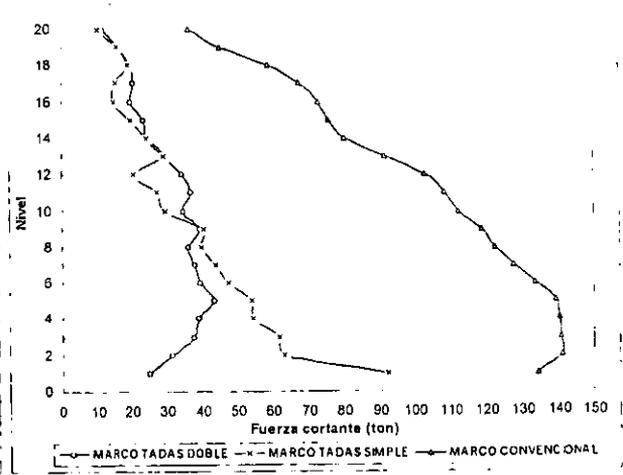


Figura 4.8 Fuerzas cortantes en la línea de columnas β.

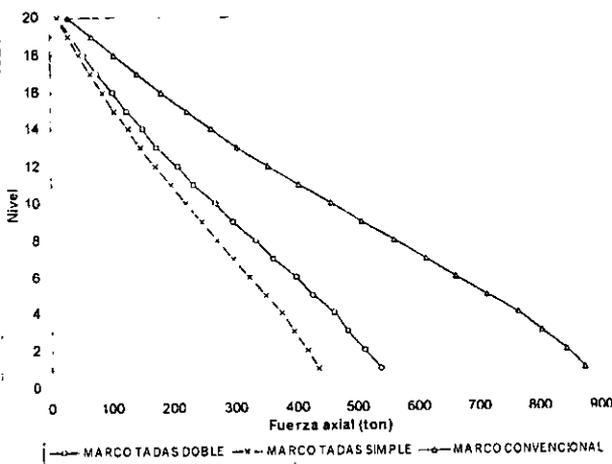


Figura 4.9 Fuerzas axiales en la línea de columnas α.

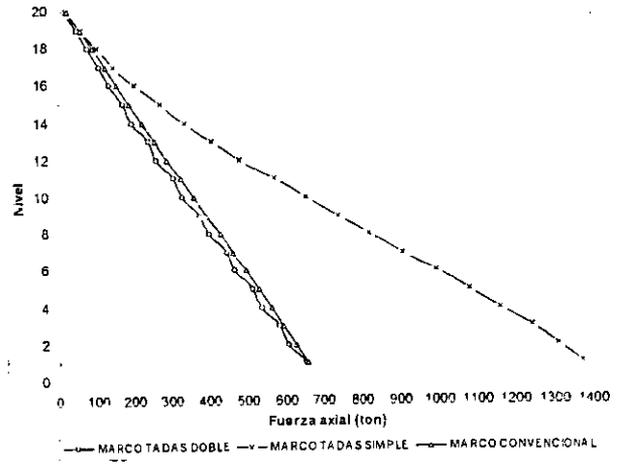


Figura 4.10 Fuerzas axiales en la línea de columnas β.

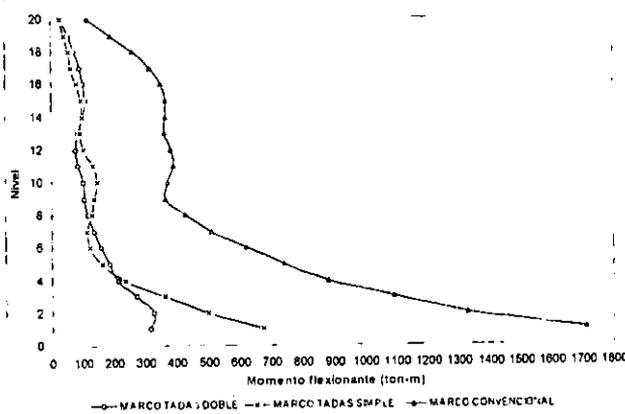


Figura 4.11 Momentos flexionantes en la línea de columnas α.

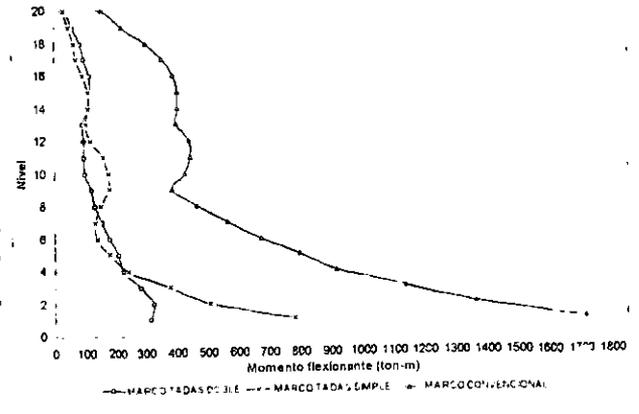


Figura 4.12 Momentos flexionantes en la línea de columnas β.

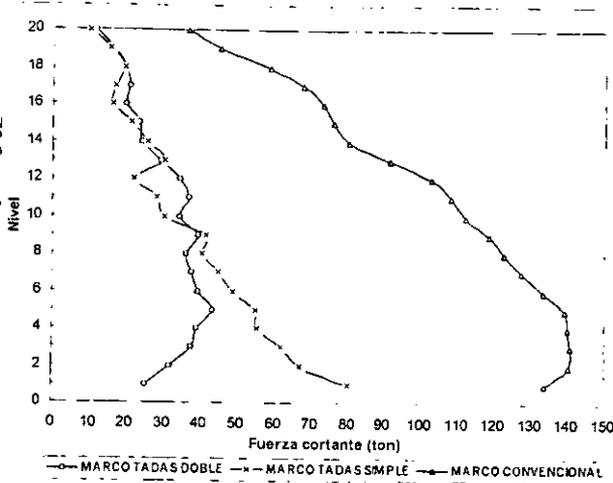


Figura 4.13 Fuerzas cortantes en la línea de columnas φ.

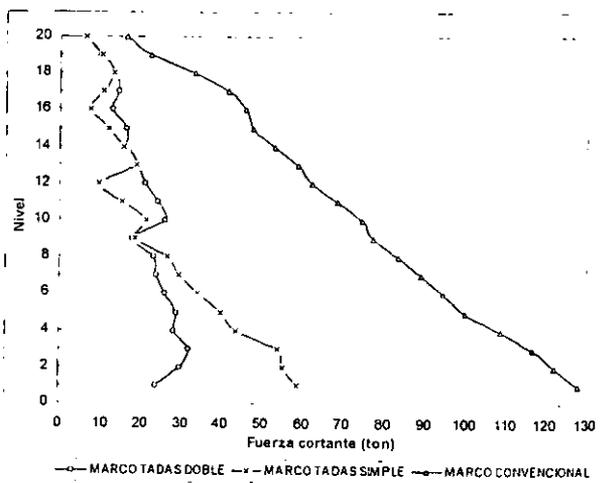


Figura 4.14 Fuerzas cortantes en la línea de columnas γ.

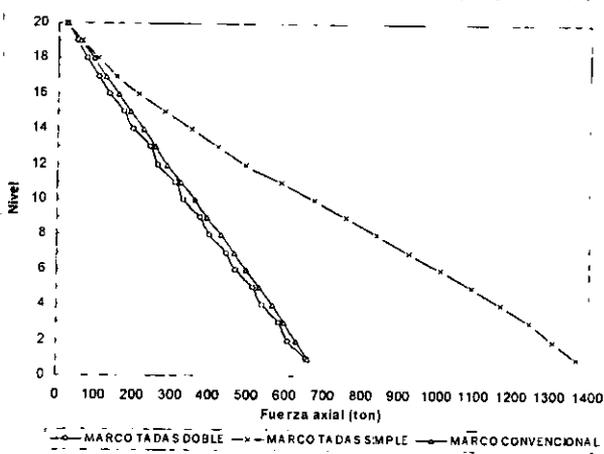


Figura 4.15 Fuerzas axiales en la línea de columnas φ.

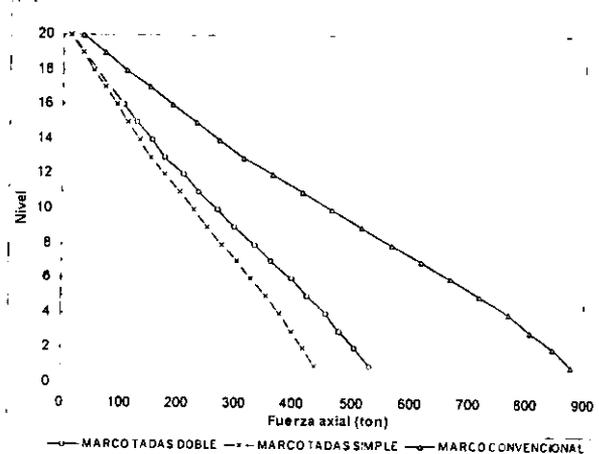


Figura 4.16 Fuerzas axiales en la línea de columnas γ.

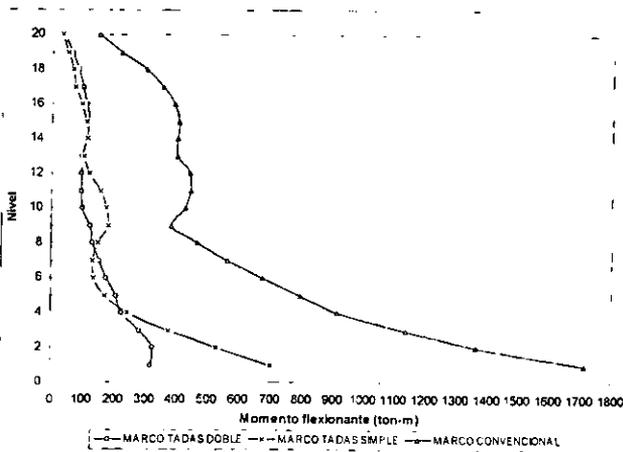


Figura 4.17 Momentos flexionantes en la línea de columnas φ.

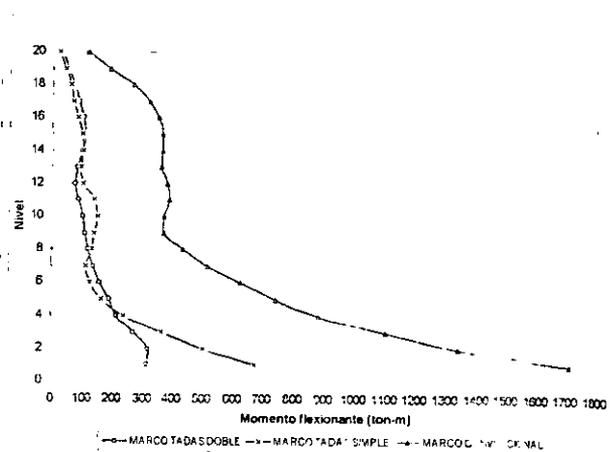


Figura 4.18 Momentos flexionantes en la línea de columnas γ.

En la Tabla 4.1 se muestra el resumen de los porcentajes de reducción, en promedio, de la magnitud de las fuerzas cortantes y de los momentos flexionantes de los dos marcos con disipadores con respecto al marco convencional. En la Tabla 4.2 se muestran los porcentajes de disminución de la magnitud de las fuerzas axiales para las cuatro líneas de columnas, en las dos tablas se indica cual es el marco estructural de referencia.

Tabla 4.1 Porcentajes de reducción de la magnitud de las fuerzas cortantes y momentos flexionantes en las líneas de columnas α , β , ϕ y γ .

Sistema estructural de referencia		Fuerza Cortante	Momento Flexionante
Marco Convencional			
Línea α	TADAS DOBLE	67%	74%
Línea β	TADAS DOBLE	70%	74%
Línea ϕ	TADAS DOBLE	70%	74%
Línea γ	TADAS DOBLE	69%	74%
Línea α	TADAS SIMPLE	67%	72%
Línea β	TADAS SIMPLE	66%	71%
Línea ϕ	TADAS SIMPLE	66%	71%
Línea γ	TADAS SIMPLE	67%	72%

Tabla 4.2 Porcentajes de reducción de la magnitud de las fuerzas axiales.

Sistema estructural de referencia		Fuerza axial
Marco Convencional		
Línea α	TADAS DOBLE	42%
Línea γ	TADAS DOBLE	44%
Línea α	TADAS SIMPLE	52%
Línea γ	TADAS SIMPLE	52%

Sistema estructural de referencia		Fuerza axial
Marco TADAS simple		
Línea β	TADAS DOBLE	42%
Línea ϕ	TADAS DOBLE	43%
Línea β	CONVENCIONAL	36%
Línea ϕ	CONVENCIONAL	37%

En las tablas anteriores se observa que los porcentajes de reducción calculados resultan excelentemente altos en las fuerzas cortantes y momentos flexionantes de los dos marcos con disipadores, sin embargo existe una excepción la cual está reflejada en las fuerzas axiales tan significativas en magnitud que se inducen en las columnas de la crujía central del marco TADAS simple, es decir las líneas de columnas β y ϕ (Tabla 4.2). En este aspecto particular y debido a este efecto axial tan desfavorable el marco TADAS simple resulta indeseable e inconveniente. En

esas líneas de columnas β y ϕ del marco TADAS doble y del marco convencional las fuerzas axiales son claramente menores que en las mismas líneas β y ϕ del marco TADAS simple. El porcentaje obtenido en las líneas de columnas α y γ del marco TADAS doble (Tabla 4.2) es satisfactorio aunque es un poco menor que el porcentaje obtenido en el marco TADAS simple.

Finalmente de los tres marcos estructurales, es notable que en el marco con disipadores TADAS doble los elementos mecánicos son inducidos con mejor distribución y menor magnitud de esfuerzos. Si esto se hace extensivo a la cimentación el marco TADAS doble influye a favor de abatir el costo de la cimentación. Efectivamente si se utilizan dispositivos disipadores TADAS y se distribuyen tal y como se presentan en el marco TADAS doble (Figura 3.4 o 3.12) las fuerzas internas transmitidas desde la superestructura a la cimentación disminuyen muy favorablemente.

4.3.4 ENVOLVENTES DE FUERZAS CORTANTES Y DE MOMENTOS FLEXIONANTES EN LAS TRABES DE LAS CRUJÍAS κ , λ Y μ

En las Figuras 4.19 a 4.24 se muestran las envolventes de las fuerzas cortantes y de los momentos flexionantes máximos para las trabes de las crujías κ , λ y μ de los marcos con disipadores y del marco convencional. En las gráficas cada punto de la envolvente representa al valor máximo de las fuerzas cortantes o momentos flexionantes que actúan en los extremos de cada trabe durante el movimiento sísmico. Dentro de las gráficas nuevamente se visualiza la gran disminución en las fuerzas internas al emplear dispositivos disipadores TADAS. Los momentos flexionantes desarrollados en las trabes de la crujía κ del marco TADAS doble son aproximadamente 68% menores que los momentos en la misma crujía del marco convencional y en el marco TADAS simple en la misma crujía los momentos son 70% menores que en el marco convencional. En lo que se refiere a las fuerzas cortantes, en esta crujía κ del marco TADAS doble las fuerzas cortantes son 55% menores que las fuerzas cortantes en la misma crujía del marco convencional y en el marco TADAS simple las fuerzas cortantes que se desarrollaron son 60% menores que las fuerzas que actuaron en la misma crujía del marco convencional.

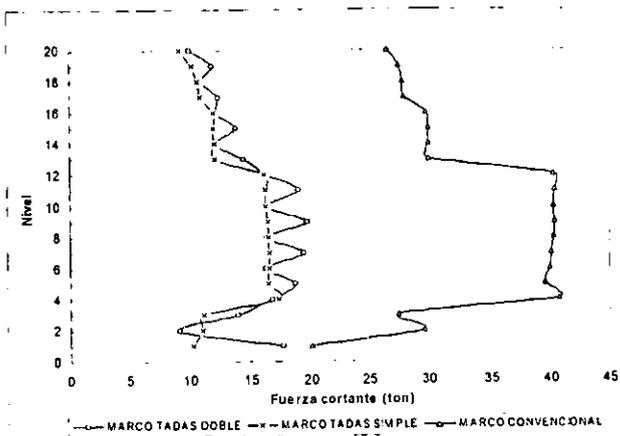


Figura 4.19 Fuerzas cortantes máximas en las traves de la cruzía κ .

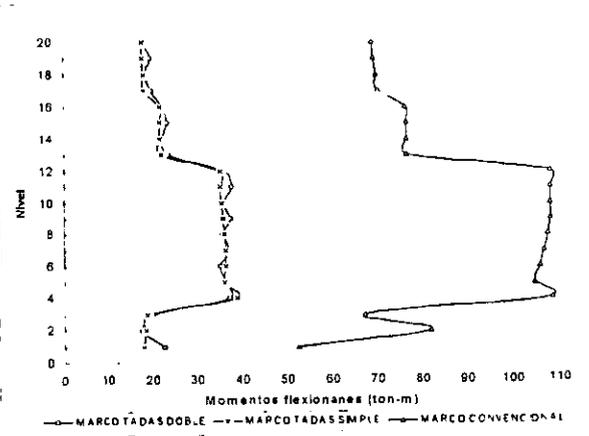


Figura 4.20 Momentos flexionantes máximos en las traves de la cruzía κ .

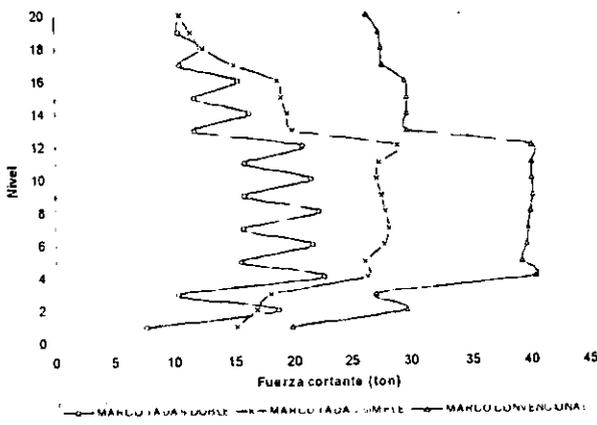


Figura 4.21 Fuerzas cortantes máximas en las traves de la cruzía λ .

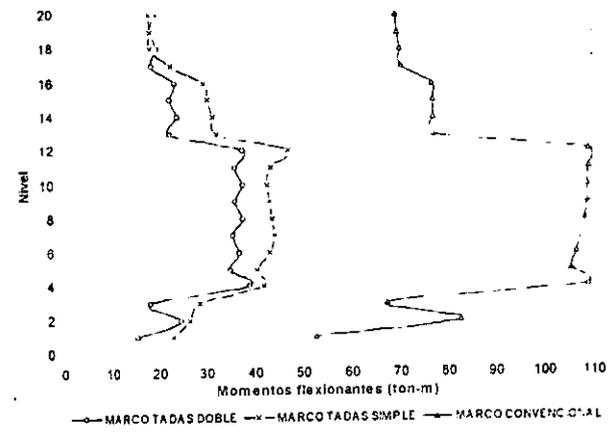


Figura 4.22 Momentos flexionantes máximos en las traves de la cruzía λ .

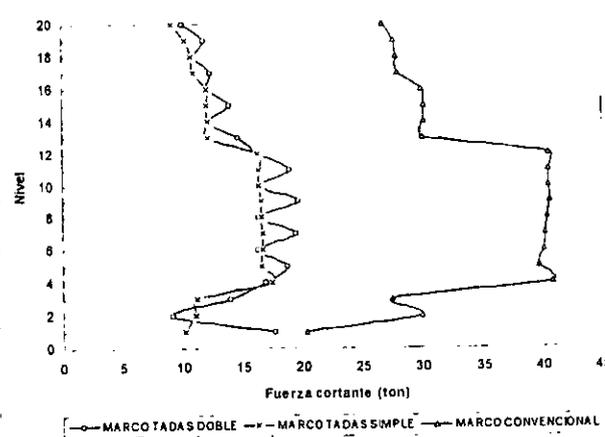


Figura 4.23 Fuerzas cortantes máximas en las traves de la cruzía μ .

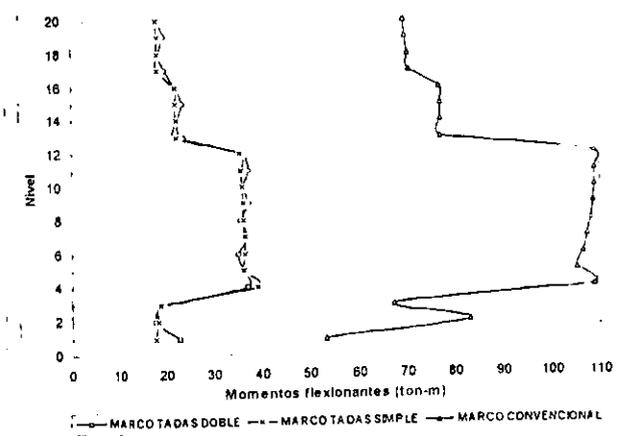


Figura 4.24 Momentos flexionantes máximos en las traves de la cruzía μ .

En la Tabla 4.3 se presenta el resumen de los porcentajes de disminución, en promedio, de las fuerzas cortantes y momentos flexionantes en las tres crujiás de los marcos con disipadores con respecto al marco convencional.

Tabla 4.3 Porcentajes de reducción de la magnitud de las fuerzas cortantes y momentos flexionantes en las traveses de las crujiás κ , λ y μ .

Sistema estructural de referencia			
Marco Convencional			
		Fuerza cortante	Momento flexionante
Crujiá κ	TADAS DOBLE	55%	68%
Crujiá λ	TADAS DOBLE	54%	69%
Crujiá μ	TADAS DOBLE	55%	69%
Crujiá κ	TADAS SIMPLE	60%	70%
Crujiá λ	TADAS SIMPLE	37%	62%
Crujiá μ	TADAS SIMPLE	60%	70%

En la Tabla 4.3 se observa que los porcentajes de reducción obtenidos son muy significativos; se aprecia que en el marco TADAS doble la disminución de la magnitud de los elementos mecánicos en las traveses es casi uniforme; en consecuencia, el marco TADAS doble resulta más conveniente y satisfactorio con relación al efecto de disminución.

4.3.5 FORMACIÓN DE ARTICULACIONES PLÁSTICAS EN LOS MARCOS CON DISIPADORES Y EN EL MARCO CONVENCIONAL

En las Figuras 4.25, 4.27 y 4.28 se indica la localización de los “puntos” donde se formaron las articulaciones plásticas correspondientes al marco TADAS doble, al marco TADAS simple y al marco convencional. Para traveses y columnas se presentan las rotaciones acumuladas de las articulaciones plásticas que ocurren en los extremos de traveses y columnas. En los marcos con disipadores, la rotación del disipador que se presenta corresponde a la rotación plástica acumulada del dispositivo disipador TADAS en su sección extrema superior cercana a la conexión con la trabe de acero. Los rangos de amplitud de la rotación acumulada de las articulaciones plásticas de traveses, columnas y disipadores se muestran en dichas figuras.

A continuación se comentan los resultados obtenidos para los tres marcos al final del proceso de análisis de respuesta inelástica con el programa de cómputo DRAIN-2D.

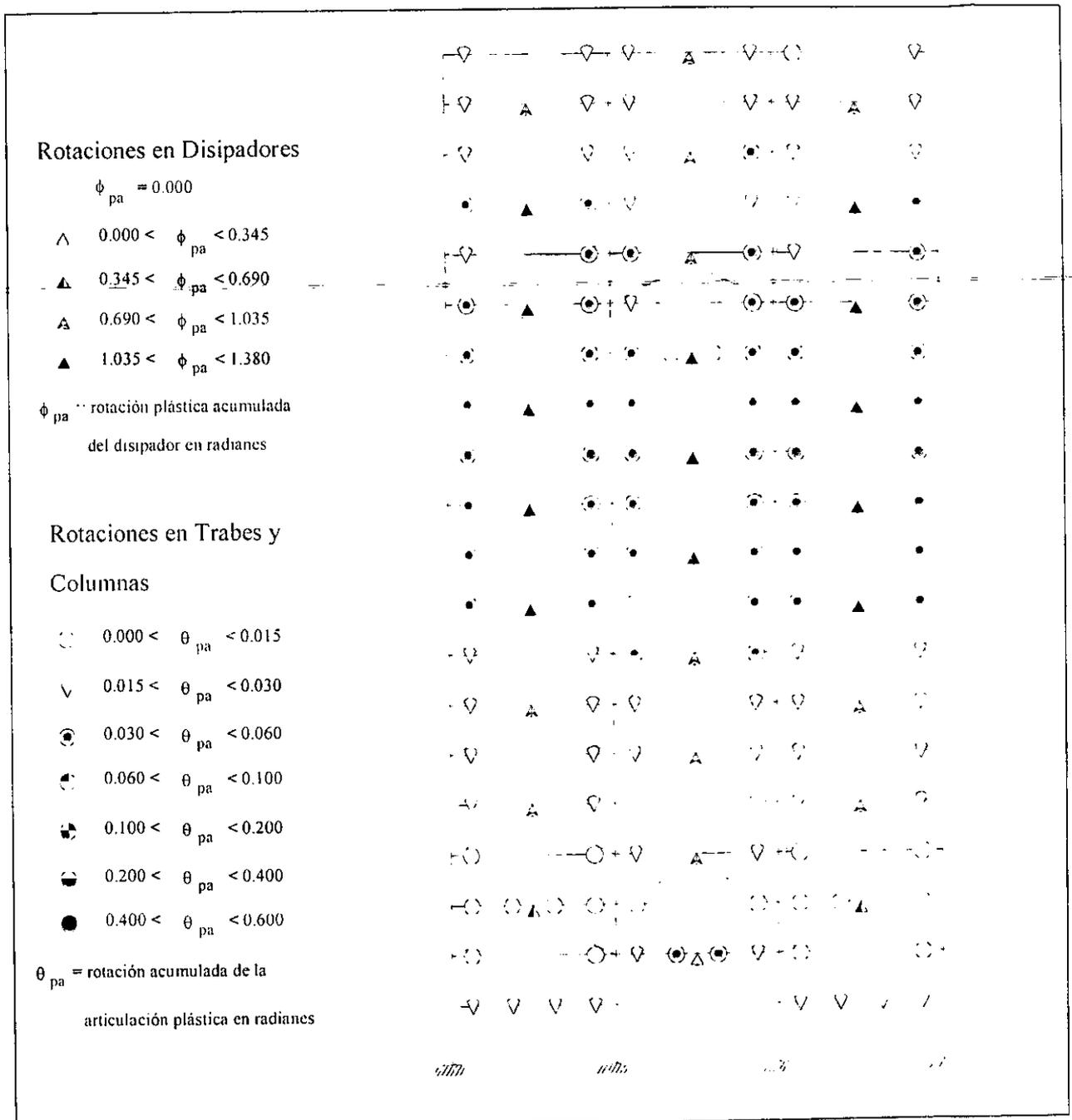


Figura 4.25 Rotaciones plásticas en el marco TADAS doble.

Primeramente se muestra el patrón de articulaciones plásticas que se formó en el marco TADAS doble (Figura 4.25). En su diseño se había previsto que la respuesta estructural de sus miembros estructurales fuera completamente elástica, sin embargo ocurren daños estructurales que se generan principalmente en las trabes. Esos daños se expresan por medio de las rotaciones acumuladas de las articulaciones plásticas en los extremos de las trabes. En la Figura 4.25 se observa que las máximas rotaciones plásticas acumuladas (θ_{pa}) que se generan en las trabes están entre 0.030 y 0.060 radianes, ocurren 52 rotaciones plásticas de esta magnitud y se localizan principalmente en las trabes del nivel 9 al 17. En las demás trabes ocurren daños en las que sus rotaciones plásticas acumuladas están dentro del rango de 0.000 y 0.030 radianes, se generan 55 rotaciones plásticas entre 0.015 y 0.030 radianes y 23 rotaciones plásticas en el rango de magnitud de 0.000 y 0.015 radianes (trabes localizadas del nivel 1 al 8 y del 18 al 20). En el mecanismo de falla de un marco es muy frecuente que se presenten mecanismos de falla tipo viga (Figura 4.26). Al generarse articulaciones en ambos extremos de la trabe, ésta aún tiene capacidad por flexión ya que los extremos ceden por fluencia y se deforman inelásticamente hasta que se genere la articulación plástica en el centro del claro, instante en el que el elemento estructural se vuelve inestable y agota completamente su capacidad por flexión.

En lo referente a las columnas del marco TADAS doble, se observa que tuvieron mejor comportamiento ya que no ingresaron en el rango inelástico y no sufrieron ningún tipo de daño, las rotaciones plásticas son nulas y su respuesta fue plenamente elástica durante el evento sísmico.

Los disipadores de energía del marco TADAS doble (Figura 4.25) tuvieron un excelente comportamiento ya que si fluyeron y desarrollaron trabajo inelástico, solamente los dos disipadores del primer nivel no ingresaron en el rango inelástico. Los disipadores del nivel 9 al 15 y del nivel 17 tuvieron una rotación plástica acumulada entre 1.035 y 1.38 radianes; los disipadores del nivel 4 al 8, del 16 y del 18 al 20 desarrollaron una rotación plástica acumulada entre 0.690 y 1.035 radianes. La efectividad estructural de los dispositivos disipadores TADAS se puede analizar por medio de los ciclos histeréticos de cada uno de ellos, los cuales se muestran

más adelante. La forma de la respuesta dinámica del marco TADAS doble se asemeja al diseño basado en la filosofía columna fuerte-viga débil, ya que la capacidad a flexión de las columnas que se conectan en un nudo es mayor que la resistencia por flexión de las traveses que se conectan al mismo. El mecanismo de falla que se genera en el marco TADAS doble es aceptable ya que esta definido por articulaciones plásticas en las traveses del mismo sin que se presenten articulaciones plásticas en las columnas.

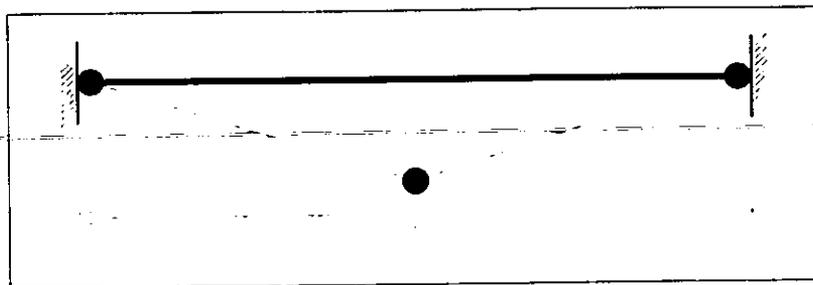


Figura 4.26 Mecanismo de falla total de una trabe.

En el marco TADAS simple (Figura 4.27) se aprecia que los daños también se generalizan en las traveses, los mayores daños ocurren en las traveses de la crujía central y en varias de ellas aparecen las rotaciones plásticas acumuladas de mayor magnitud, en comparación con el daño de las traveses de los otros dos marcos, por ejemplo en la trabe del nivel 3 ocurren dos articulaciones plásticas de 0.60 radianes y en la trabe del nivel 2 ocurren dos rotaciones plásticas de 0.45 radianes; en las demás traveses de esta crujía aparecen rotaciones plásticas cuya magnitud es menor, sin embargo el daño generado en ellas es severo. El daño estructural que se produce en las traveses de las crujías exteriores también es importante, las articulaciones plásticas que ocurren están en el rango de 0.000 y 0.100 radianes. Como se observa en la Figura 4.27 todas las traveses del marco TADAS simple se plastificaron, es decir trabajaron en su rango inelástico.

Las columnas del marco TADAS simple del nivel 2 al 20 y las columnas exteriores del primer nivel se comportan elásticamente ya que las rotaciones plásticas son nulas. Sin embargo las dos columnas interiores del primer nivel (Figura 4.27) sufren daños ya que desarrollaron deformaciones inelásticas, las rotaciones plásticas se generan en su extremo inferior con una magnitud dentro del rango de 0.000 y 0.015 radianes; en la etapa del diseño del marco TADAS

simple se determinó que las dos columnas referidas no cumplen los estados límite de falla para elementos flexocomprimidos, la respuesta sísmica obtenida del análisis dinámico paso a paso confirma la incapacidad por resistencia de estos elementos. Desde el punto de vista del daño estructural la respuesta sísmica del marco TADAS simple es inconveniente e indeseable ya que al presentarse las articulaciones plásticas en las columnas del primer nivel se torna crítico y desfavorable que se produzca un potencial mecanismo de falla.

Algunos disipadores del marco TADAS simple no fluyen, específicamente se trata de los disipadores de los niveles 1, 2 y del 13 al 16. Solamente los disipadores de los niveles 3 al 12 y del 17 al 20 se comportan adecuadamente (Figura 4.27) ya que al ingresar en el rango inelástico disipan energía. Unicamente los disipadores del nivel 4 y 5 se encuentran dentro del rango máximo de rotaciones plásticas acumuladas (entre 1.035 y 1.380 radianes) establecido en este trabajo.

En los dos marcos equipados con disipadores TADAS se observó que las diagonales del sistema disipador se comportan adecuadamente, ya que en las diagonales de los dos marcos no ocurrieron deformaciones axiales plásticas, en cualquier instante del análisis inelástico las diagonales no fluyeron y se comportaron dentro del rango elástico (Figuras 4.25 y 4.27). También es importante mencionar que las fuerzas axiales inducidas en las diagonales durante el movimiento sísmico disminuyeron en una magnitud apreciable, tomando como referencia las fuerzas internas de diseño que se emplearon para diseñar estos elementos.

En la Figura 4.28 se muestran las articulaciones plásticas del marco convencional. A excepción del primer nivel se observa que todas las trabes se deforman inelásticamente y sufren daños estructurales, las máximas rotaciones plásticas acumuladas se generan en las trabes que se ubican del nivel 4 al 12 y se encuentran dentro del rango de magnitud entre 0.060 y 0.100 radianes. En las trabes que se localizan del nivel 13 al 16 se presentan rotaciones plásticas cuya magnitud está entre 0.030 y 0.060 radianes. En las trabes del nivel 2, 3 y del 17 al 20 ocurren rotaciones plásticas acumuladas que están dentro del rango de 0.000 y 0.030 radianes.

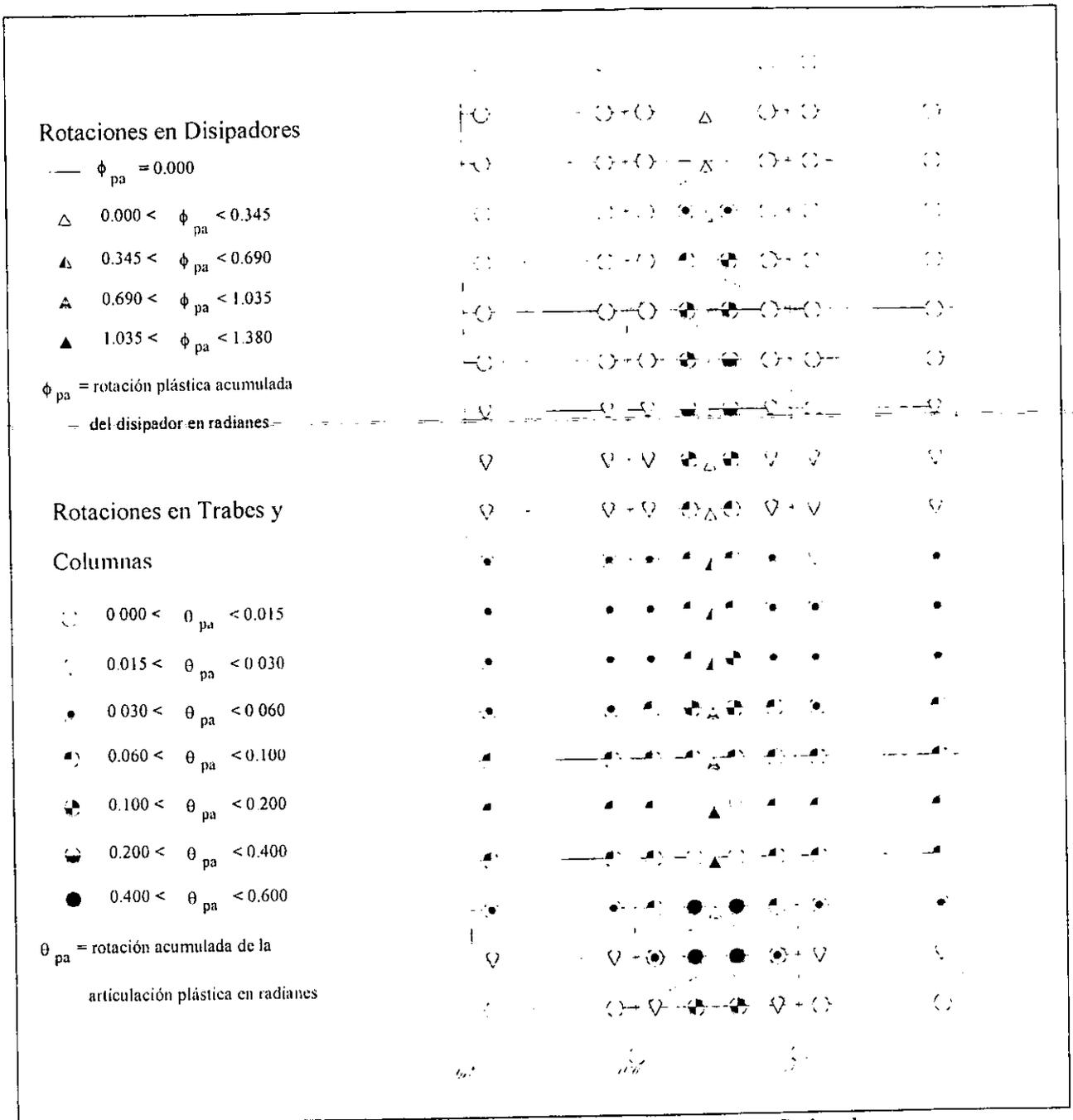


Figura 4.27 Rotaciones plásticas en el marco TADAS simple.

Las rotaciones plásticas en las columnas del marco convencional no existen, es decir todas las columnas se comportan en el rango elástico por lo cual el daño estructural es nulo. En este

marco la totalidad de la energía suministrada por el sismo fue disipada por medio de las deformaciones inelásticas de las trabes, lo cual se refleja en deterioros estructurales severos.

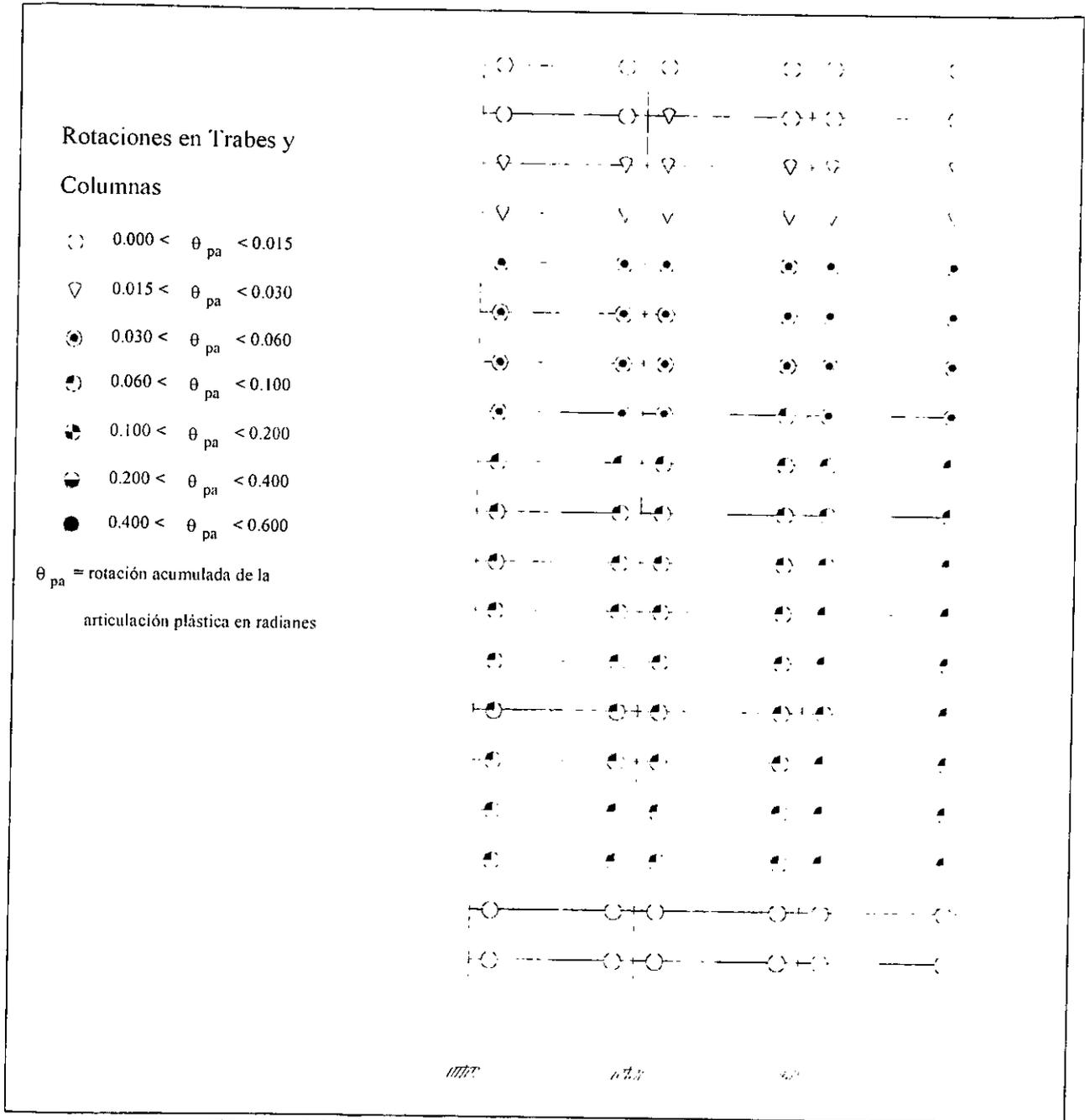


Figura 4.28 Rotaciones plásticas en el marco convencional.

Si el daño estructural se calcula por medio de la relación del número de elementos que ceden por fluencia del material (sin considerar los disipadores) durante la excitación sísmica entre el número total de elementos estructurales del marco, es decir:

$$R.D. = \frac{\text{Número de traveses y columnas que fluyen}}{\text{Número total de traveses y columnas}} \quad (4.1)$$

entonces la relación de daño para cada marco es:

$$(R.D.)_{\text{Marco TADAS doble}} = \frac{59}{80 \text{ col} + 60 \text{ traveses}} = 0.42$$

$$(R.D.)_{\text{Marco TADAS simple}} = \frac{62}{80 \text{ col} + 60 \text{ traveses}} = 0.44$$

$$(R.D.)_{\text{Marco Convencional}} = \frac{57}{80 \text{ col} + 60 \text{ traveses}} = 0.41$$

Considerando la relación definida anteriormente y desde el punto de vista cuantitativo, el deterioro estructural es muy similar entre el marco convencional y el marco TADAS doble; el 42% de los elementos estructurales del marco TADAS doble fluyeron, mientras que en el marco convencional el 41% de los elementos estructurales alcanzaron la fluencia, por otra parte en el marco TADAS simple el 44% de los elementos estructurales fluyeron. Sin embargo al tomar en cuenta el grado de daño, es decir la magnitud de las rotaciones plásticas, el daño estructural es menor en el marco con disipadores TADAS doble que en los otros dos sistemas estructurales. Para fines de proyecto se debe considerar que los costos de reparación elevan los costos globales; en el marco TADAS simple los costos de reparación se elevan, debido a que existen más elementos dañados los cuales tienen el más grave deterioro estructural; con respecto al marco convencional su daño estructural es mayor que el del marco TADAS doble, y en éste sistema los costos de reparación resultan inferiores en virtud de que existen elementos cuyo deterioro estructural es notablemente menor. Los dispositivos disipadores TADAS se excluyen de los miembros estructurales dañados ya que ellos se diseñan especialmente para desarrollar trabajo inelástico.

4.3.6 CICLOS HISTERÉTICOS Y ENERGÍA DISIPADA POR LOS DISIPADORES

En este inciso se estudia la disipación de energía únicamente en los marcos con disipadores (TADAS doble y TADAS simple). Los dispositivos disipadores TADAS fueron modelados en el programa DRAIN-2D como elementos "viga" (Beam o tipo 5). En el capítulo 2 se explicó que los dispositivos disipadores TADAS trabajan únicamente a flexión para los cuales no se considera ningún tipo de degradación, ya sea de rigidez o de resistencia; su comportamiento histerético se puede idealizar por una relación momento-rotación bilineal (Tsai *et al.*, 1993c), por lo cual los ciclos histeréticos que se muestran son estables. Estos ciclos relacionan el momento flexionante contra la rotación plástica de cada dispositivo. Los dispositivos disipadores TADAS fluyen y disipan energía en su sección extrema superior cercana a la conexión con la trabe de acero. En las siguientes páginas se presentan los ciclos histeréticos de cada uno de los veintiocho disipadores TADAS que fluyen y disipan energía en el marco TADAS doble (Figura 4.29), todos los disipadores se encuentran numerados en la Figura 4.4. Las gráficas del grupo de disipadores del marco TADAS doble se realizaron a la misma escala con el fin de poder visualizar y comparar los momentos y las rotaciones plásticas que se desarrollaron en cada dispositivo, así como la energía disipada por los dispositivos disipadores TADAS. Posteriormente se presentan los ciclos histeréticos de los catorce disipadores TADAS que trabajan inelásticamente y disipan energía en el marco TADAS simple.

En la Tabla 4.4 se presentan las rotaciones plásticas máximas que experimentó cada disipador TADAS y la energía acumulada disipada por cada dispositivo. La energía disipada se obtiene calculando el área acumulada del ciclo histerético; por ejemplo si el ciclo es una gráfica rectangular de lados a y b y se tuviesen n ciclos de comportamiento igual, la energía total disipada del dispositivo sería n veces el factor $a*b$; para calcular la energía disipada por cada disipador se recurrió a emplear un programa codificado en lenguaje FORTRAN (Silva, 1993), el cual permite calcular y acumular el área encerrada en cada lazo de histéresis, acumulando finalmente el área del ciclo histerético, la cual representa la energía disipada por cada elemento disipador.

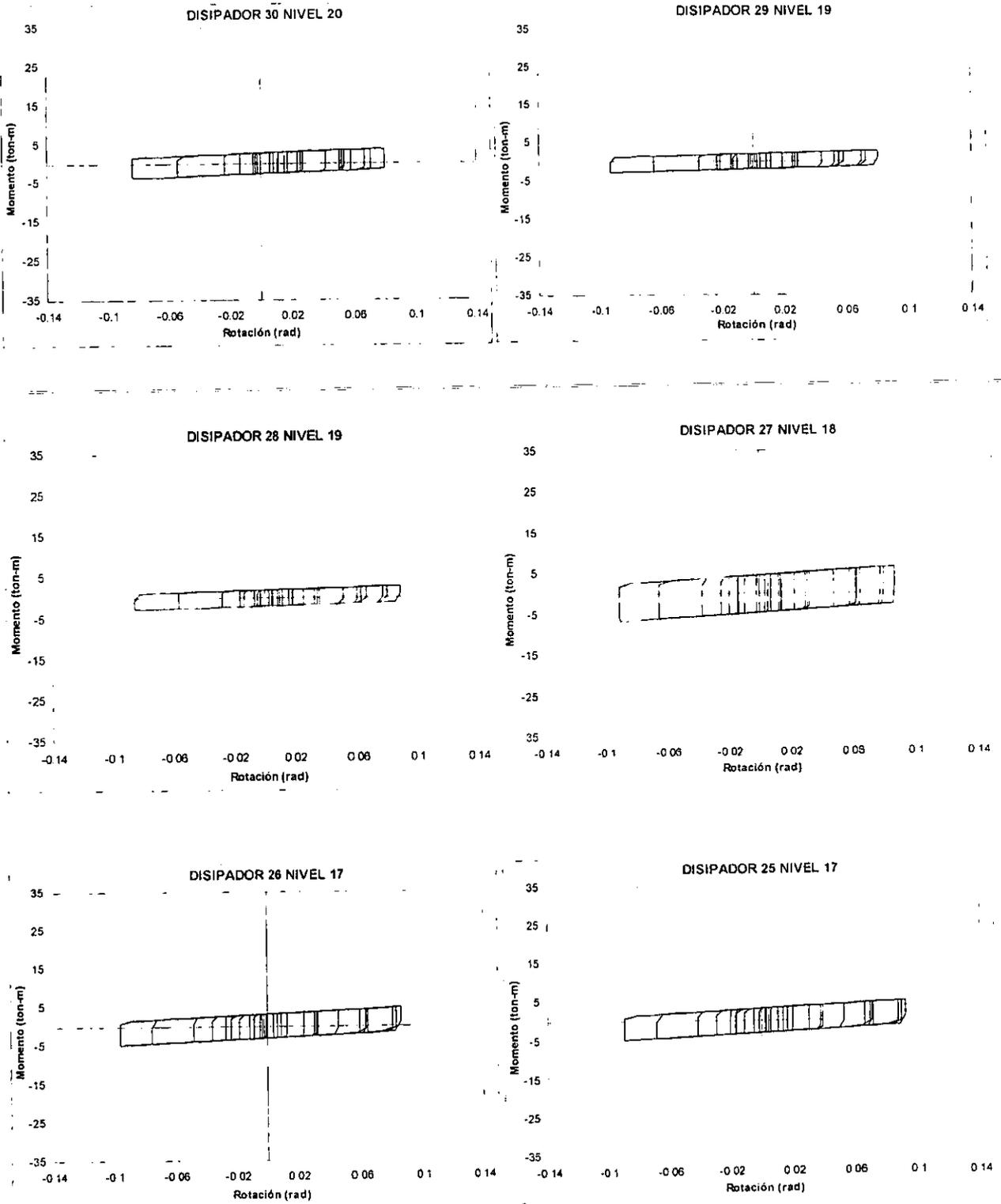


Figura 4.29 Ciclos histeréticos de los dispositivos disipadores en el marco TADAS doble.

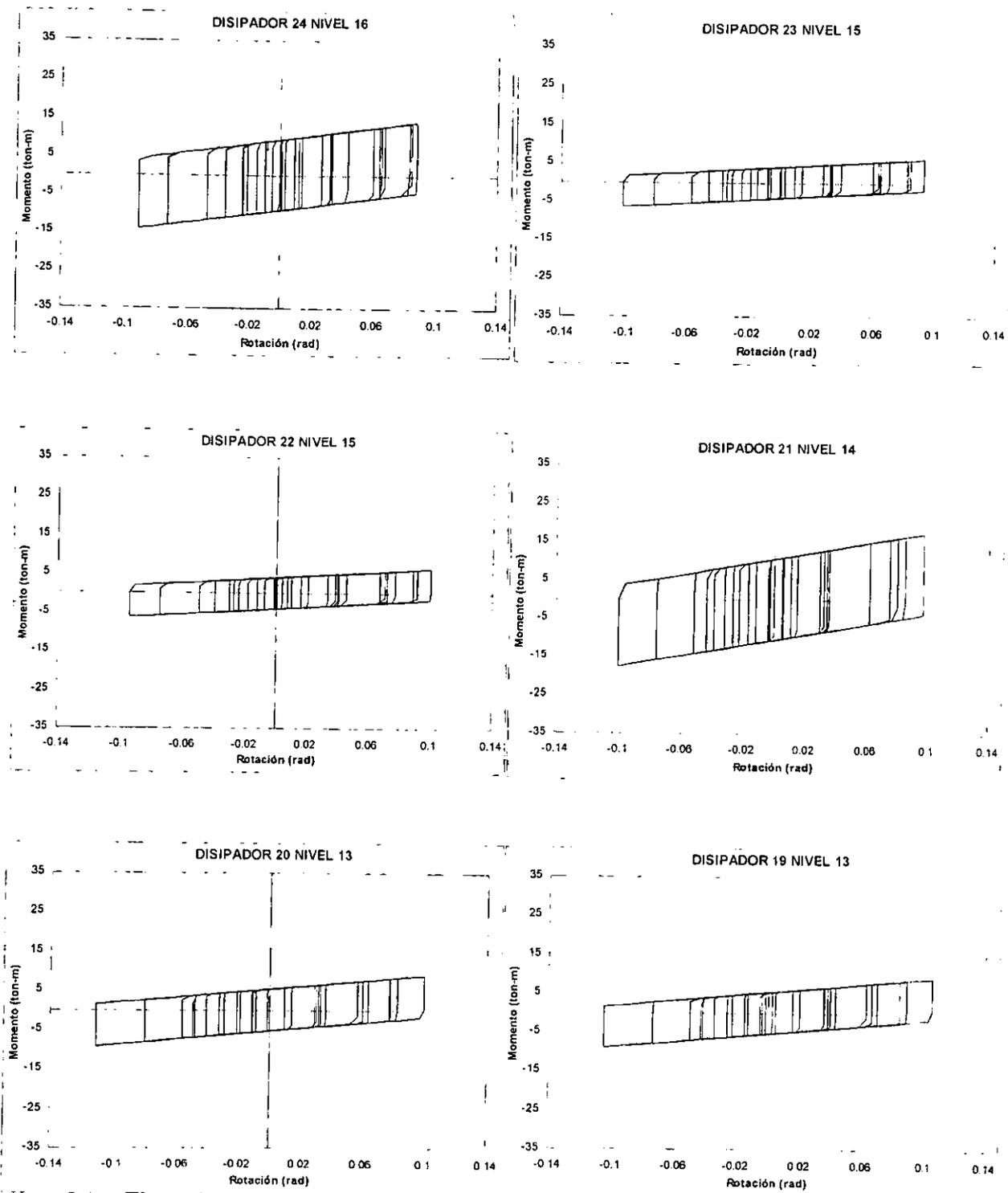


Figura 4.29 Ciclos histeréticos de los dispositivos disipadores en el marco TADAS doble (continuación).

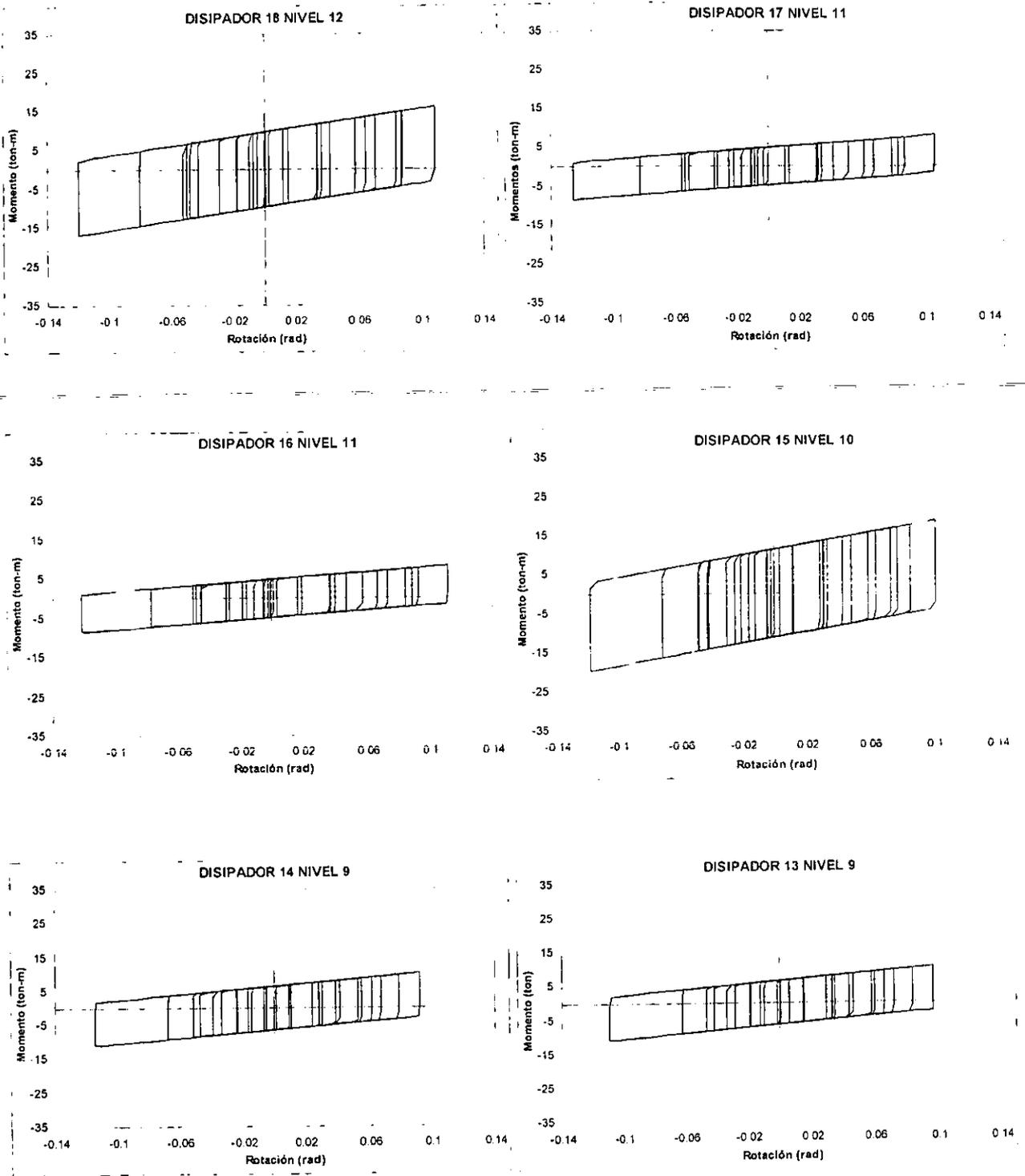


Figura 4.29 Ciclos histeréticos de los dispositivos disipadores en el marco TADAS doble (continuación).

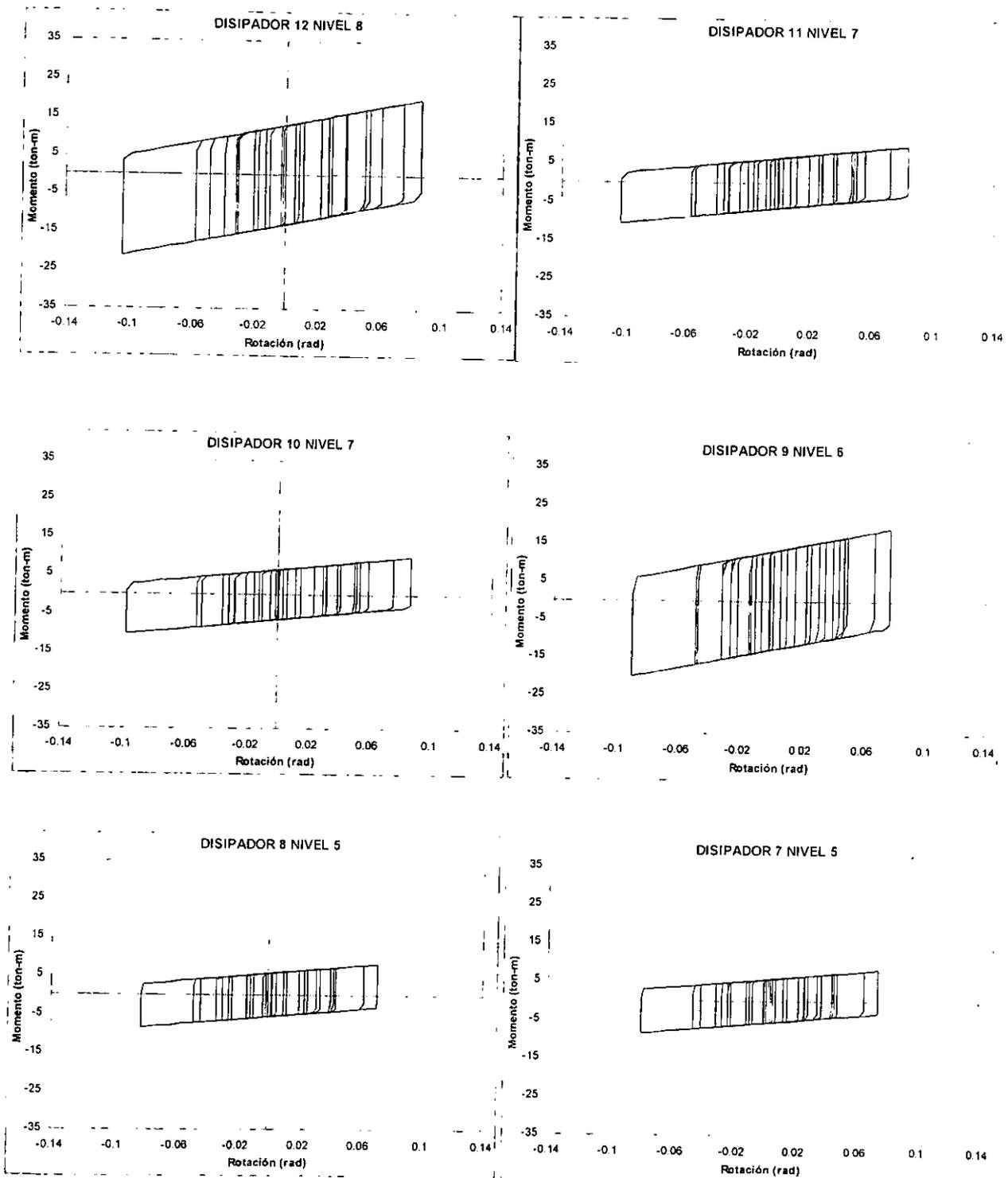


Figura 4.29 Ciclos histeréticos de los dispositivos disipadores en el marco TADAS doble (continuación).

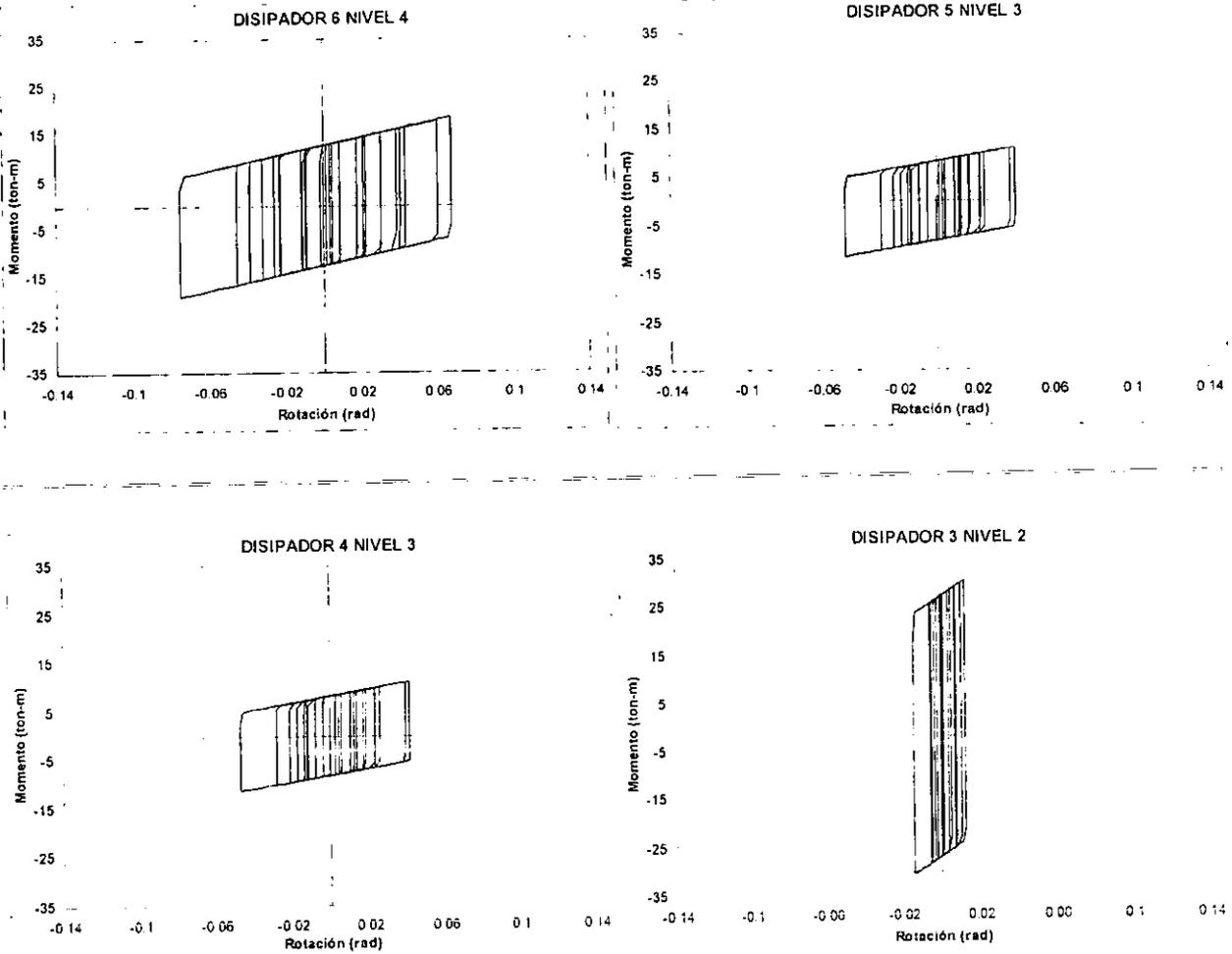


Figura 4.29 Ciclos histeréticos de los dispositivos disipadores en el marco TADAS doble (continuación).

En los ciclos histeréticos anteriores y en la Tabla 4.4 se aprecia que la disipación de energía es máxima en el disipador 15 localizado en el nivel 10 del marco TADAS doble, a partir de este nivel la energía disipada tiende a disminuir conforme se incrementa o se disminuye el nivel en el marco (Tabla 4.4). La amplitud de las rotaciones plásticas máximas (en valor absoluto) de los disipadores que fluyen y disipan energía ubicados del nivel 2 al 20 se mantiene dentro del rango de 0.012 radianes (disipador 3 del nivel 2) y 0.126 radianes (disipador 17 ubicado en el nivel 11), ver Tabla 4.4. Los ciclos histeréticos de los disipadores ubicados en esos niveles tienen una forma muy semejante a un paralelogramo, en los niveles 2 y 3 los ciclos histeréticos son más delgados y las rotaciones plásticas máximas son pequeñas. En el nivel 1 sucede algo importante, los disipadores 1 y 2 no alcanzan a fluir y entonces la disipación de

energía es nula. En este nivel la disipación de energía se generó únicamente por el comportamiento inelástico de las trabes, lo anterior se debe a que en ese nivel la rigidez de la trabe de acero es bastante menor que la rigidez del dispositivo disipador TADAS.

Tabla 4.4 Rotaciones máximas y energía disipada de los disipadores en el marco TADAS doble.

Elemento	Rotación plástica Máxima positiva (rad)	Rotación plástica máxima negativa (rad)	Energía disipada (ton-m-rad)
Disipador 30 nivel 20	0.07957	-0.08393*	3.75
Disipador 29 nivel 19	0.08117	-0.09256*	3.31
Disipador 28 nivel 19	0.08858*	-0.08516	3.31
Disipador 27 nivel 18	0.08761	-0.09078*	8.29
Disipador 26 nivel 17	0.08604	-0.09577*	6.44
Disipador 25 nivel 17	0.09314*	-0.08867	6.45
Disipador 24 nivel 16	0.08857	-0.09035*	18.74
Disipador 23 nivel 15	0.09395	-0.10079*	9.28
Disipador 22 nivel 15	0.10059*	-0.09415	9.29
Disipador 21 nivel 14	0.09751	-0.09994*	23.71
Disipador 20 nivel 13	0.09974	-0.11109*	12.74
Disipador 19 nivel 13	0.10574*	-0.10510	12.73
Disipador 18 nivel 12	0.10914	-0.11929*	24.28
Disipador 17 nivel 11	0.10629	-0.12613*	12.57
Disipador 16 nivel 11	0.11199	-0.12042*	12.56
Disipador 15 nivel 10	0.10166	-0.11840*	26.68
Disipador 14 nivel 9	0.09225	-0.11410*	14.17
Disipador 13 nivel 9	0.09705	-0.10931*	14.14
Disipador 12 nivel 8	0.08775	-0.10388*	25.54
Disipador 11 nivel 7	0.08371	-0.10141*	12.75
Disipador 10 nivel 7	0.08755	-0.09756*	12.72
Disipador 9 nivel 6	0.07771	-0.08858*	21.97
Disipador 8 nivel 5	0.07118	-0.08225*	9.22
Disipador 7 nivel 5	0.07394	-0.07950*	9.21
Disipador 6 nivel 4	0.06769	-0.07440*	18.56
Disipador 5 nivel 3	0.04075	-0.04771*	7.16
Disipador 4 nivel 3	0.04211	-0.04644*	7.15

* Valor máximo de la rotación plástica.

Tabla 4.4 (continuación).

Elemento	Rotación plástica Máxima positiva (rad)	Rotación plástica máxima negativa (rad)	Energía disipada (ton-m-rad)
Disipador 3 nivel 2	0.01298	-0.01424*	5.03
Disipador 2 nivel 1	0	0	0.00
Disipador 1 nivel 1	0	0	0.00

* Valor máximo de la rotación plástica.

En cada entrepiso que contiene dos disipadores la energía disipada es casi igual en magnitud y la geometría de los dos ciclos histeréticos correspondientes es prácticamente idéntica. En los ciclos histeréticos se observa que los disipadores ubicados en los niveles 2, 19 y 20 trabajan menos en virtud de que la cantidad de disipación de energía es reducida. Finalmente es notable que los disipadores instalados en los niveles 3 al 18 son más eficientes, ya que el área acumulada en sus ciclos histeréticos es mayor que en los demás niveles y consecuentemente la energía disipada por esos disipadores también lo es (Tabla 4.4). En la figura 4.30 se presenta la gráfica de la energía disipada por los disipadores del marco TADAS doble con referencia al nivel de la estructura, claramente se observa que en los niveles 3 al 18 se alcanza la mayor disipación de energía. La magnitud máxima se localiza en el nivel 9, aunque este valor representa la suma de la energía disipada por los dos disipadores de ese nivel.

La rotación plástica máxima positiva y negativa que cada dispositivo disipador TADAS experimentó durante la excitación sísmica se presenta en la Tabla 4.4, esas rotaciones se muestran gráficamente en la Figura 4.31, obsérvese que la rotación plástica máxima que desarrolló cada uno de los dispositivos TADAS es adecuada, en virtud de que no se supera la capacidad rotacional de los disipadores TADAS, que es de 0.25 radianes (Tsai *et al.*, 1993c). Dentro de este grupo de disipadores, la rotación plástica máxima se presentó en el disipador 17 localizado en el nivel 11 con una magnitud de 0.126 radianes, mientras que el valor mínimo de la rotación plástica máxima se presentó en el disipador 3 ubicado en el nivel 2 con una magnitud de 0.012 radianes; los disipadores 1 y 2 ubicados en el nivel 1 no desarrollaron rotaciones plásticas ya que durante el movimiento sísmico no alcanzan a fluir.

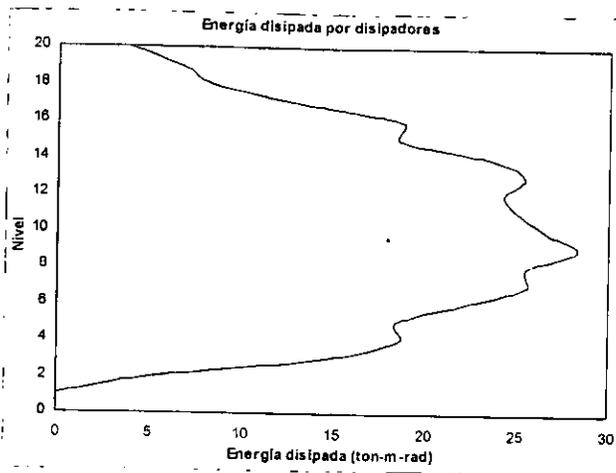


Figura 4.30 Energía disipada por los disipadores del marco TADAS doble.

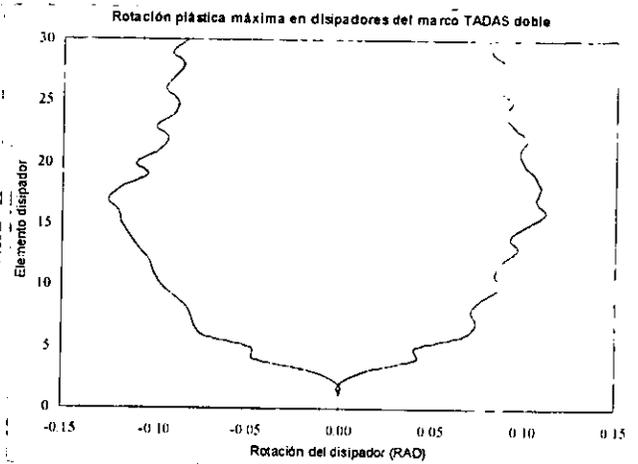


Figura 4.31 Rotaciones plásticas máximas de los disipadores del marco TADAS doble.

A continuación se presentan los ciclos histeréticos de los catorce dispositivos disipadores que fluyeron en el marco TADAS simple (Figura 4.32). Las gráficas de este grupo de disipadores también se realizaron a la misma escala con el fin de poder comparar los momentos y las rotaciones plásticas desarrolladas, así como la disipación de energía de los disipadores TADAS.

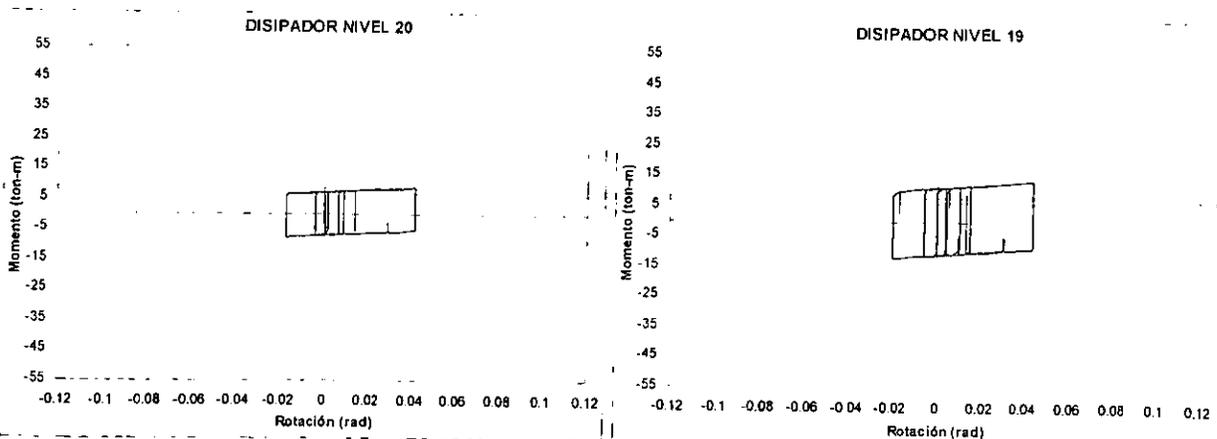


Figura 4.32 Ciclos histeréticos de los dispositivos disipadores en el marco TADAS simple.

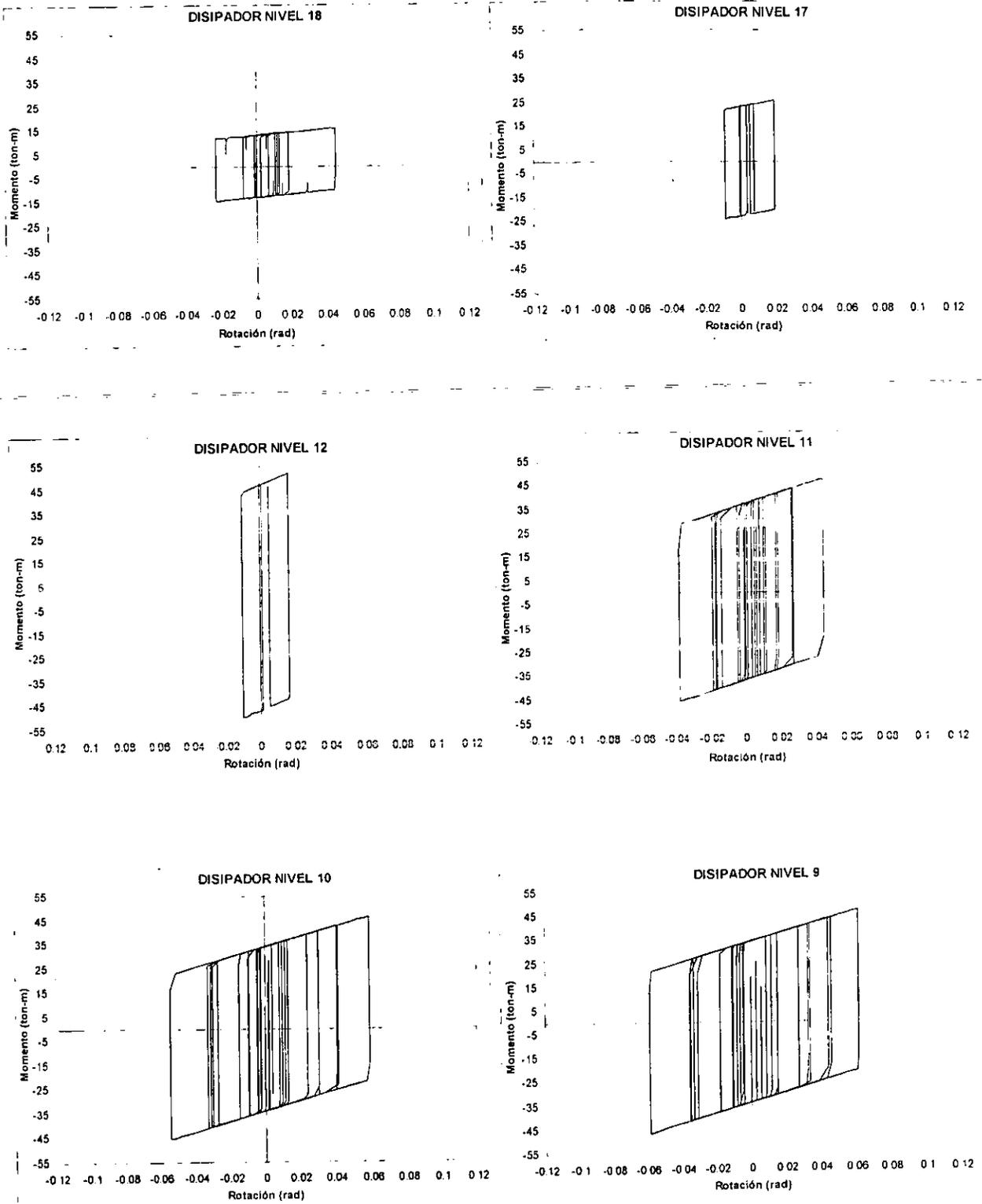


Figura 4.32 Ciclos histeréticos de los dispositivos disipadores en el marco TADAS simple (continuación).

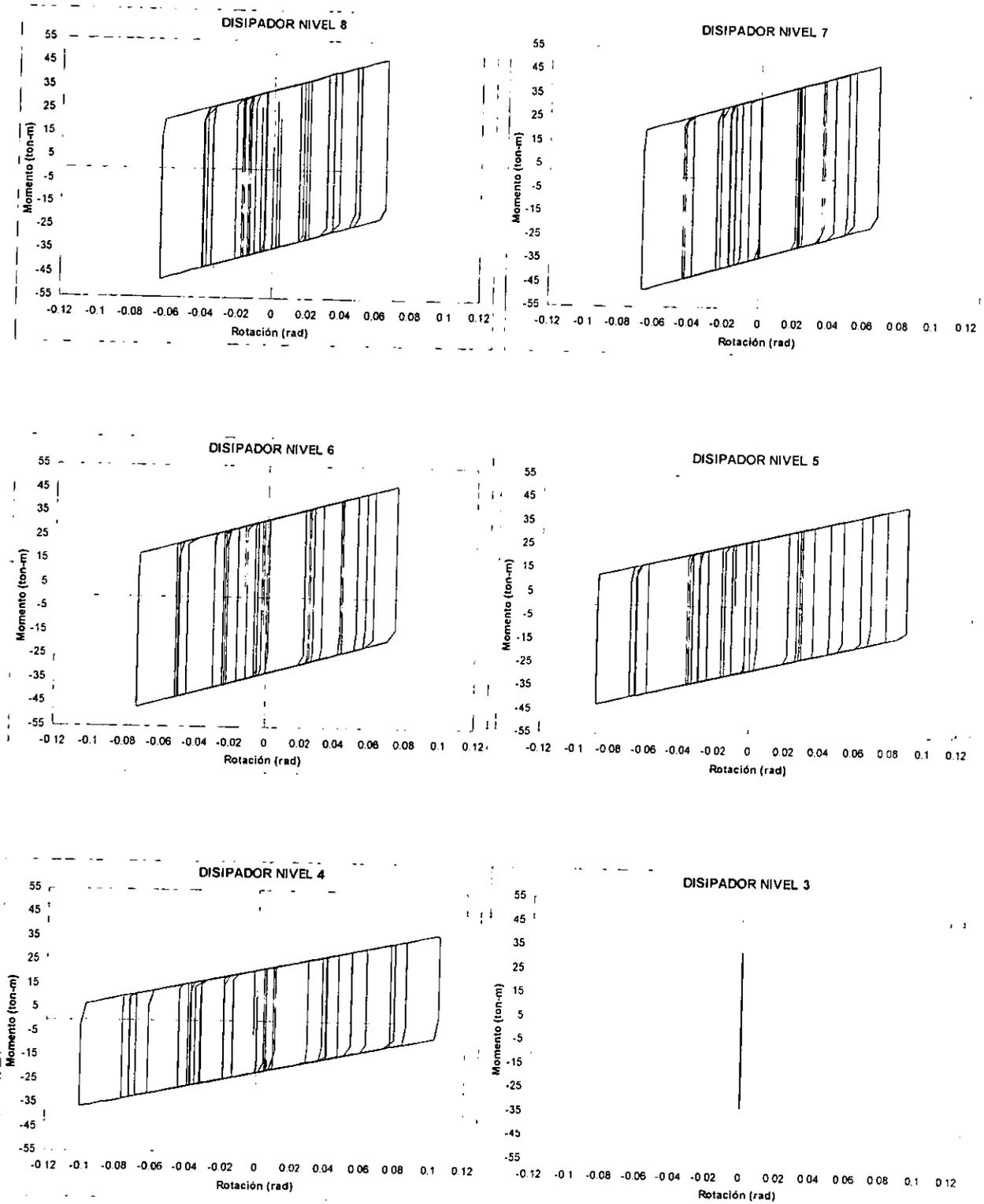


Figura 4.32 Ciclos histeréticos de los dispositivos disipadores en el marco TADAS simple (continuación).

En la Tabla 4.5 se muestra la magnitud de las rotaciones plásticas máximas desarrolladas por los disipadores del marco TADAS simple, también se presenta la energía disipada por los dispositivos durante la excitación sísmica. En los ciclos histeréticos anteriores y en la Tabla 4.5 se observa que la máxima disipación de energía ocurre en el disipador del nivel 5 con una magnitud de 61.95 ton-m-rad, la disipación de energía tiende a disminuir a medida que aumenta el nivel en el marco. El comportamiento global de los disipadores en el marco TADAS simple es muy irregular, en los niveles 17 al 20 los dispositivos disipadores alcanzan a fluir y la disipación de energía es mínima; los disipadores del nivel 13 al 16 no ingresan en el rango inelástico y la energía disipada es nula. Lo más trascendente ocurre en los disipadores localizados del nivel 4 al 11, estos disipadores trabajan en forma más eficiente ya que el área encerrada en sus ciclos histeréticos es mayor, es decir la magnitud de la energía disipada aumenta de manera importante (Tabla 4.5). El disipador ubicado en el nivel 3 alcanza a fluir, sin embargo la energía disipada no es significativa. Los disipadores del nivel 1 y 2 no desarrollan trabajo inelástico ya que no alcanzan a fluir, en todo momento se comportan elásticamente ya que no ceden por fluencia debido que la rigidez del disipador es mayor que la rigidez de la trabe de acero.

Tabla 4.5 Rotaciones plásticas máximas y energía disipada por los disipadores del marco TADAS simple.

Elemento	Rotación plástica máxima positiva (rad)	Rotación plástica máxima negativa (rad)	Energía disipada (ton-m-rad)
Disipador nivel 20	0.04174*	-0.01723	0.98
Disipador nivel 19	0.04399*	-0.01974	1.65
Disipador nivel 18	0.04542*	-0.02304	2.58
Disipador nivel 17	0.01963*	-0.00913	1.38
Disipador nivel 16	0	0	0.00
Disipador nivel 15	0	0	0.00
Disipador nivel 14	0	0	0.00
Disipador nivel 13	0	0	0.00
Disipador nivel 12	0.01734*	-0.01016	2.46
Disipador nivel 11	0.04481*	-0.03776	20.19
* Valor máximo de la rotación plástica.			

Tabla 4.5 (continuación).

Elemento	Rotación plástica máxima positiva (rad)	Rotación plástica Máxima negativa (rad)	Energía disipada (ton-m-rad)
Disipador nivel 10	0.05926*	-0.05398	33.16
Disipador nivel 9	0.06170*	-0.05846	37.94
Disipador nivel 8	0.06545*	-0.06319	44.81
Disipador nivel 7	0.06821*	-0.06628	51.46
Disipador nivel 6	0.07470*	-0.07273	58.76
Disipador nivel 5	0.08997*	-0.08782	61.95
Disipador nivel 4	0.10477*	-0.10001	58.84
Disipador nivel 3	0.00074*	0	0.02
Disipador nivel 2	0	0	0.00
Disipador nivel 1	0	0	0.00

* Valor máximo de la rotación plástica.

El valor máximo de la rotación plástica máxima se presenta en el disipador del nivel 4 con una magnitud de 0.104 radianes (Tabla 4.5), en tanto que el valor mínimo de la rotación plástica se presentó en el dispositivo disipador ubicado en el nivel 3 con una magnitud de 0.00074 radianes. Los disipadores localizados en los niveles 1, 2 y del 13 al 16 no desarrollaron rotaciones plásticas en virtud de que no fluyen y no aportan amortiguamiento histerético. En la Figura 4.33 se presentan las rotaciones plásticas máximas desarrolladas por los disipadores, obsérvese que ninguna de las rotaciones plásticas desarrolladas excede el valor de 0.25 radianes, es decir no se excede la capacidad rotacional de los disipadores TADAS.

En la Figura 4.34 se muestra la variación de la energía disipada por los disipadores del marco TADAS simple a lo largo de la altura del marco, se aprecia claramente que los disipadores localizados del nivel 4 al 11 son más efectivos ya que la magnitud de la energía disipada es notablemente mayor.

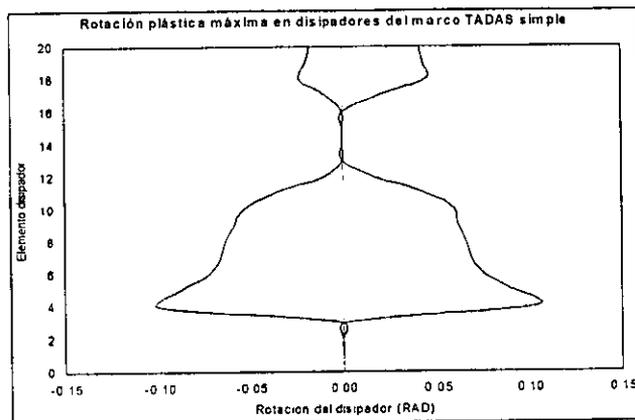


Figura 4.33 Rotación plástica máxima de los disipadores del marco TADAS simple.

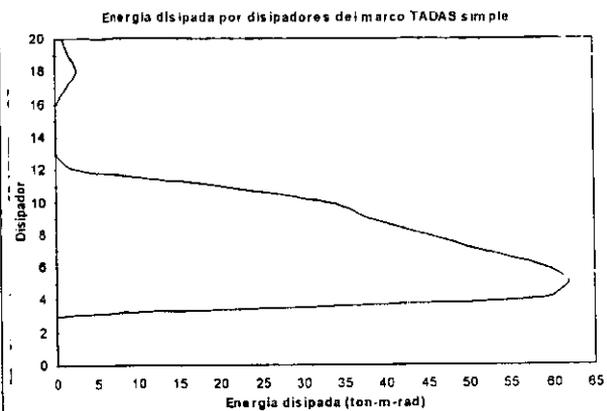


Figura 4.34 Energía disipada por los disipadores del marco TADAS simple.

4.3.7 DEMANDA DE DUCTILIDAD GLOBAL

En este inciso se calcula la demanda de ductilidad desarrollada durante la excitación sísmica por el marco con disipadores TADAS doble y por el marco convencional únicamente; no se calcula la demanda de ductilidad del marco TADAS simple en virtud de que la respuesta estructural de este marco durante el sismo ha resultado sinceramente mala, como se ha visto anteriormente, en varios aspectos estructurales el marco TADAS simple ha resultado indeseable e inconveniente. Para calcularla se requiere determinar las curvas del cortante de entrepiso contra la deformación de entrepiso. En estas curvas se define el cortante de fluencia de entrepiso así como el valor del desplazamiento de fluencia de entrepiso. Las curvas se obtuvieron efectuando un análisis estático no lineal (*push over*) con el programa de cómputo DRAIN-2DX (Prakash *et al.*, 1993; Powell, 1993). La demanda de ductilidad de entrepiso D_e se calcula con la siguiente expresión:

$$D_e = \frac{X_{\text{máx}}}{X_y} \quad (4.2)$$

donde $X_{\text{máx}}$ significa el desplazamiento relativo máximo que tiene el entrepiso durante el movimiento sísmico y X_y es el desplazamiento cuando empieza el comportamiento inelástico del

entrepiso. En la Tabla 4.6 se muestran los desplazamientos máximos relativos de entrepiso, los desplazamientos de fluencia y la demanda de ductilidad de cada entrepiso para los dos marcos, también se obtiene el promedio de la demanda de ductilidad para cada marco. Los desplazamientos de fluencia de cada entrepiso se obtuvieron con el criterio de áreas equivalentes (Silva, 1997). A continuación se muestran las curvas de desplazamientos y fuerzas cortantes de fluencia de cada entrepiso del marco con disipadores TADAS doble (Figura 4.35). Posteriormente se presentan las curvas del marco convencional (Figura 4.36).

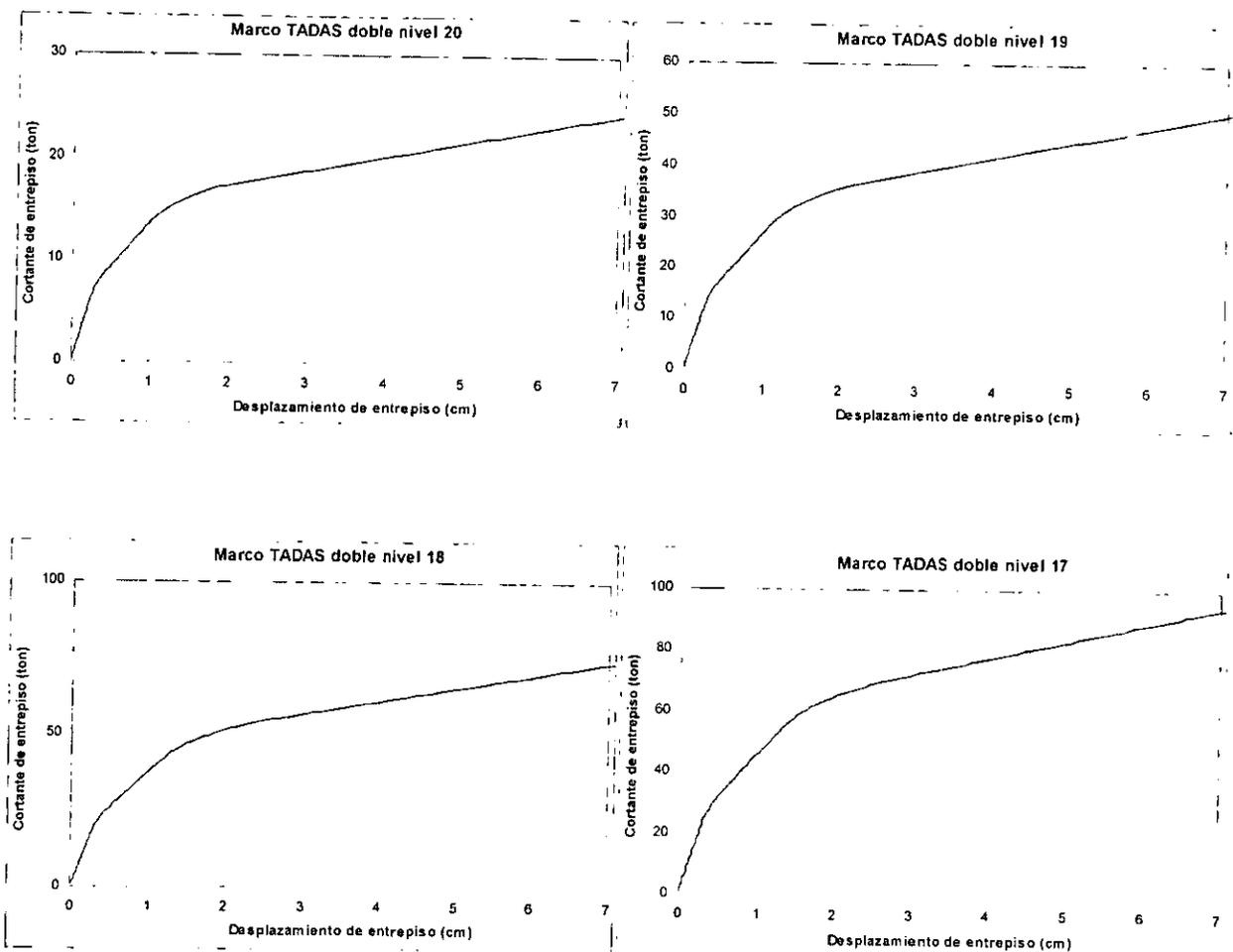


Figura 4.35 Curvas de desplazamientos y fuerzas de fluencia de los entrepisos del marco TADAS doble.

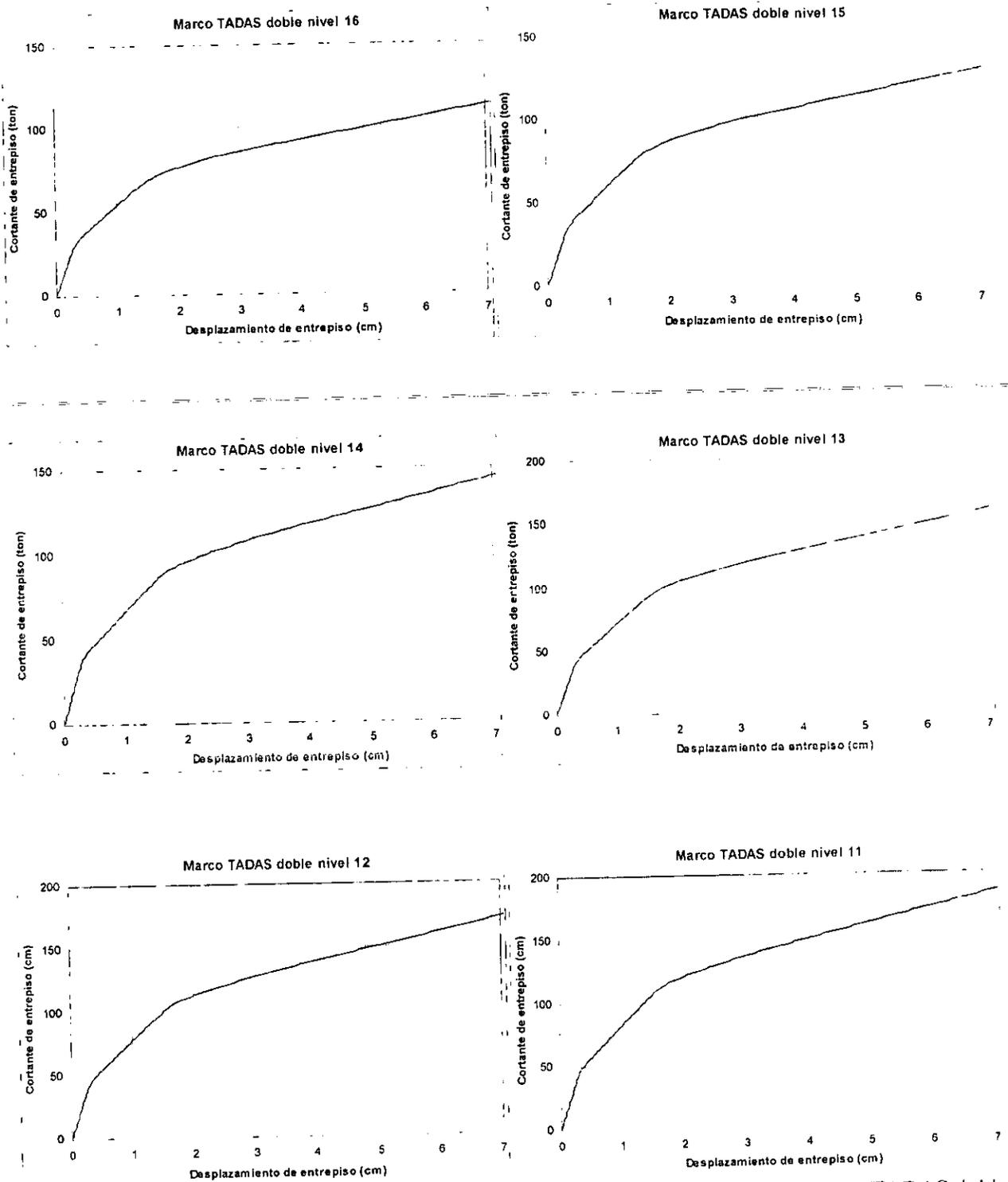


Figura 4.35 Curvas de desplazamientos y fuerzas de fluencia de los entrepisos del marco TADAS doble (continuación).

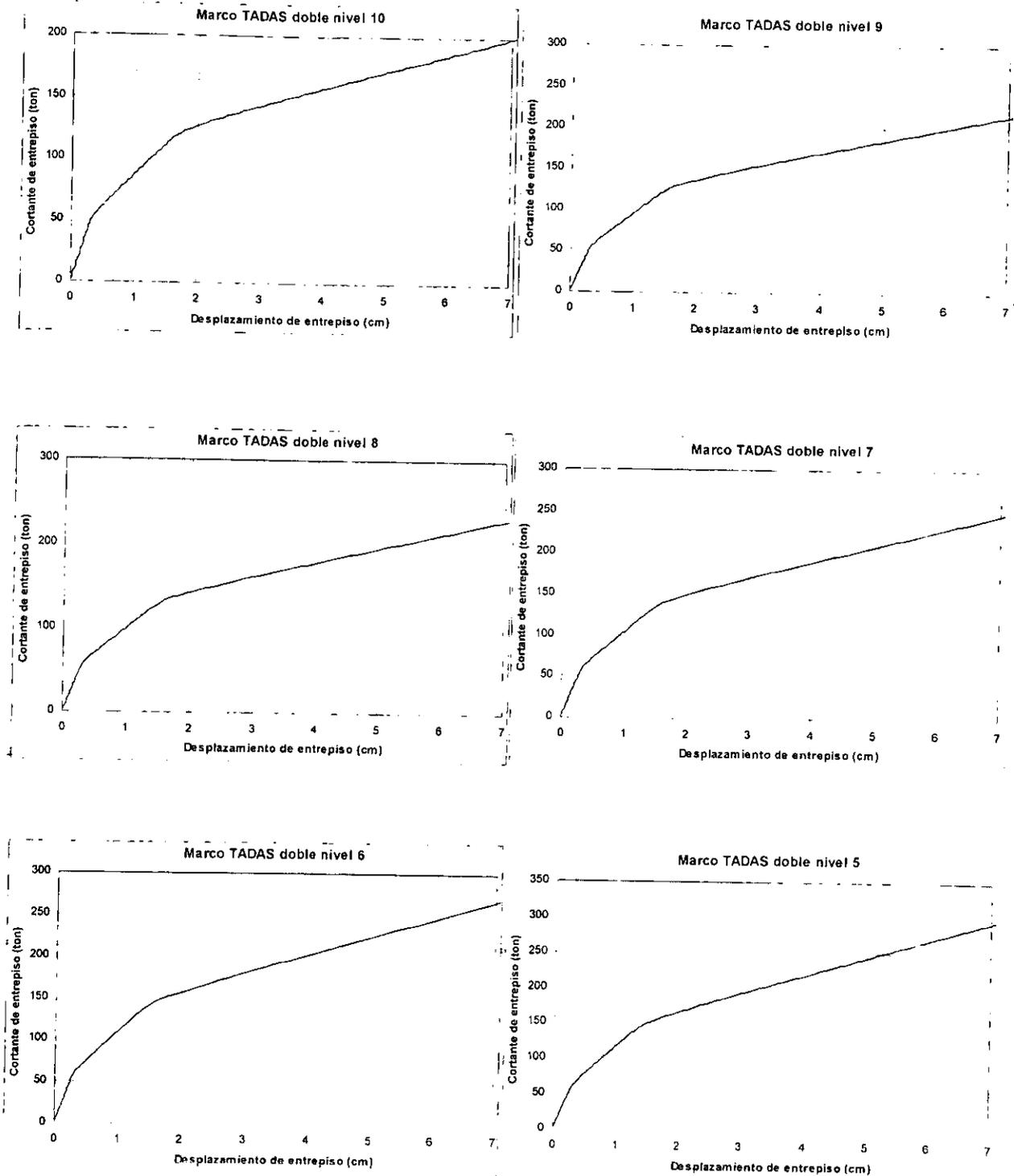


Figura 4.35 Curvas de desplazamientos y fuerzas de fluencia de los entrepisos del marco TADAS doble (continuación).

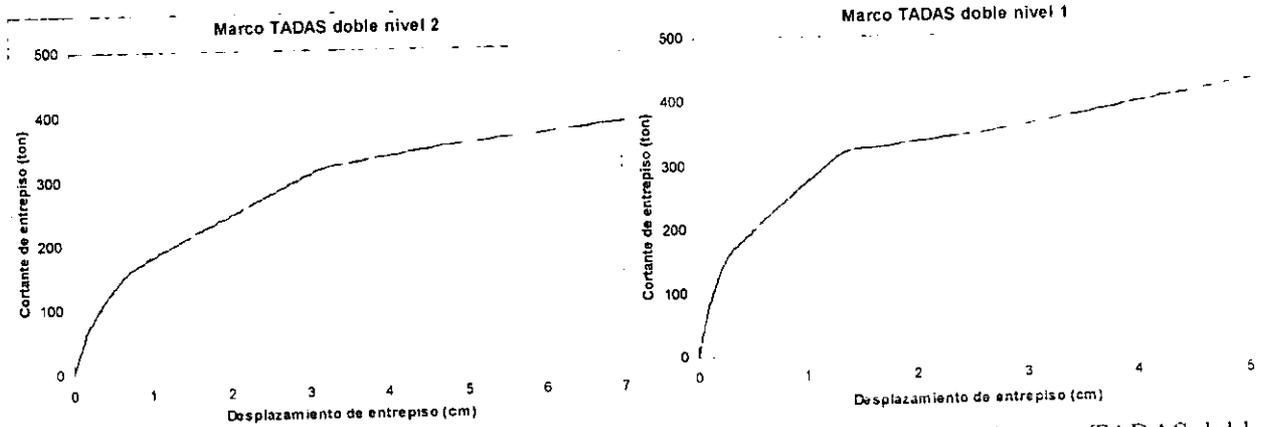
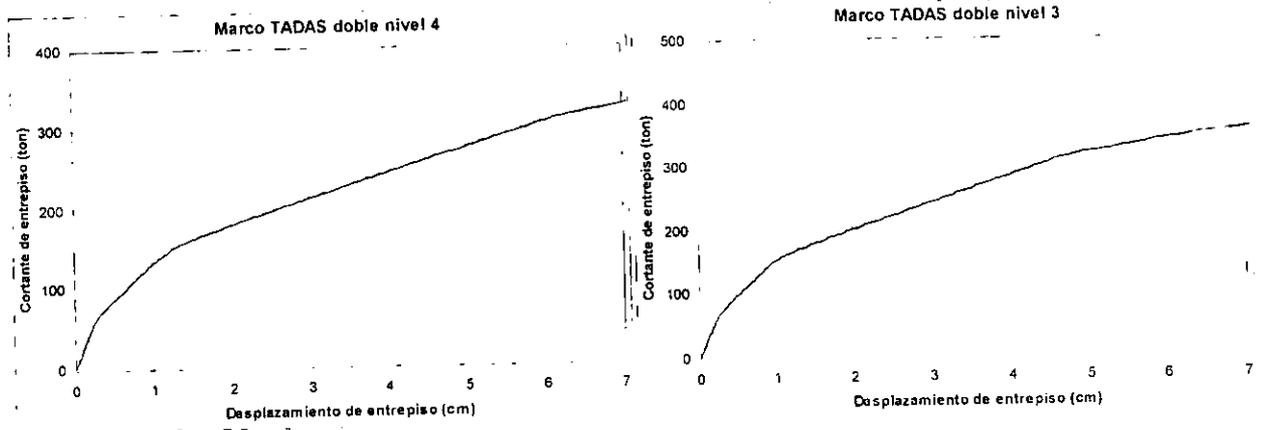


Figura 4.35 Curvas de desplazamientos y fuerzas de fluencia de los entrepisos del marco TADAS doble (continuación).

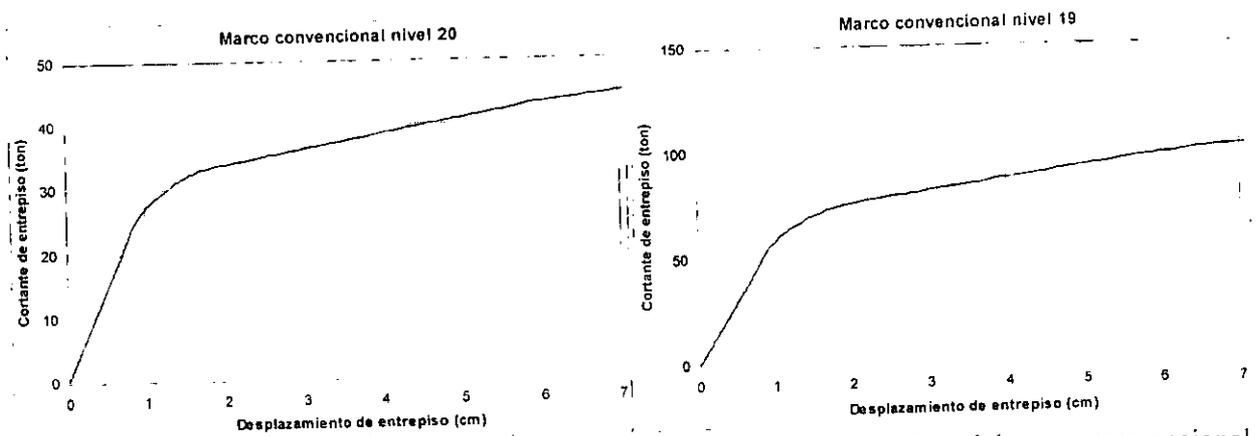


Figura 4.36 Curvas de desplazamientos y fuerzas de fluencia de los entrepisos del marco convencional.

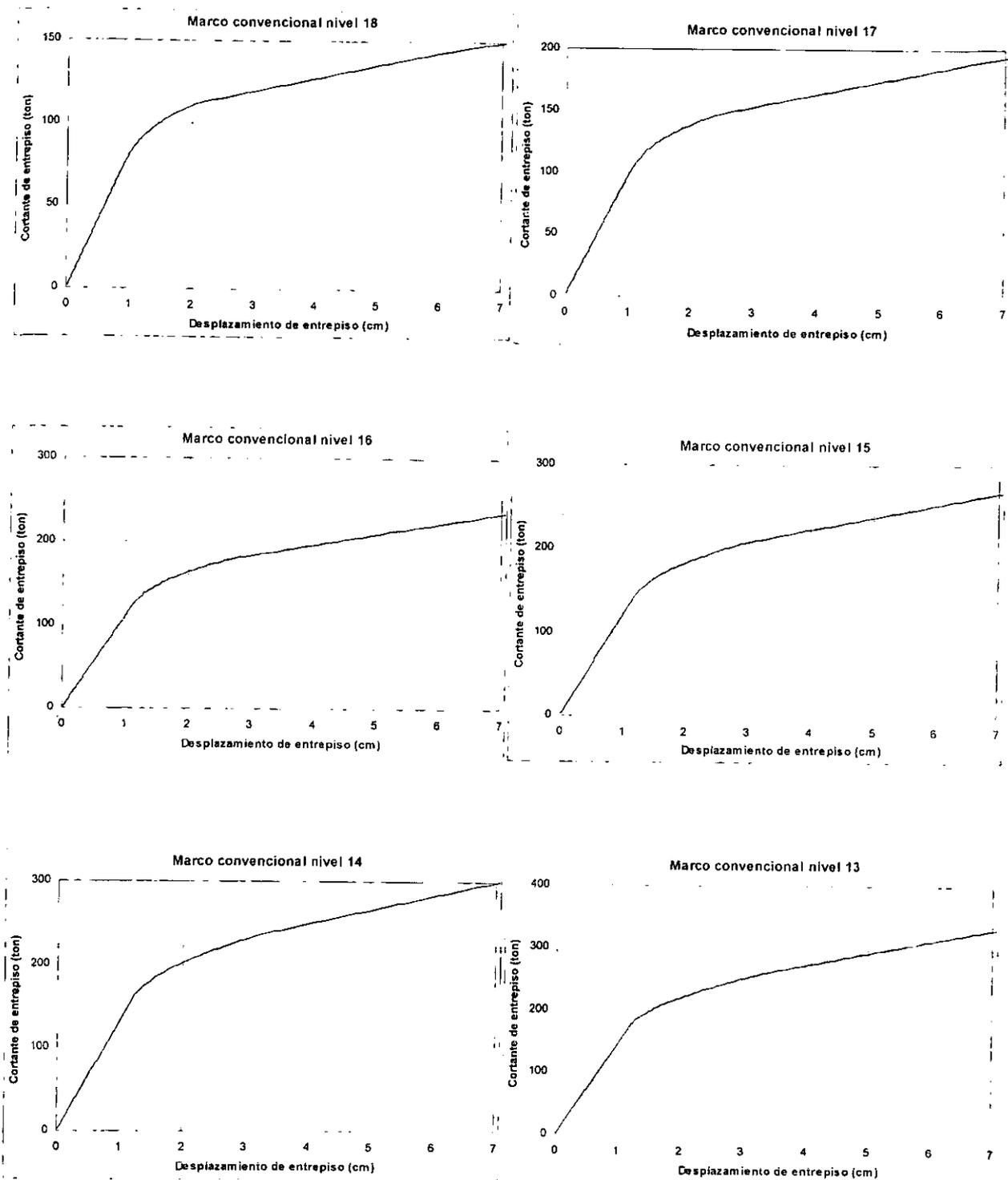


Figura 4.36 Curvas de desplazamientos y fuerzas de fluencia de los entrepisos del marco convencional (continuación)

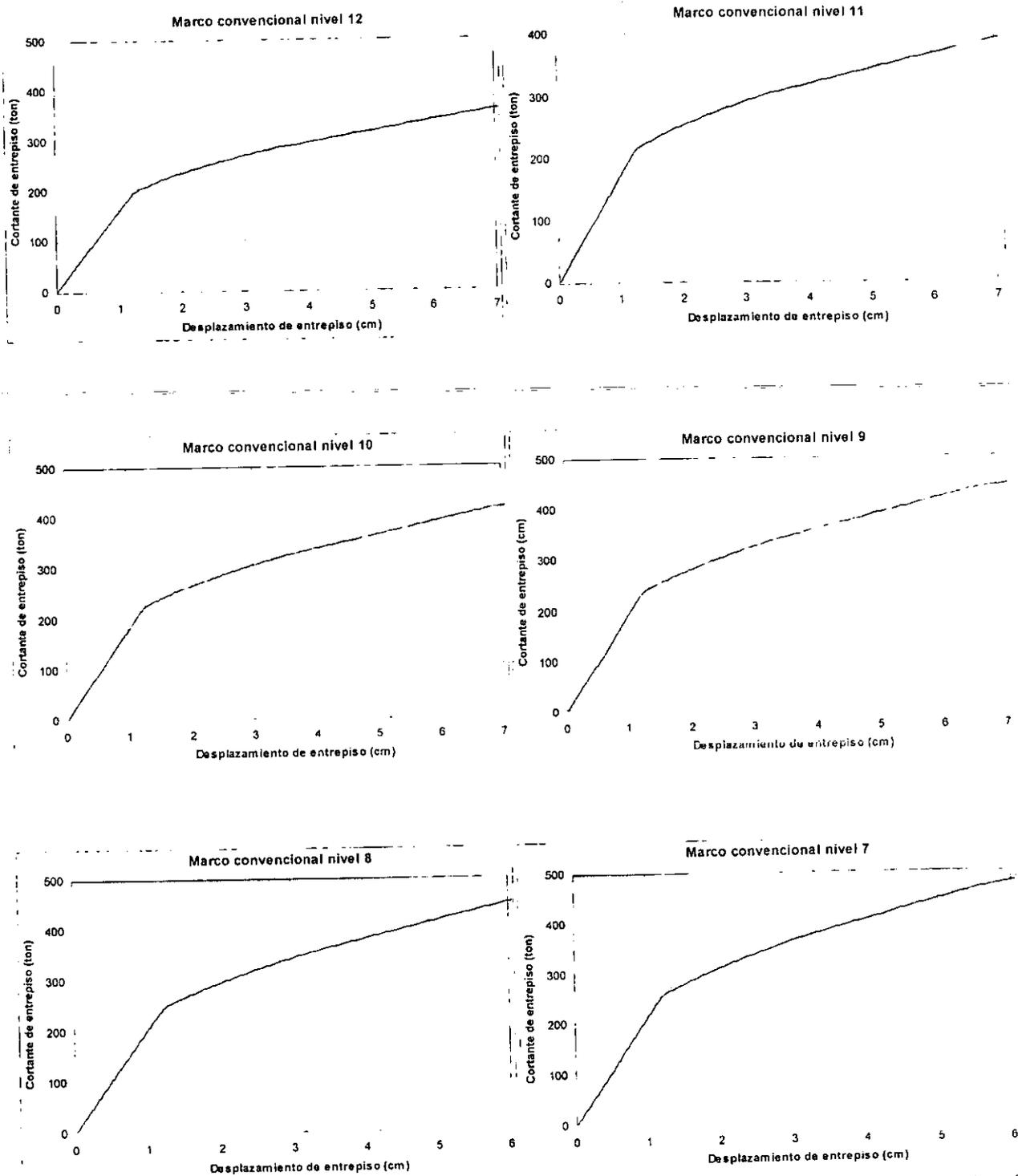


Figura 4.36 Curvas de desplazamientos y fuerzas de fluencia de los entrepisos del marco convencional (continuación).

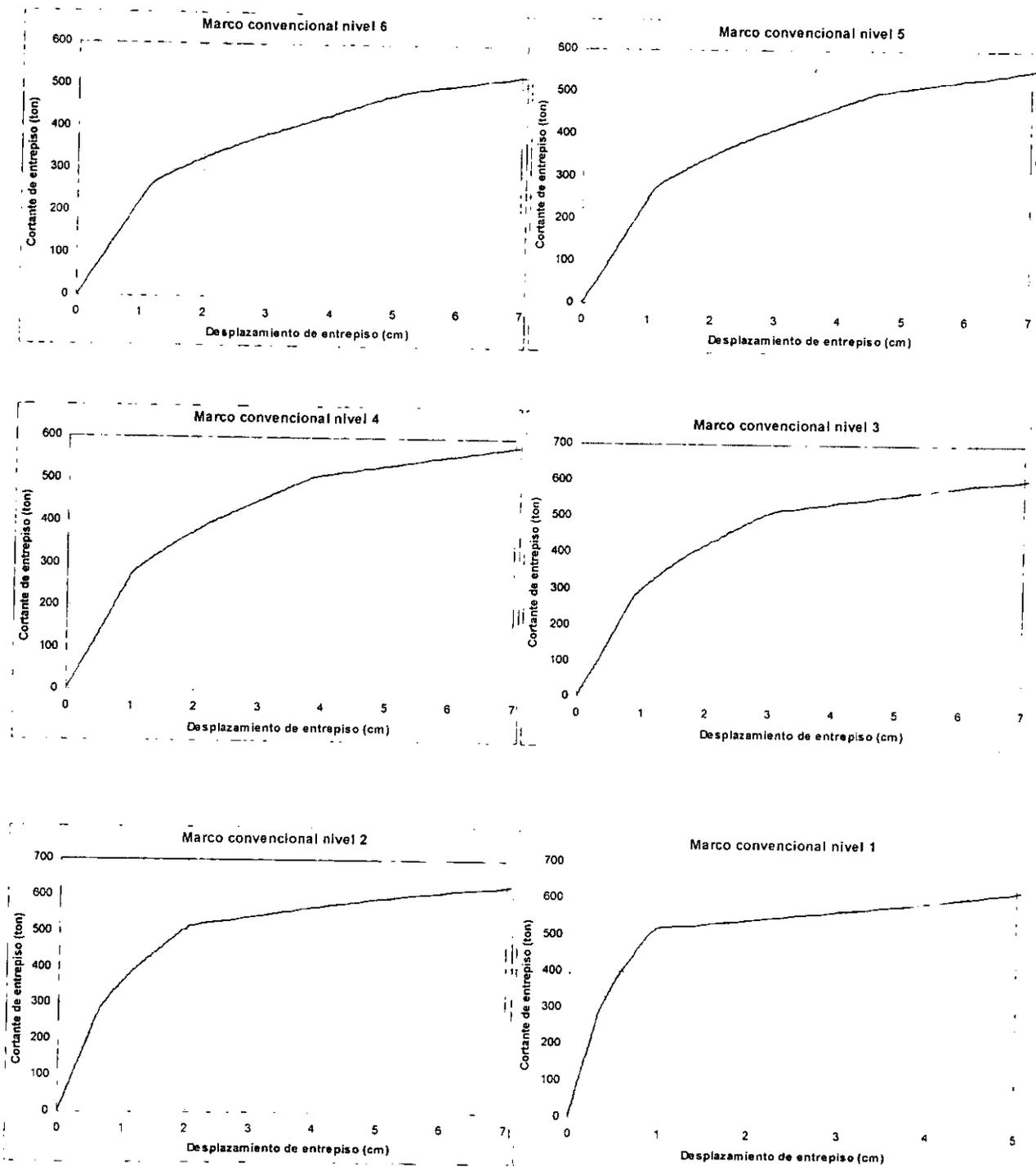


Figura 4.36 Curvas de desplazamientos y fuerzas de fluencia de los entrepisos del marco convencional (continuación).

Como se observa en la Tabla 4.6, el promedio de la demanda de ductilidad en el marco TADAS doble es de 2.59, mientras que en el marco convencional es de 2.01. El marco TADAS doble presenta los 3 primeros entrepisos en los cuales no se excedió el desplazamiento de fluencia ya que la demanda D_e es menor que uno y en el marco convencional sólo en los dos primeros entrepisos la demanda D_e es inferior a uno. La demanda de ductilidad global del marco con disipadores TADAS doble, que en la mayoría de sus entrepisos supera la unidad se debe principalmente al trabajo inelástico desarrollado durante el movimiento sísmico por sus elementos estructurales, entre ellos los dispositivos disipadores de energía.

Tabla 4.6 Demandas de ductilidad en el entrepiso.

Entrepiso	DEMANDAS DE DUCTILIDAD EN EL ENTREPISO					
	MARCO TADAS DOBLE			MARCO CONVENCIONAL		
	Desplazam. relativo máximo $X_{m\acute{a}x}$ (cm)	Desplazam. de fluencia X_y (cm)	Demanda D_e	Desplazam. relativo máximo $X_{m\acute{a}x}$ (cm)	Desplazam. de fluencia X_y (cm)	Demanda D_e
20	2.75	1.09	2.52	3.30	1.29	2.55
19	2.93	1.35	2.18	3.48	1.36	2.56
18	3.08	1.46	2.11	3.67	1.47	2.50
17	3.17	1.19	2.68	3.84	1.68	2.29
16	3.29	1.09	3.03	3.98	1.71	2.32
15	3.50	1.13	3.09	4.06	1.76	2.30
14	3.68	1.20	3.05	4.11	1.84	2.24
13	3.85	1.19	3.24	4.14	1.65	2.51
12	3.96	1.27	3.10	4.15	1.58	2.63
11	4.02	1.19	3.37	4.14	1.71	2.42
10	3.98	1.29	3.09	4.09	1.36	3.00
9	3.72	0.92	4.04	3.98	1.70	2.35
8	3.59	1.10	3.26	3.84	1.67	2.29
7	3.41	1.13	3.03	3.64	1.66	2.19
6	3.16	1.13	2.79	3.37	3.06	1.10
5	2.85	1.03	2.76	3.04	2.85	1.07
4	2.43	0.93	2.60	2.62	2.53	1.04

Tabla 4.6 (continuación).

Entrepiso	DEMANDAS DE DUCTILIDAD EN EL ENTREPISO					
	MARCO TADAS DOBLE			MARCO CONVENCIONAL		
	Desplazam. relativo máximo $X_{m\acute{a}x}$ (cm)	Desplazam. de fluencia X_y (cm)	Demanda D_e	Desplazam. relativo máximo $X_{m\acute{a}x}$ (cm)	Desplazam. de fluencia X_y (cm)	Demanda D_e
3	1.92	3.05	0.63	2.11	2.10	1.01
2	1.29	2.16	0.60	1.48	1.51	0.97
1	0.54	0.92	0.59	0.70	0.73	0.95
Demanda Global D_e			2.59			2.01

4.3.8 DEMANDA DE DUCTILIDAD DE LOS DISIPADORES

Para calcular la demanda de ductilidad de los elementos disipadores en los dos marcos con disipadores se aplica la siguiente expresión que sólo está en función de los desplazamientos:

$$\mu = \frac{\delta_{m\acute{a}x}}{\delta_{fluencia}} \quad (4.3)$$

donde $\delta_{m\acute{a}x}$ es el desplazamiento máximo relativo que desarrolló el disipador durante el sismo y $\delta_{fluencia}$ es el desplazamiento de fluencia del mismo. Los desplazamientos máximos relativos se obtuvieron efectuando un análisis dinámico paso a paso con el programa DRAIN-2D, del análisis anterior se requiere obtener las historias de desplazamientos relativos de los dos extremos de cada elemento disipador, para determinar finalmente el máximo desplazamiento relativo. Los desplazamientos de fluencia se obtienen dividiendo la fuerza de fluencia sobre la rigidez elástica del dispositivo disipador TADAS (ver el inciso 2.6.6 del capítulo 2 y las expresiones 2.11 y 2.15), la expresión final está en función del esfuerzo de fluencia, del módulo de elasticidad y de la geometría del dispositivo:

$$\Delta_y = \frac{F_y \cdot h^2}{E t} \quad (4.4)$$

En la Tabla 4.7 se presentan los valores calculados de las demandas de ductilidad de los disipadores del marco TADAS doble y en la Figura 4.37 se puede apreciar la gráfica de la variación de la demanda de ductilidad de los disipadores del marco TADAS doble.

Tabla 4.7 Demandas de ductilidad de los disipadores del marco TADAS doble.

Elemento Disipador	Desplazam. de fluencia Δy (cm)	Desplazam. relativo máximo del disipador $\Delta m_{\text{máx}}$ (cm)	Ductilidad Local μ
Disipador 30 nivel 20	0.34	3.09	9.00
Disipador 29 nivel 19	0.34	3.33	9.69
Disipador 28 nivel 19	0.34	3.22	9.36
Disipador 27 nivel 18	0.34	3.36	9.78
Disipador 26 nivel 17	0.30	3.46	11.74
Disipador 25 nivel 17	0.30	3.37	11.43
Disipador 24 nivel 16	0.30	3.39	11.49
Disipador 23 nivel 15	0.30	3.65	12.37
Disipador 22 nivel 15	0.30	3.64	12.34
Disipador 21 nivel 14	0.26	3.72	14.43
Disipador 20 nivel 13	0.26	3.99	15.46
Disipador 19 nivel 13	0.26	3.82	14.81
Disipador 18 nivel 12	0.26	4.02	15.59
Disipador 17 nivel 11	0.26	4.15	16.11
Disipador 16 nivel 11	0.26	4.01	15.54
Disipador 15 nivel 10	0.26	4.02	15.59
Disipador 14 nivel 9	0.26	3.79	14.69
Disipador 13 nivel 9	0.26	3.67	14.22
Disipador 12 nivel 8	0.26	3.55	13.75
Disipador 11 nivel 7	0.26	3.39	13.13
Disipador 10 nivel 7	0.26	3.29	12.75
Disipador 9 nivel 6	0.26	3.05	11.84
Disipador 8 nivel 5	0.26	2.78	10.76
Disipador 7 nivel 5	0.26	2.71	10.50
Disipador 6 nivel 4	0.21	2.29	11.11

Tabla 4.7 (continuación).

Elemento Disipador	Desplazam. de fluencia Δy (cm)	Desplazam. relativo máximo del disipador $\Delta m_{\text{máx}}$ (cm)	Ductilidad Local μ
Disipador 5 nivel 3	0.21	1.83	8.87
Disipador 4 nivel 3	0.21	1.79	8.69
Disipador 3 nivel 2	0.18	1.18	6.48
Disipador 2 nivel 1	0.15	0.14	0.92
Disipador 1 nivel 1	0.15	0.14	0.92

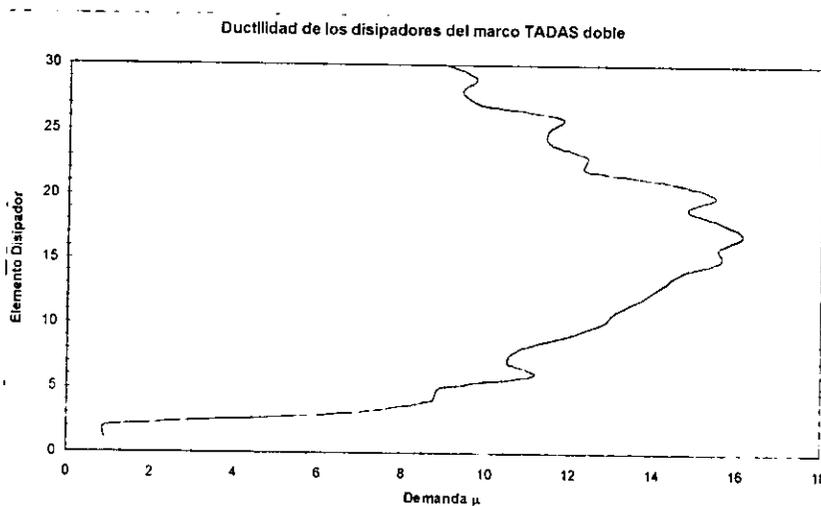


Figura 4.37 Demanda de ductilidad de los disipadores del marco TADAS doble.

Se puede apreciar en la gráfica que la demanda de ductilidad desarrollada en los disipadores ubicados en los niveles 4 al 17 es alta, esto se debe a que sus desplazamientos relativos máximos fueron grandes lo que provocó que los disipadores trabajaron más que los disipadores de los demás entrepisos. Se advierte que los dos disipadores del primer nivel no desarrollaron ductilidad alguna, debido a que sus desplazamientos relativos máximos no superaron el valor respectivo de su desplazamiento de fluencia y consecuentemente no desarrollaron trabajo inelástico, lo anterior ya se había explicado en el inciso 4.3.5 y 4.3.6 de este

capítulo, ya que las rotaciones por efecto de la flexión se mantienen en el rango elástico y el área encerrada en las gráficas de sus respectivos ciclos histeréticos es nula.

Enseguida se muestran las demandas de ductilidad que desarrollaron los elementos disipadores que integran el marco TADAS simple, los valores calculados se resumen en la Tabla 4.8. Se aprecia que los disipadores ubicados en los niveles 1, 2 y del 13 al 16 no fluyeron y en consecuencia la ductilidad desarrollada es nula ya que μ es menor que uno, los disipadores que se comportan en forma eficiente y que si desarrollaron trabajo inelástico se ubican en los niveles 3 al 12 y del 17 al 20.

Tabla 4.8 Demandas de ductilidad de los disipadores del marco TADAS simple.

Elemento Disipador	Desplazam. Fluencia Δy (cm)	Desplazam. relativo máximo del disipador $\Delta_{m\acute{a}x}$ (cm)	Ductilidad local μ
Disipador nivel 20	0.34	1.82	5.30
Disipador nivel 19	0.34	1.96	5.69
Disipador nivel 18	0.34	2.02	5.87
Disipador nivel 17	0.30	1.99	6.73
Disipador nivel 16	0.30	0.27	0.92
Disipador nivel 15	0.30	0.27	0.92
Disipador nivel 14	0.26	0.24	0.93
Disipador nivel 13	0.26	0.19	0.74
Disipador nivel 12	0.26	2.68	10.39
Disipador nivel 11	0.26	2.96	11.48
Disipador nivel 10	0.26	3.26	12.63
Disipador nivel 9	0.26	3.37	13.05
Disipador nivel 8	0.26	3.56	13.82
Disipador nivel 7	0.26	3.70	14.34
Disipador nivel 6	0.26	3.75	14.53
Disipador nivel 5	0.26	3.65	14.15
Disipador nivel 4	0.21	3.34	16.19
Disipador nivel 3	0.21	2.85	13.80
Disipador nivel 2	0.18	0.16	0.88
Disipador nivel 1	0.15	0.14	0.92

La gráfica de la demanda de ductilidad desarrollada durante el sismo por los disipadores del marco TADAS simple se presenta en la Figura 4.38, en ella se aprecia claramente la irregularidad en cuanto al comportamiento global de los disipadores en el marco. Se esperaba que todos los disipadores incursionaran dentro del rango inelástico y que en el comportamiento por flexión desarrollaran ductilidad, sin embargo no fue así, los elementos disipadores que se ubican del nivel 3 al 12 son realmente eficientes ya que sí disipan energía y la ductilidad desarrollada es alta. Los disipadores del nivel 17 al 20 alcanzan a desarrollar ductilidad aunque es pequeña. Los disipadores que se localizan en el nivel 1 y 2 no fluyeron y no desarrollaron ductilidad, la razón se debe a que su rigidez es bastante alta en comparación con la rigidez de la trabe, lo cual resulta en un funcionamiento inadecuado.

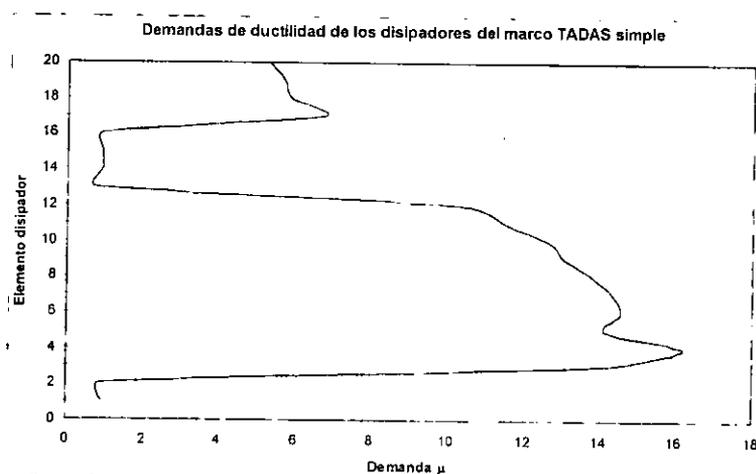


Figura 4.38 Demanda de ductilidad de los disipadores del marco TADAS simple.

La ductilidad desarrollada durante la excitación sísmica por los disipadores TADAS se puede comparar contra la ductilidad máxima que ellos pueden soportar, en términos de la rotación plástica máxima que desarrolló cada disipador; en función de ésta se puede establecer que la ductilidad desarrollada por los dispositivos TADAS es adecuada ya que no se excede la capacidad rotacional (0.25 radianes) de los disipadores TADAS.

4.4 ELECCIÓN DEL MARCO CON LA MEJOR RESPUESTA

A continuación se presentan los aspectos más interesantes del análisis comparativo de las respuestas sísmicas de los tres marcos diseñados, la finalidad consiste en seleccionar y dictaminar desde el punto de vista estructural el marco que desarrolló la mejor respuesta dinámica durante la excitación sísmica, es decir elegir el marco que se comportó estructuralmente mejor en cuanto a elementos mecánicos, desplazamientos laterales, daño estructural, energía disipada y efectividad estructural de los disipadores.

A través del desarrollo de cada uno de los incisos anteriores se hizo una comparación detallada de los tres marcos estructurales diseñados, en este análisis comparativo es evidente que el marco con disipadores TADAS doble sobresale en los siguientes aspectos:

- a) La configuración de deformaciones y deflexiones laterales que experimentó el marco TADAS doble es más uniforme que en los otros dos marcos, los desplazamientos laterales máximos son menores en comparación a los desplazamientos de los otros dos marcos estructurales en estudio. El marco TADAS doble cumple absolutamente en cada nivel con el límite admisible de los desplazamientos relativos de entrepiso, la gráfica de los desplazamientos relativos de entrepiso del marco TADAS doble muestra que los desplazamientos, al localizarse en una posición intermedia, resultan aceptables.
- b) Analizando los elementos mecánicos inducidos por la excitación dinámica aplicada al marco con disipadores TADAS doble se tiene un aspecto muy evidente: la distribución y configuración de fuerzas internas es más uniforme que en el marco TADAS simple y en las gráficas claramente se aprecia la gran disminución de la magnitud de los elementos mecánicos en la estructura, en comparación con los otros dos marcos, la excelente reducción es patente tanto en las columnas como en las trabes y se manifiesta en los tres elementos mecánicos analizados. Indudablemente esta situación es muy favorable y es un efecto directo por la instalación y el adecuado funcionamiento de los dispositivos disipadores de energía en

la estructura. La reducción de la respuesta sísmica en términos de la magnitud de los elementos mecánicos es loable en virtud de que también repercute convenientemente para el diseño estructural de las conexiones entre los miembros estructurales, las cuales son de importancia vital para la estructura. En efecto, los esfuerzos y elementos mecánicos que se transmiten del marco TADAS doble a la cimentación influyen favorablemente para disminuir el costo referente al diseño y construcción de la misma.

- c) El grado de daño estructural generado en el marco con disipadores TADAS doble, el cual se expresa por medio de la magnitud de las rotaciones de las articulaciones plásticas que se presentan en los elementos estructurales, es menor que en los otros dos marcos, en función de esta respuesta estructural el marco TADAS doble es la mejor opción.
- d) La disipación de energía desarrollada por los dispositivos TADAS en el marco TADAS doble es excelente, el comportamiento histerético de los disipadores es eficiente y adecuado ya que 28 de los 30 dispositivos disipadores instalados en el marco incursionan en el rango inelástico y en consecuencia es notable la disipación de energía. Adicionalmente las rotaciones plásticas desarrolladas por los disipadores son adecuadas en virtud de que no se excede la capacidad rotacional de los disipadores (0.25 radianes).

Desde el punto de vista estructural y considerando los aspectos mencionados previamente se puede establecer que el marco con disipadores TADAS doble es el mejor y se ubica en la posición especial de ser el sistema estructural ampliamente preferible.

5 COSTOS INICIALES

Las estructuras de edificios además de ser confiables en cuanto a seguridad y de poseer una capacidad sismoresistente adecuada, deberán ser razonablemente económicas, por lo tanto es de suma importancia estimar el factor económico. A continuación se presenta una estimación de los costos iniciales de los tres sistemas estructurales diseñados en el capítulo 3. La valuación de costos se estima en función de dos parámetros: de la cantidad total de acero estructural que se requiere para fabricar las secciones transversales de los elementos estructurales que componen cada marco estructural y en función de un costo unitario para fabricar una tonelada de acero estructural. Se efectuó una cotización en varias compañías dedicadas al diseño y construcción de estructuras metálicas y se pudo averiguar que el costo para fabricar un kilogramo de acero estructural, fluctúa aproximadamente en \$15.00. Este valor no fue fácil averiguarlo ya que las empresas argumentan que la información es de carácter confidencial y es variable debido a que este costo está altamente influido por la inflación en los costos de los insumos y la volatilidad de la cotización de la moneda nacional en relación con el dólar americano (el tipo de cambio de la divisa americana en enero de 1999 es \$1 dólar U. S. – \$10.25 pesos mexicanos, Casa de Cambio Plus S. A. de C. V.).

Para poder estimar los costos iniciales de los tres marcos se calcula la cantidad de acero estructural de los tres marcos estructurales y se establece que el costo unitario para fabricar un kilogramo de acero estructural es de \$15.00, ésta cotización fue realizada en enero de 1999 (Martínez, 1999) y se pudo averiguar que este costo unitario incluye el cálculo y diseño estructural, producción de planos (entre otros los planos de proyecto, planos de detalles para la fabricación de los elementos en el taller, planos de perfiles, planos de anclajes, planos de montaje, etc.), el transporte de los elementos estructurales al sitio de la construcción, así como las operaciones de montaje. Tomando como referencia ésta cotización se procederá a estimar los costos iniciales.

5.1 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS INICIALES DE LOS MARCOS

5.1.1 MARCO CONVENCIONAL

A continuación se presenta el peso de las columnas y trabes que integran el marco convencional (Tabla 5.1), en la tabla también se muestra la cantidad total de acero del marco convencional.

Tabla 5.1 Pesos de los elementos estructurales del marco convencional.

Marco Convencional		
Nivel	Peso de Columnas (kg)	Peso de Trabes (kg)
20	15120	3108
19	15120	3108
18	15840	3108
17	15840	3108
16	15840	3024
15	16560	3024
14	16560	3024
13	16560	3024
12	17280	3234
11	17280	3234
10	17280	3234
9	20880	3234

Tabla 5.1 (continuación).

Marco Convencional		
Nivel	Peso de Columnas (kg)	Peso de Trabes (kg)
8	20880	3234
7	20880	3234
6	21720	3234
5	21720	3234
4	21720	3171
3	22560	3108
2	22560	3108
1	26320	3108
Σ	378520	62895
Peso total del Marco Convencional		441415 kg

El costo inicial del marco convencional es el resultado del peso total del marco convencional por el costo unitario, de esta manera el costo inicial asciende a: $\$15.00 \times 441415 = \$6,621\,225.00$.

5.1.2 MARCO CON DISIPADORES TADAS SIMPLE

El peso de los miembros estructurales que componen el marco con disipadores TADAS simple se presenta en la Tabla 5.2, en la cual se muestra también el peso total del mismo.

Tabla 5.2 Pesos de los elementos estructurales del marco TADAS simple.

Marco con Disipadores TADAS simple				
Nivel	Peso de Columnas (kg)	Peso de Trabes (kg)	Peso de Diagonales (kg)	Peso del Dispositivo (kg)
20	9480	966	385	125
19	9480	966	576	194
18	10200	966	831	228
17	10200	966	1115	359
16	10200	1134	1272	640
15	10200	1134	1542	744

Tabla 5.2 (continuación).

Marco con Disipadores TADAS simple				
Nivel	Peso de Columnas (kg)	Peso de Trabes (kg)	Peso de Diagonales (kg)	Peso del Dispositivo (kg)
14	10200	1134	1690	880
13	10200	1134	1855	777
12	10920	1575	2038	699
11	10920	1575	2256	554
10	10920	1575	2256	505
9	13440	1575	2474	505
8	13440	1575	2700	505
7	13440	1575	2700	505
6	13440	1575	2700	481
5	13440	1575	2979	408
4	13440	1575	2979	324
3	14280	966	2979	392
2	14280	966	2979	571
1	16660	966	3522	1221
Σ	238780	25473	41828	10617
Peso total del Marco con Disipadores TADAS Simple				316698 kg

El costo inicial del marco con disipadores TADAS simple asciende a: $\$15.00 \times 316698 = \$4,750\,470.00$.

5.1.3 MARCO CON DISIPADORES TADAS DOBLE

En la Tabla 5.3 se muestra el peso de los elementos estructurales que integran el marco con disipadores TADAS doble, también se presenta el peso total del mismo.

Tabla 5.3 Pesos de los elementos estructurales del marco TADAS doble.

Marco con Disipadores TADAS doble				
Nivel	Peso de Columnas (kg)	Peso de Trabes (kg)	Peso de Diagonales (kg)	Peso del Dispositivo (kg)
20	9480	966	3293	44

Tabla 5.3 (continuación).

Marco con Disipadores TADAS doble				
Nivel	Peso de Columnas (kg)	Peso de Trabes (kg)	Peso de Diagonales (kg)	Peso del Dispositivo (kg)
19	9480	966	6585	66
18	10200	966	3293	79
17	10200	966	6585	96
16	10200	1134	3293	136
15	10200	1134	6585	122
14	10200	1134	3293	141
13	10200	1134	6585	144
12	10920	1575	3293	142
11	10920	1575	6585	138
10	10920	1575	3293	166
9	13440	1575	6585	186
8	13440	1575	3293	190
7	13440	1575	6585	186
6	13440	1575	3293	190
5	13440	1575	6585	168
4	13440	1575	3293	187
3	14280	966	6585	196
2	14280	966	3293	294
1	16660	966	7045	680
Σ	238780	25473	99240	3551
Peso total del Marco con Disipadores TADAS Doble				367044 kg

Finalmente el costo inicial del marco con disipadores TADAS doble resulta de: $\$15.00 \times 367044 = \$5,505\,660.00$.

5.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS INICIALES

En el análisis comparativo de las Tablas 5.1 a 5.3 se aprecia que la cantidad total de acero estructural de los dos marcos con disipadores disminuye en forma notable con respecto al peso global del marco convencional. El marco TADAS simple tiene una disminución total en peso de 124 717 kg, es decir un 28.2 % menor que el peso total del marco convencional. En cambio el

COSTOS INICIALES

marco con disipadores TADAS doble tiene una reducción total en peso de acero de 74 371 kg, es decir un 16.8 % menor que el peso total del marco convencional. En consecuencia el costo inicial de los dos marcos con disipadores disminuye muy favorablemente. Desde el punto de vista económico, el marco con disipadores TADAS simple resulta el sistema estructural más conveniente, aunque el marco con disipadores TADAS doble también es adecuado en virtud de que su costo se reduce en un 16.8% con respecto al marco convencional.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se diseñaron y analizaron tres marcos de acero estructural A-36, el primero diseñado en forma convencional y los otros dos marcos se diseñaron equipándolos con dispositivos disipadores de energía sísmica tipo TADAS. Los tres sistemas estructurales fueron sometidos a la excitación dinámica que corresponde a la componente este-oeste del registro de aceleraciones del movimiento sísmico del 19 de septiembre de 1985. La finalidad de este trabajo consiste en analizar la eficiencia estructural de los disipadores TADAS instalados en los marcos de acero en condiciones de resonancia, así como estudiar la influencia y el efecto de los dos arreglos espaciales de dispositivos disipadores TADAS. Del análisis comparativo de las respuestas dinámicas obtenidas se concluye lo siguiente:

- 1) Durante la etapa del análisis estructural se observó que la rigidez lateral que proporciona el sistema disipador TADAS es función únicamente de la rigidez que suministran las placas triangulares TADAS, es decir la rigidez axial de las diagonales de contraventeo no influye en la estimación de la rigidez lateral de entrepiso de un marco equipado con disipadores TADAS.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 2) El factor de rigidez $\alpha_1=0.25$ empleado para el diseño del marco con disipadores TADAS doble, resulta adecuado ya que las columnas de él se comportaron dentro del rango elástico y las rotaciones plásticas sólo se presentaron en las traveses del mismo, contribuyendo en parte a disipar energía, los disipadores de este marco desarrollaron un comportamiento estructural muy eficiente ya que sí desarrollaron trabajo inelástico y disiparon una gran cantidad de energía. Contrariamente a lo anterior, en el marco TADAS simple, las traveses de acero sufrieron los deterioros estructurales más severos, se articularon dos columnas con lo cual se puede producir un potencial mecanismo de falla y solamente catorce elementos disipadores TADAS disiparon energía; indiscutiblemente ésta gran diferencia en el comportamiento estructural es trascendental y se debe fundamentalmente a la distribución espacial de los disipadores en el marco de acero. En función de estas respuestas resulta ampliamente preferible el arreglo espacial de disipadores del marco TADAS doble.
- 3) No es recomendable un arreglo de disipadores TADAS como el mostrado en el marco TADAS simple, en virtud de que la distribución y magnitud de elementos mecánicos en la crujía central es inconveniente, además es indeseable el deterioro estructural tan severo que se produce en los miembros estructurales de esa crujía y en consecuencia el aumento en la demanda de desplazamientos es desfavorable. La efectividad estructural de seis dispositivos disipadores TADAS de este marco resulta nula ya que no desarrollaron trabajo inelástico. Considerando todos los aspectos indeseables de su respuesta inelástica el marco TADAS simple no representa una alternativa de solución estructural.
- 4) Desde el punto de vista estructural es muy evidente que los disipadores del marco TADAS doble son eficientes, en virtud de que veintiocho dispositivos disipan una gran cantidad de energía, además ninguno de ellos excede su capacidad rotacional. Evidentemente el efecto del amortiguamiento histerético que suministran los dispositivos TADAS del marco TADAS doble se refleja directa y favorablemente en la magnitud y distribución de elementos mecánicos que se inducen en toda la estructura de acero. Efectivamente las fuerzas internas que se transmiten desde la superestructura a la cimentación disminuyen muy favorablemente

en magnitud y en consecuencia el marco TADAS doble permite abatir el costo del diseño y construcción de la cimentación.

- 5) De la respuesta sísmica obtenida del marco con disipadores TADAS doble, un aspecto estructural deseable consiste en optimizar el daño estructural que se genera en trabes de acero, es decir para intentar neutralizar el daño estructural que ocurre en las trabes de acero que se conectan con el dispositivo TADAS, se requiere que la rigidez de la trabe de acero sea mayor que la rigidez del dispositivo disipador TADAS.
- 6) Con el fin de concentrar la capacidad de disipación de energía de un sistema estructural de acero en dispositivos especiales, es factible lograr una gran efectividad si se recurre a la instalación del sistema de disipación de energía tipo TADAS. Los dispositivos disipadores tipo TADAS logran concentrar en gran medida la disipación de energía de un sistema estructural de acero durante una excitación dinámica severa, para conseguir lo anterior deben ubicarse estratégicamente en toda la altura y amplitud de la estructura y es altamente recomendable que los disipadores TADAS se ubiquen y distribuyan tal y como se presentan en el marco con disipadores TADAS doble.
- 7) El marco con disipadores TADAS doble es mejor que el marco TADAS simple y que el marco convencional; por una parte el sistema TADAS doble tiene el menor grado de daño estructural, en este sistema la disminución de la respuesta estructural referente a la magnitud y distribución tanto de esfuerzos y elementos mecánicos resulta adecuada, los desplazamientos laterales del marco TADAS doble cumplen con el límite admisible, y finalmente al considerar el factor económico representa una opción aceptable, en consecuencia, el marco con disipadores TADAS doble es la mejor alternativa estructural.

Como resultado de las respuestas sísmicas analizadas, finalmente se concluye que el empleo del sistema de disipación de energía tipo TADAS con el arreglo espacial de disipadores presentado en el marco TADAS doble representa una alternativa de solución que es viable

estructural y económicamente, ya que permite disipar eficientemente energía sísmica y disminuir notablemente la respuesta sísmica, por lo tanto este sistema de disipación es muy recomendable para el diseño o refuerzo estructural de estructuras metálicas sismoresistentes ubicadas en zonas de alta actividad sísmica.

6.2 ESTUDIOS FUTUROS

De este trabajo surge la necesidad de llevar a cabo varios estudios futuros, algunos de ellos son:

- 1) El efecto de la degradación de rigidez y resistencia tanto de las traveses y columnas fabricadas de acero estructural debe considerarse en un estudio futuro ya que se requiere analizar de que manera influye ese efecto en el comportamiento estructural global del marco diseñado con disipadores de energía sísmica tipo TADAS.
- 2) Para no concentrar la disipación de energía en las traveses de acero que se conectan con el dispositivo disipador TADAS, se requiere determinar un límite adecuado de la relación de rigideces traveses-disipador TADAS, de tal manera que el daño estructural de las traveses de acero sea mínimo, o mejor aún nulo, para esto se deben contemplar varias estructuras con una serie de diferentes relaciones de rigideces traveses-disipador TADAS.
- 3) En esta tesis no se consideró la interacción suelo-estructura, sin embargo para el diseño de una estructura de acero equipada con dispositivos disipadores de energía sísmica tipo TADAS sería conveniente realizar estudios en los que se contemple la interacción suelo-estructura, con el fin de observar y analizar si se modifica o se altera drásticamente la respuesta estructural global de marcos altos de acero equipados con disipadores de energía tipo TADAS ubicados en la zona blanda del Distrito Federal.

REFERENCIAS

- Aguirre, M. y Sánchez, R. (1990), "Disipadores de Energía Sísmica", Revista Construcción y Tecnología, IMCyC.
- Aguirre, M. y Sánchez, R. (1989), "Pruebas de Elementos Disipadores de Energía Sísmica", Revista Construcción y Tecnología, IMCyC.
- Bazán, E. y Meli R. (1985), "Manual de Diseño Sísmico de Edificios", Editorial Limusa, México D. F.
- De Buen, O. (1993), "Comentarios, Ayudas de Diseño y Ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas, DDF", Vol. I Y II, Series del Instituto de Ingeniería, No. ES-3.
- Fundación ICA A. C. (1988), "Experiencias Derivadas de los Sismos de Septiembre de 1985", Editorial Limusa, México D. F.
- Habibullah, A. & Wilson, E. (1992), "SAP-90, a General Purpose Structural Analysis Program", Computers and Structures, Inc., Berkeley California.

REFERENCIAS

- Hanson, R., Aiken, I., Nims, D., Richter, P. & Bachman, R. (1993), "State of the Art and State of the Practice in Seismic Energy Dissipation", ATC-17-1, Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control. Vol. 2, San Francisco California.
- Johnston, B. G., Lin, F. J. & Galambos T. V. (1986), "Basic Steel Design", Prentice Hall Inc., Third Edition.
- "Load and Resistance Factor Design Specifications for Structural Steel Buildings" (1993), American Institute of Steel Construction, Inc., One East Wacker Drive, Suite 3100, Chicago Illinois 60601-2001.
- "Manual of Steel Construction AISC ASD" (1989), Allowable Stress Design, American Institute of Steel Construction, Inc., One East Wacker Drive, Suite 3100, Chicago Illinois 60601.
- "Manual de Construcción en Acero", Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A. C. (IMCA) (1993), Vol. I y II.
- Martínez, E. (1993a), "Experiencias con la utilización de Dispositivos Disipadores de Energía en Edificios existentes en la Ciudad de México", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta Jalisco, México.
- Martínez, E. (1993b), "Experiences on the Use of Supplementary Energy Dissipators on Building Structures", Earthquake Spectra, Vol. 9, No.3.
- Martínez, M. de J. (1999), Detallista de estructuras metálicas, Tél. 53-82-1660. Comunicación personal referente a la estimación de costos en estructuras metálicas.
- "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, 27 de febrero de 1995, México D. F.
- "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas", Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, 27 de febrero de 1995, México D. F.
- Kanaan, A. & Powell, G. H. (1973), "General Purpose Computer Program for Inelastic Dynamic Response of Plane Structures". Report No. UCB/EERC 73-6, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley California, April 1973.
- McCormac, J. C. (1991), "Diseño de Estructuras de Acero, Método LRFD", Ediciones Alfaomega.
- Meli, R. (1985), "Diseño Estructural", Editorial Limusa, México D.F.
- Pall, S. & Marsh, C. (1982), "Response of Friction Damped Braced Frames", Journal Structural Division ASCE, Vol. 108, No. ST6.

- Powell, G. H. (1973), "DRAIN-2D User's Guide". Report No. UCB/EERC 73-22, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley California, October 1973.
- Powell, G. H. (1993), "DRAIN-2DX Element Description and User Guide for Element type 01, type 02, type 04, type 06, type 09 and type 15" Version 1.10, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley California.
- Prakash V., Powell, G. H. & Campbell S. (1993), "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide". Report No. UCB/SEMM 93/17, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley California.
- "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Diario Oficial de la Federación, 2 de agosto de 1993, México D.F.
- Robinson, W. H. & Greenbank, L. R. (1975), "Properties of an Extrusion Energy Absorber", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 3.
- Robinson, W. H. & Tucker, A. G. (1977), "A Lead Rubber Shear Damper", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 10, No.3.
- Ruiz, E. (1995), "Análisis y Diseño de un Edificio de 20 Niveles con Disipadores de Energía Sísmica y sin ellos", Tesis presentada en la Facultad de Ingeniería, UNAM, como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil.
- Silva, F. L. (1993), "Criterio para Diseño Sísmico de Estructuras con Dispositivos Disipadores de Energía", Tesis presentada en la Facultad de Ingeniería, UNAM, como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil.
- Silva, F. L. (1997), Comunicación personal.
- Silva, F. L. y Ruiz, S. E. (1993), "Consideraciones sobre el Diseño Sísmico de Marcos con Dispositivos Disipadores de Energía", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta Jalisco, México.
- Silva, F. L. y Ruiz S. E. (1994), "Comparación de la Respuesta Sísmica de Marcos con Dispositivos Disipadores de Energía y sin ellos", Revista de Ingeniería Sísmica No. 48.
- Smith, J. C. (1996), "Structural Steel Design", LRFD Approach, Second Edition, John Wiley & Sons.
- Suárez, R., Ruiz, S. E. y Esteva L. (1993), "Sobre la Respuesta Sísmica de Sistemas Estructurales con Osciladores Resonantes sujetos a Sismos de Banda Angosta", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta Jalisco, México.

REFERENCIAS

- Tsai, K. C. (1992), "Steel Triangular Plate Energy Absorber for Earthquake-Resistant Buildings", Proceedings, the First World Conference on Constructional Steel Design, Acapulco, México.
- Tsai, K. C., Li, J. W., Hong, C. P., Chen, H. W. & Su, Y. F. (1993a), "Welded Steel Triangular Plate Device for Seismic Energy Dissipation", Proceedings, ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco California.
- Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P. & Wang, T. F. (1993b), "Steel Plate Energy Absorbers for Improved Earthquake Resistance", Proceedings, ASCE Structures Congress, Irvine California.
- Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P. & Su, Y. F. (1993c), "Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction", Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3.
- Urrego, O. E. (1994), "Elección del mejor Arreglo de Disipadores en un Marco Estructural Plano", Tesis presentada en la DEPMI, UNAM, como requisito para obtener el grado de Maestra en Ingeniería (Estructuras).
- Urrego, O. E., Ruiz, S. E. y Silva F. L. (1993), "Influencia de la Distribución de Disipadores de Energía en la Respuesta Sísmica de un Edificio", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta Jalisco, México.
- Wakabayashi, M. y Martínez, E. (1988), "Diseño de Estructuras Sismorresistentes", Ed. McGraw Hill/Interamericana de México, S. A. de C. V.
- Whittaker, A., Bertero, V., Thompson, C., & Alonso, L. J. (1989), "Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipating Device", Report UCB/EERC 89-02.
- Wolfram, S. (1991), "Mathematica", A System for Doing Mathematics by Computer, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc.

APÉNDICE A

OBTENCIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE COLUMNAS DEL MARCO CON DISIPADORES EN FUNCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LAS COLUMNAS DEL MARCO CONVENCIONAL

A continuación se demuestra la obtención de la expresión general (ecuación 2.3) para calcular las dimensiones de las columnas (secciones en cajón cuadradas) del marco con disipadores de energía a partir de las dimensiones de las columnas del marco convencional (secciones en cajón). Basándose en las hipótesis del modelo de cortante, en el cual se desprecian las deformaciones axiales y por cortante de las columnas así como las deformaciones por flexión y cortante de las trabes, considerando exclusivamente las deformaciones por flexión de las columnas y asumiendo que las trabes son infinitamente rígidas, se tiene que la rigidez lateral de entrepiso es función únicamente de la rigidez lateral que aportan las columnas, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$K_T = \frac{12}{H^3} \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (\text{A.1})$$

donde K_T es la rigidez lateral del entrepiso en estudio, n es el número de columnas en el entrepiso, E es el módulo de elasticidad del material de la columna, I es el momento de inercia de las columnas y H la altura del entrepiso. Se observa en la expresión A.1 que la rigidez lateral es directamente proporcional al momento de inercia de las columnas.

El momento de inercia de una columna de sección transversal en cajón cuadrada de lado L , considerando que el espesor e de los patines es constante e igual al espesor del alma, está dado por la expresión siguiente:

$$I = \frac{L^4 - (L - 2e)^4}{12} \quad (A.2)$$

se sabe que la rigidez del marco sin disipadores (\mathbf{K}_{sd}) es:

$$\mathbf{K}_{sd} = \alpha_1 \mathbf{K}_T \quad (A.3)$$

Es decir:

$$\frac{12}{H^3} \sum_{i=1}^n E_i I_{d_i} = \alpha_1 \left[\frac{12}{H^3} \sum_{i=1}^n E_i I_i \right] \quad (A.4)$$

simplificando (suponiendo que las columnas de un entrepiso tienen la misma inercia):

$$I_d = \alpha_1 I \quad (A.5)$$

donde I_d es la inercia de la sección transversal de una columna del marco sin disipadores y α_1 es una fracción de la rigidez lateral total de entrepiso del marco convencional.

Al considerar la expresión A.2 en la A.5 se tiene:

$$\frac{L_d^4 - (L_d - 2e)^4}{12} = \alpha_1 \left[\frac{L^4 - (L - 2e)^4}{12} \right] \quad (A.6)$$

$$\alpha_1 [L^4 - (L - 2e)^4] = L_d^4 - (L_d - 2e)^4 \quad (A.7)$$

$$\alpha_1 [L^4 - (L - 2e)^4] = 8e(L_d^3 - 3L_d^2e + 4L_de^2 - 2e^3) \quad (A.8)$$

reagrupando los términos semejantes, se obtiene una ecuación cubica cuya solución debe ser la variable o la incógnita L_d que permite determinar la dimensión de la sección transversal de las columnas del marco con disipadores:

$$L_d^3 - 3eL_d^2 + 4e^2L_d - 2e^3 - \frac{\alpha_1 [L^4 - (L - 2e)^4]}{8e} = 0 \quad (A.9)$$

para obtener la solución de esta ecuación cúbica se utilizó el programa de cómputo MATHEMATICA V2.0 (Wolfram, 1991). La solución matemática de esta ecuación cúbica contempla tres raíces, una raíz real y dos imaginarias. Sin embargo para los fines de este trabajo sólo es de interés la raíz real cuya solución está en términos de las variables α_1 , L y e , la cual se muestra a continuación:

$$L_d = e - \frac{\left(\sqrt[3]{\frac{2}{3}}\right) e^2}{\sqrt[3]{-18\alpha_1 e^3 + 36\alpha_1 e^2 L - 27\alpha_1 e L^2 + 9\alpha_1 L^3 + \sqrt{3} \left(\begin{array}{l} 4e^6 + 108\alpha_1^2 e^6 - 432\alpha_1^2 e^5 L + \\ 756\alpha_1^2 e^4 L^2 - 756\alpha_1^2 e^3 L^3 + \\ 459\alpha_1^2 e^2 L^4 - 162\alpha_1^2 e L^5 + \\ 27\alpha_1^2 L^6 \end{array} \right)}} + \sqrt[3]{-18\alpha_1 e^3 + 36\alpha_1 e^2 L - 27\alpha_1 e L^2 + 9\alpha_1 L^3 + \sqrt{3} \left(\begin{array}{l} 4e^6 + 108\alpha_1^2 e^6 - 432\alpha_1^2 e^5 L + \\ 756\alpha_1^2 e^4 L^2 - 756\alpha_1^2 e^3 L^3 + \\ 459\alpha_1^2 e^2 L^4 - 162\alpha_1^2 e L^5 + \\ 27\alpha_1^2 L^6 \end{array} \right)}}{\sqrt[3]{18}}$$

si se reagrupan los términos para simplificar esta solución se obtiene la expresión general simplificada 2.3 para el cálculo de las dimensiones de las secciones transversales de las columnas del marco con disipadores.

APÉNDICE B

En el capítulo 3 se emplearon varios programas codificados en lenguaje BASIC para la revisión por resistencia de los elementos estructurales de acero estructural que componen las tres estructuras de acero. Para ello se requiere conformar el algoritmo y los diagramas de flujo correspondientes, primeramente se muestra el diagrama de flujo para la revisión de las columnas por carga axial, después el diagrama de flujo para la revisión de las columnas por flexocompresión uniaxial, posteriormente se presentan los dos diagramas para la revisión del pandeo de conjunto de los entrepisos de un marco (primero se presenta el método que se establece en las NTC Metálicas y después el criterio propuesto en los Comentarios de las NTC para Estructuras Metálicas, De Buen. 1993) y finalmente el diagrama de flujo para la revisión de las trabes de acero por flexión. Los diagramas de flujo se realizaron haciendo referencia únicamente a las especificaciones que se indican en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas 1995 del R.C.D.F. 1993.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS COLUMNAS POR COMPRESIÓN AXIAL

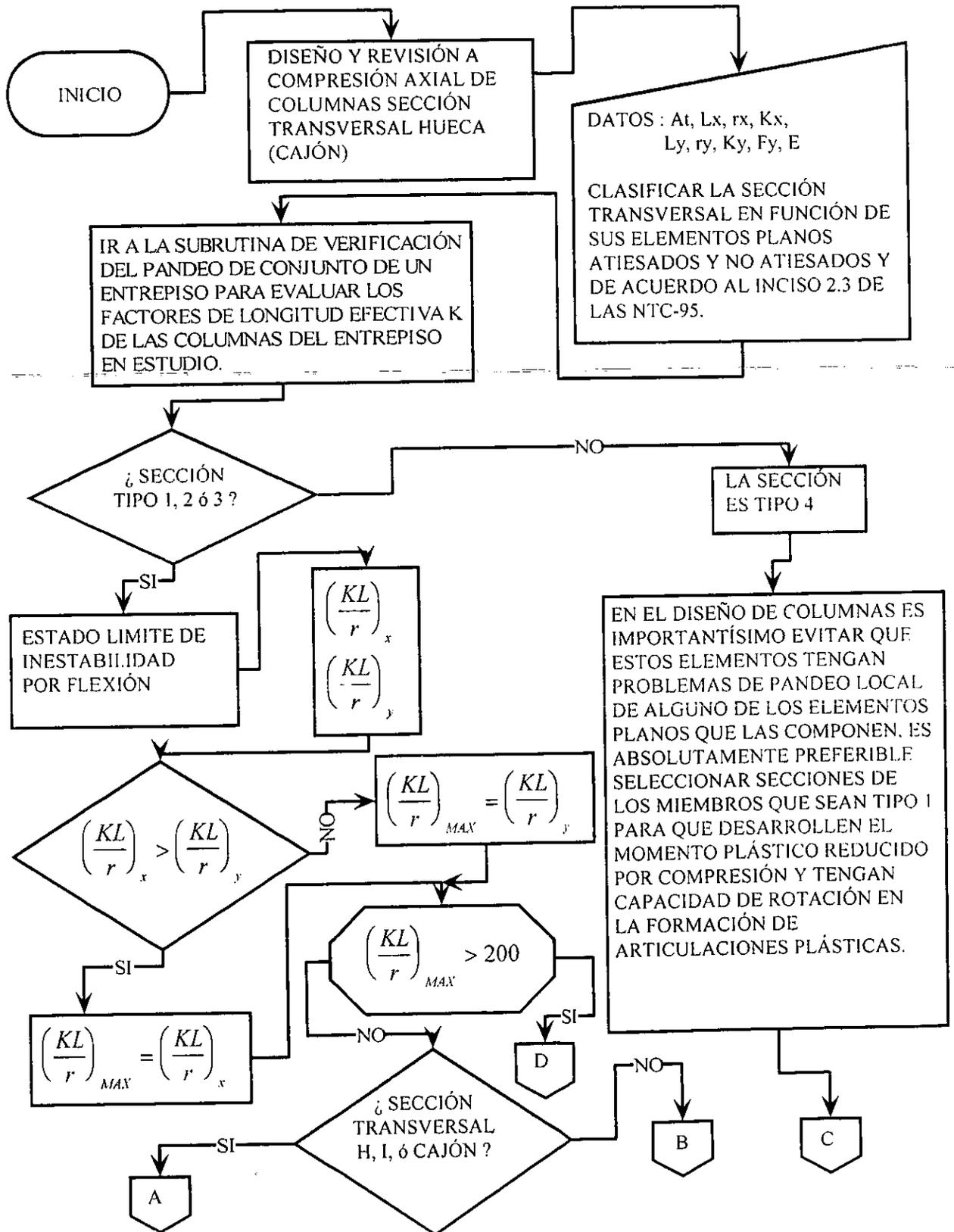


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS COLUMNAS POR COMPRESIÓN AXIAL (CONTINUACIÓN)

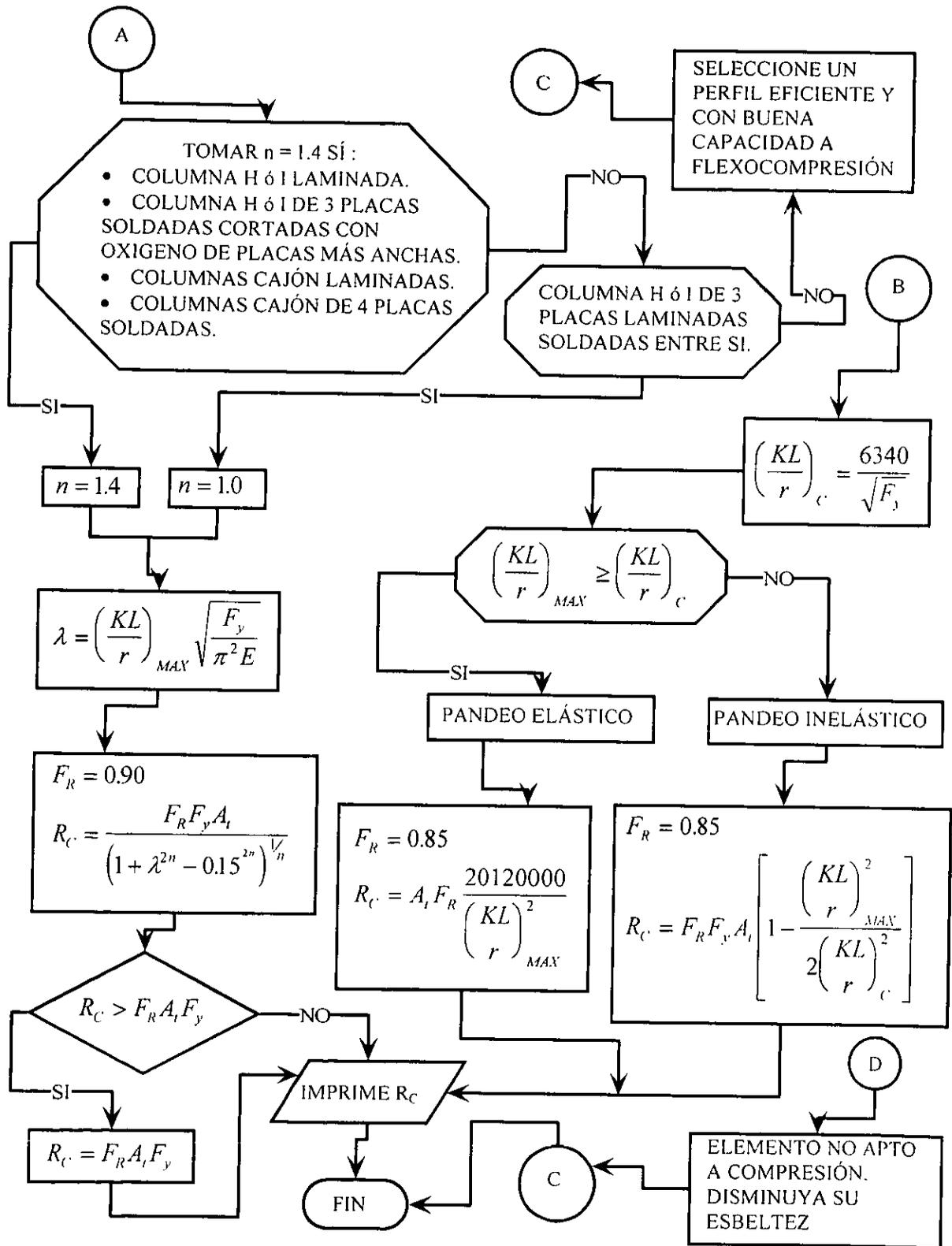


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS COLUMNAS POR FLEXOCOMPRESIÓN UNIAxIAL

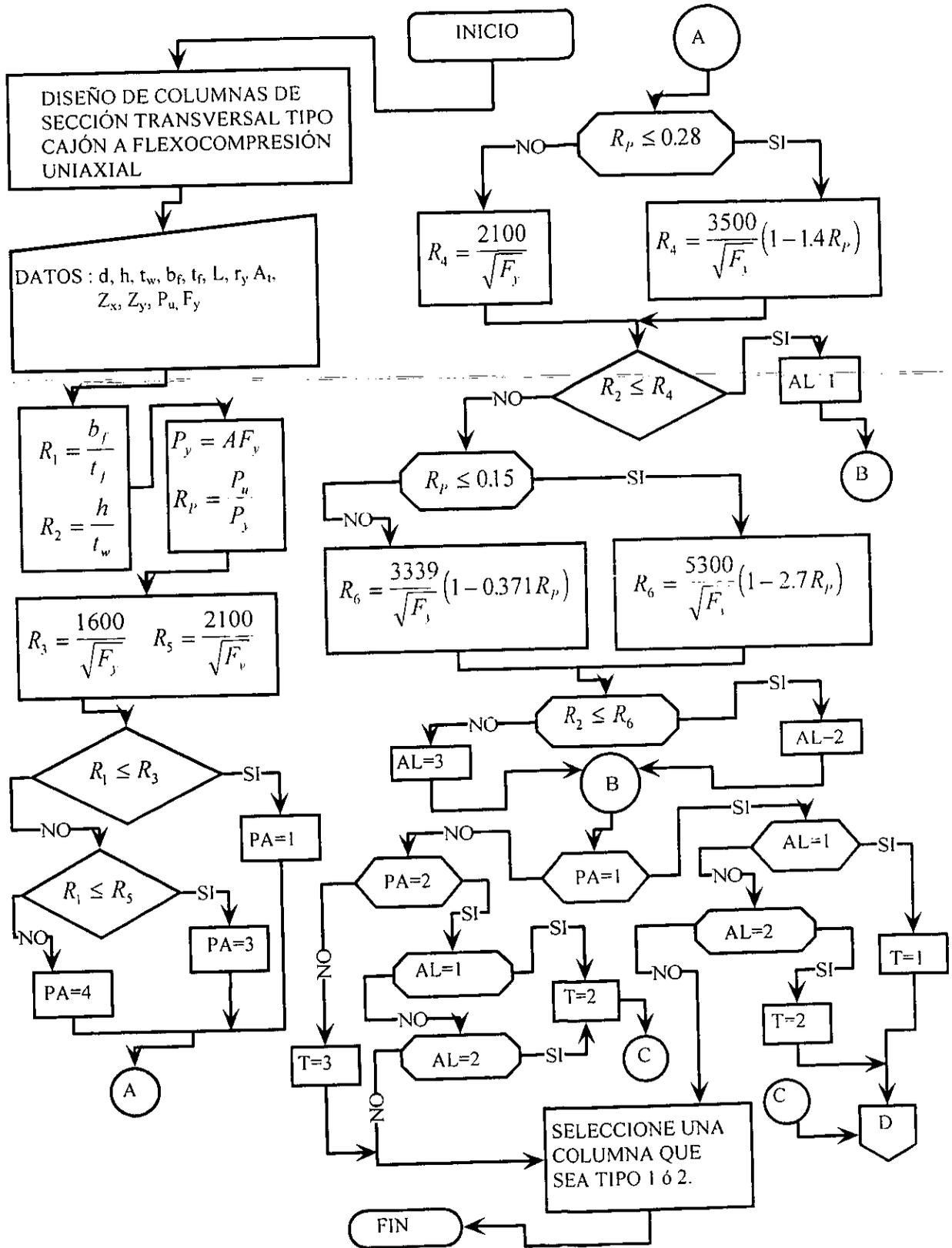


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS COLUMNAS
POR FLEXOCOMPRESIÓN UNIAxIAL (CONTINUACIÓN)

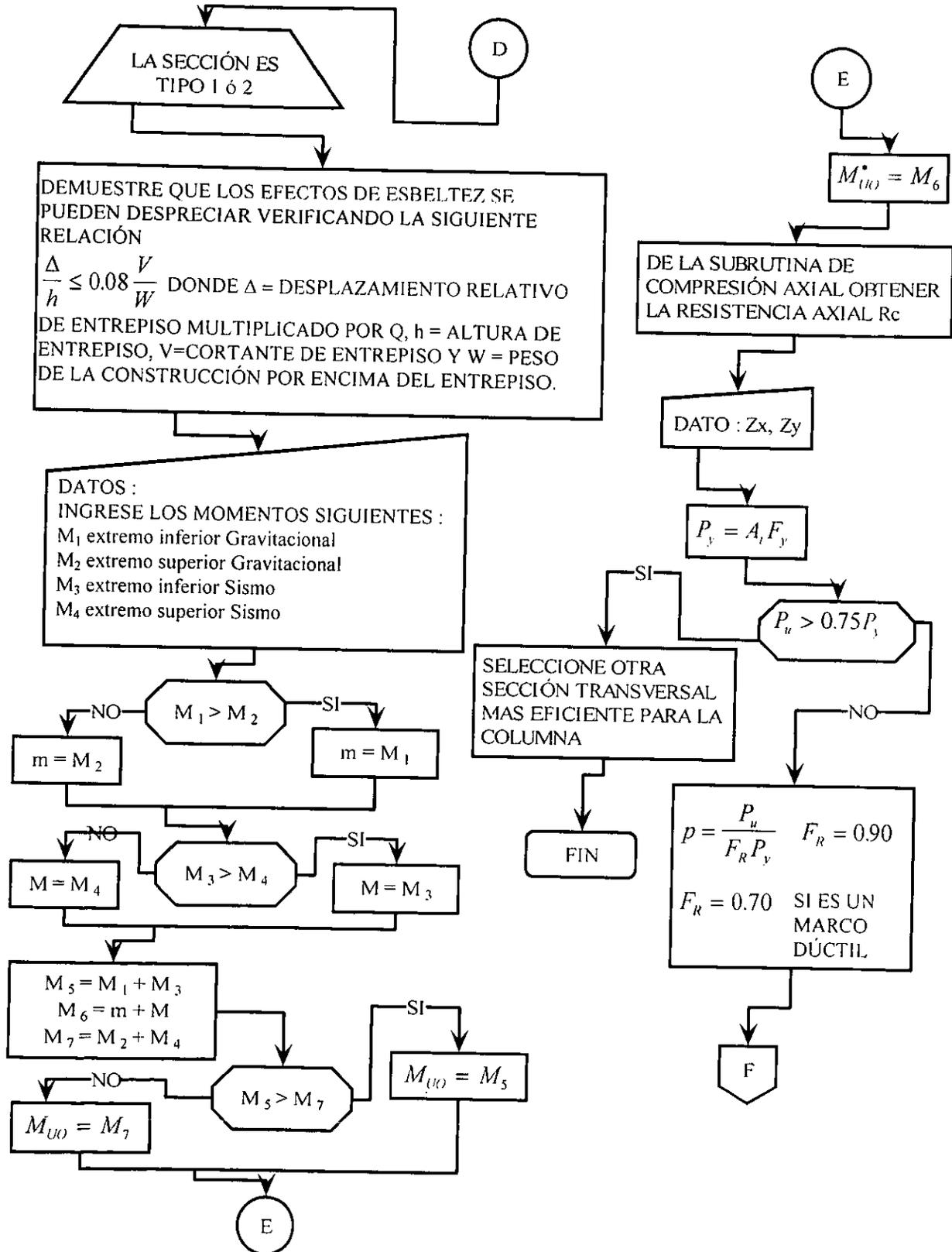


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS COLUMNAS POR FLEXOCOMPRESIÓN UNIAxIAL (CONTINUACIÓN)

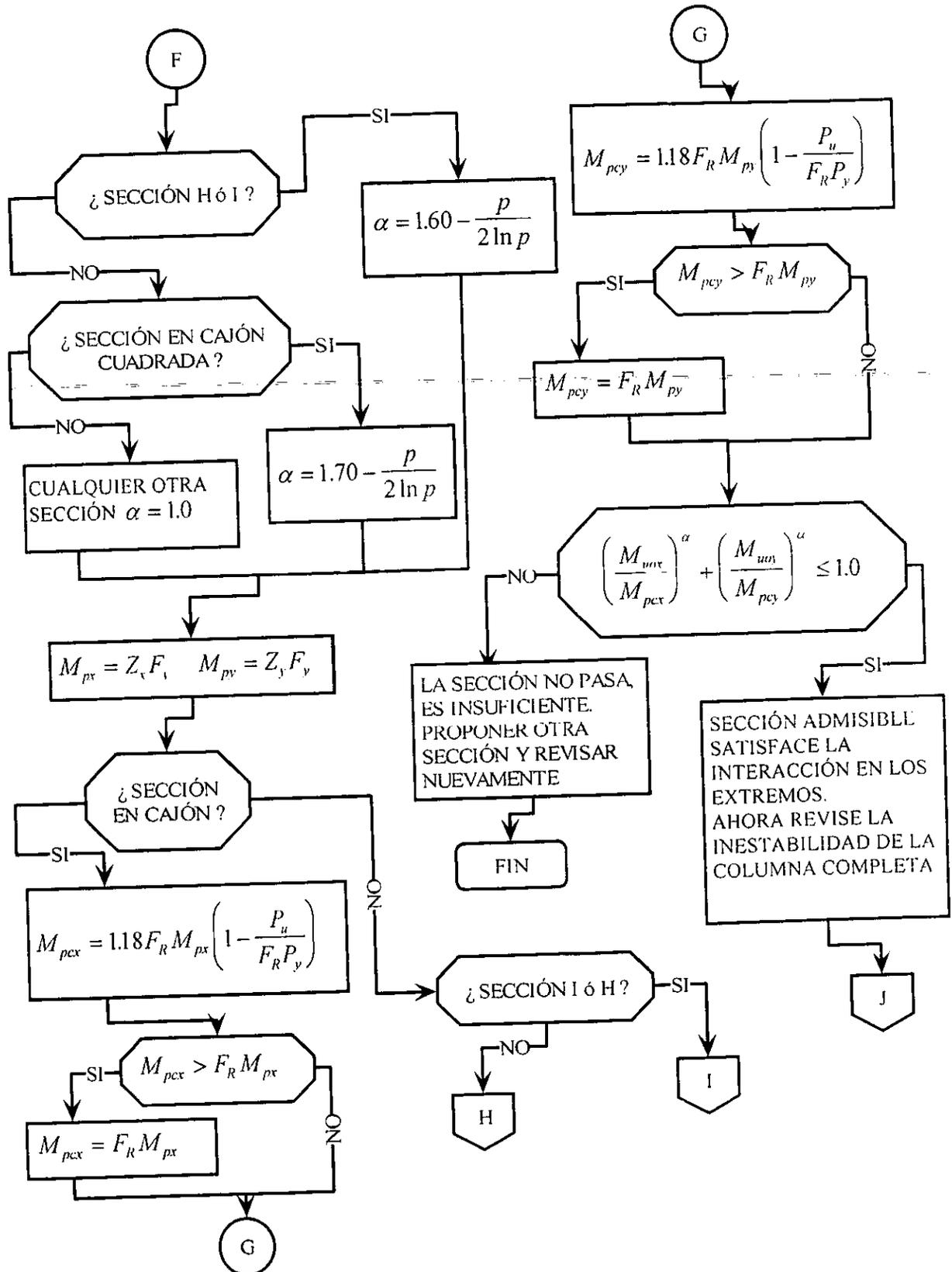


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS COLUMNAS POR FLEXOCOMPRESIÓN UNIAIXIAL (CONTINUACIÓN)

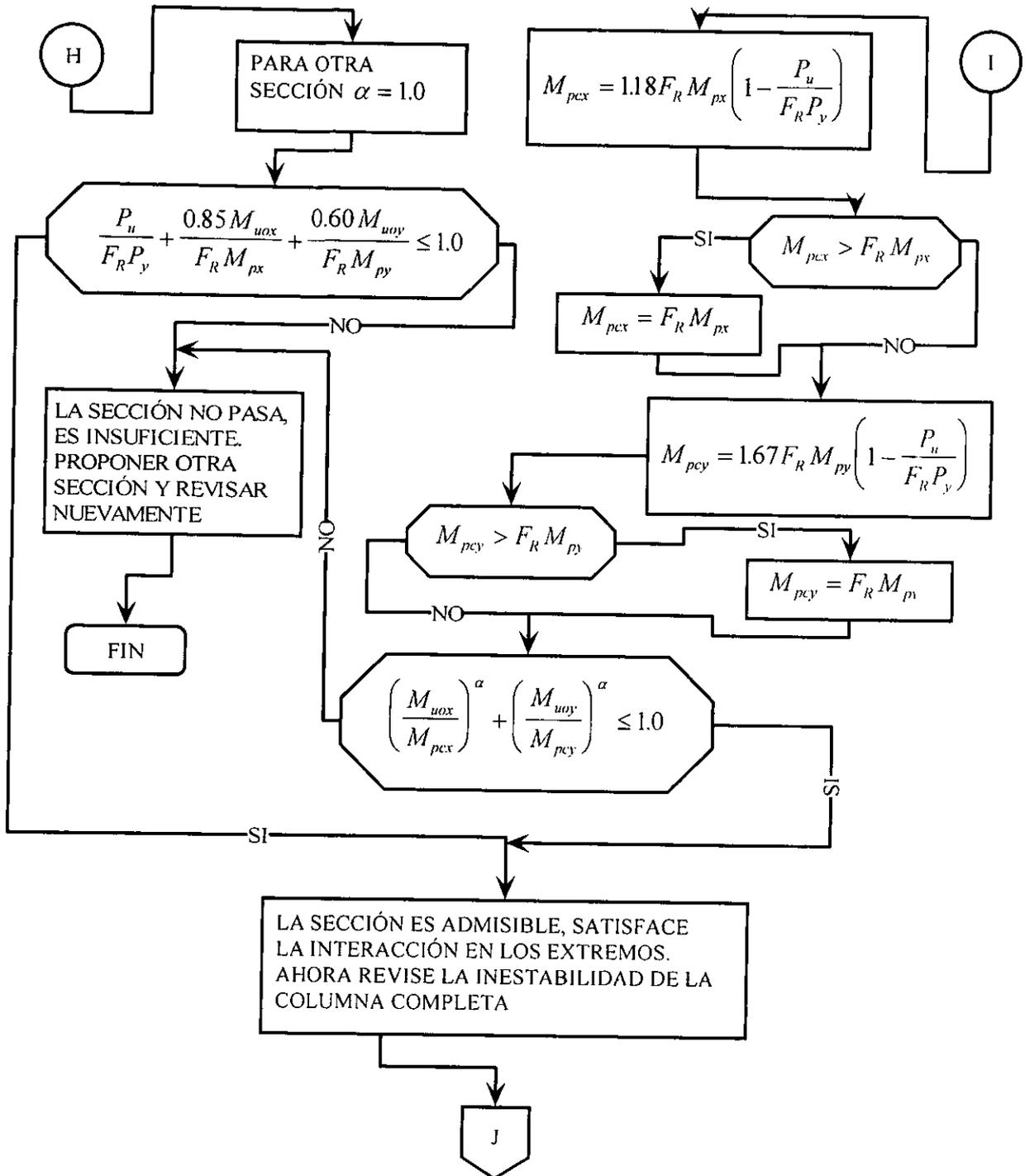


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS COLUMNAS POR FLEXOCOMPRESIÓN UNIAxIAL (CONTINUACIÓN)

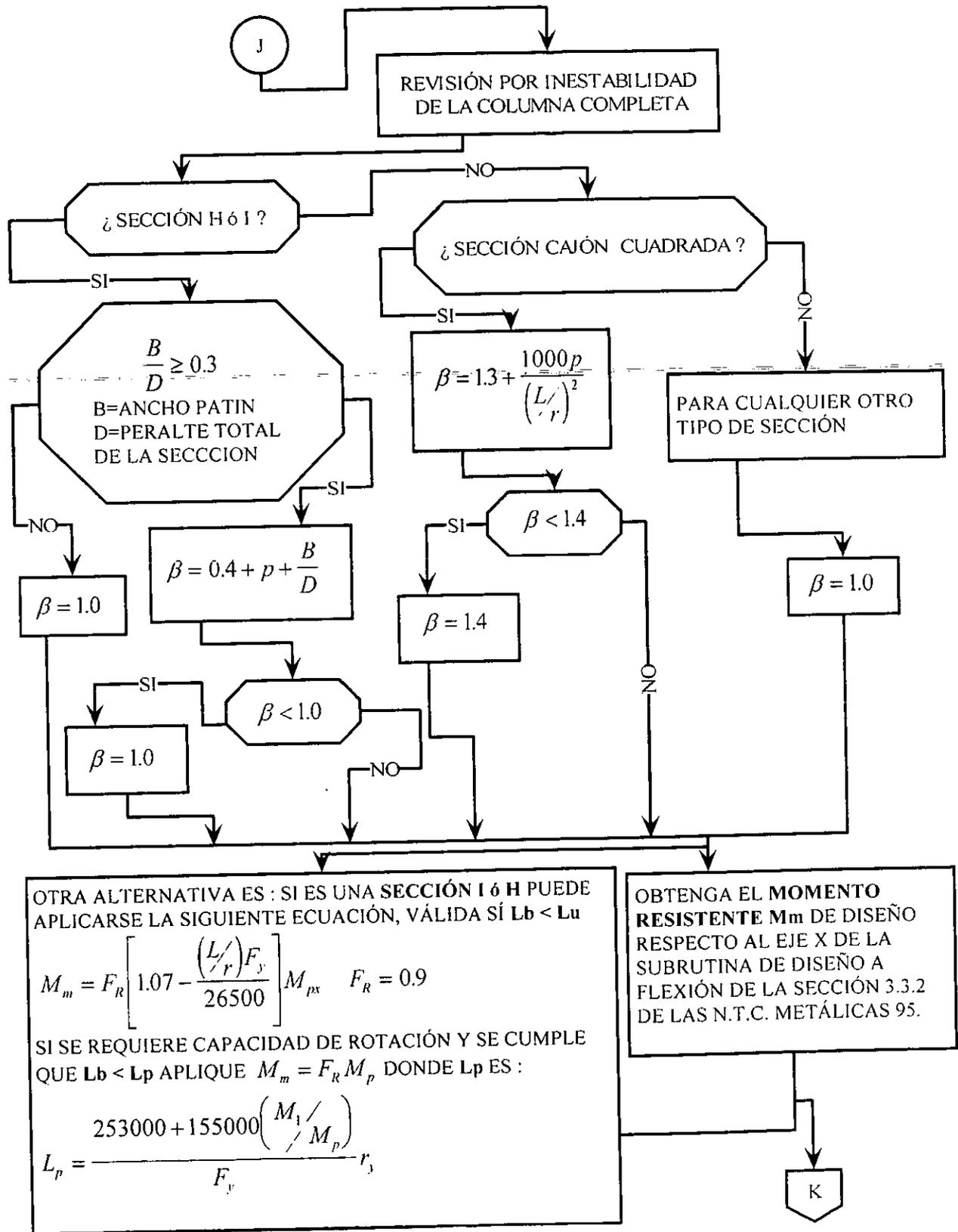
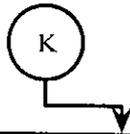


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS COLUMNAS
POR FLEXOCOMPRESIÓN UNIAxIAL (CONTINUACIÓN)



SI ES UNA SECCIÓN EN CAJÓN Y SE REQUIERE CAPACIDAD DE ROTACIÓN EN LA COLUMNA DEMUESTRE QUE LA LONGITUD SIN SOPORTES LATERALES $L_b < L_p$ DONDE L_p ES LA LONGITUD MÁXIMA NO SOPORTADA LATERALMENTE PARA LA QUE EL MIEMBRO PUEDE DESARROLLAR TODAVÍA EL MOMENTO PLÁSTICO M_p , Y TIENE CAPACIDAD DE

$$\text{ROTACIÓN, Y ESTÁ DADA POR } L_p = \frac{352000 + 211000 \left(M_1 / M_p \right)}{F_y} r_y \leq \frac{211000 r_y}{F_y}$$

M_p = MOMENTO PLÁSTICO RESISTENTE DEL MIEMBRO EN ESTUDIO.

M_1 = EL MENOR DE LOS MOMENTOS EN LOS EXTREMOS DEL TRAMO NO SOPORTADO LATERALMENTE.

r_y = RADIO DE GIRO ALREDEDOR DEL EJE DE MENOR MOMENTO DE INERCIA.

EL COCIENTE M_1/M_p ES POSITIVO CUANDO EL TRAMO NO SOPORTADO SE FLEXIONA EN CURVATURA DOBLE Y NEGATIVO EN CURVATURA SIMPLE.

SI CUMPLE QUE $L_b < L_p$ APLIQUE $M_m = F_R M_{px}$ $F_R = 0.9$

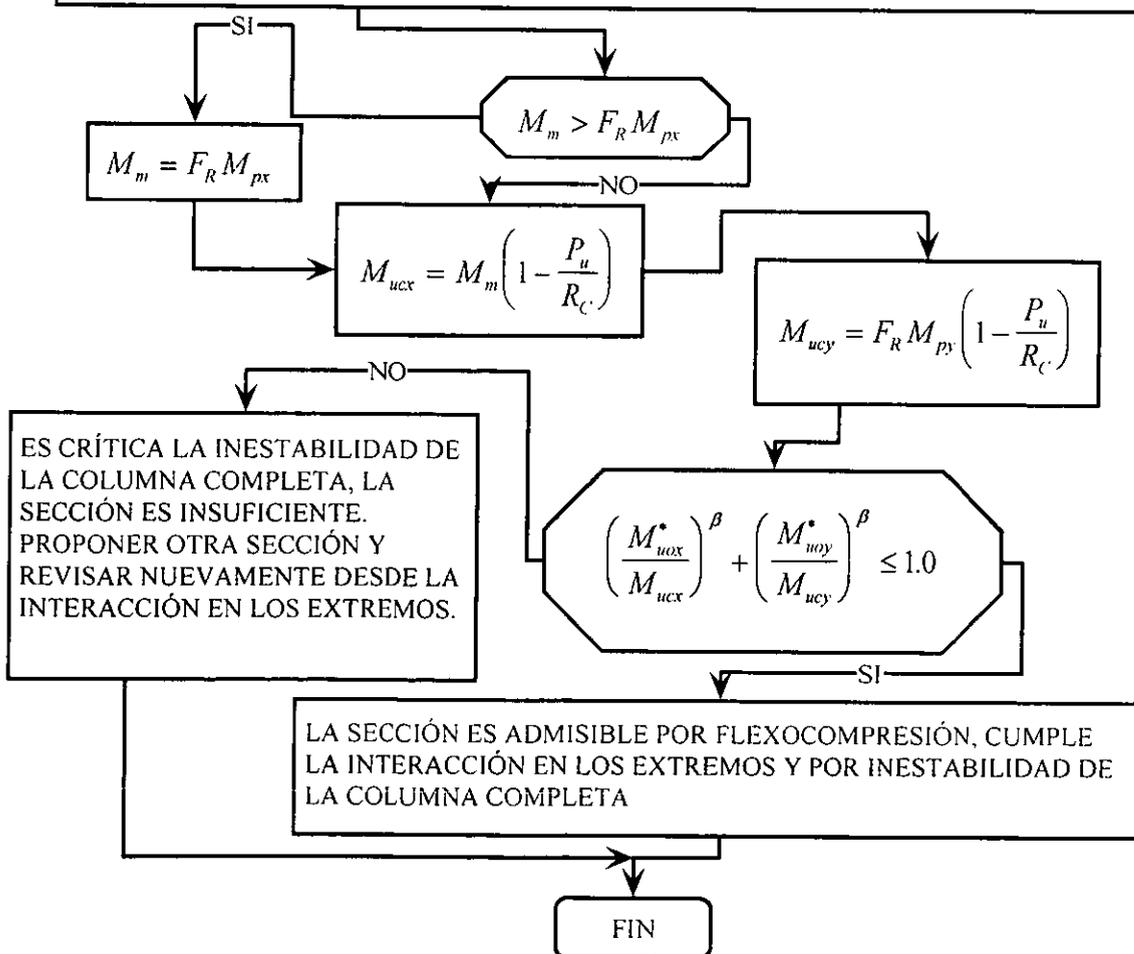


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DEL PANDEO DE CONJUNTO DE LOS ENTREPOSOS DE UN MARCO SEGÚN LAS NTC METÁLICAS 1995

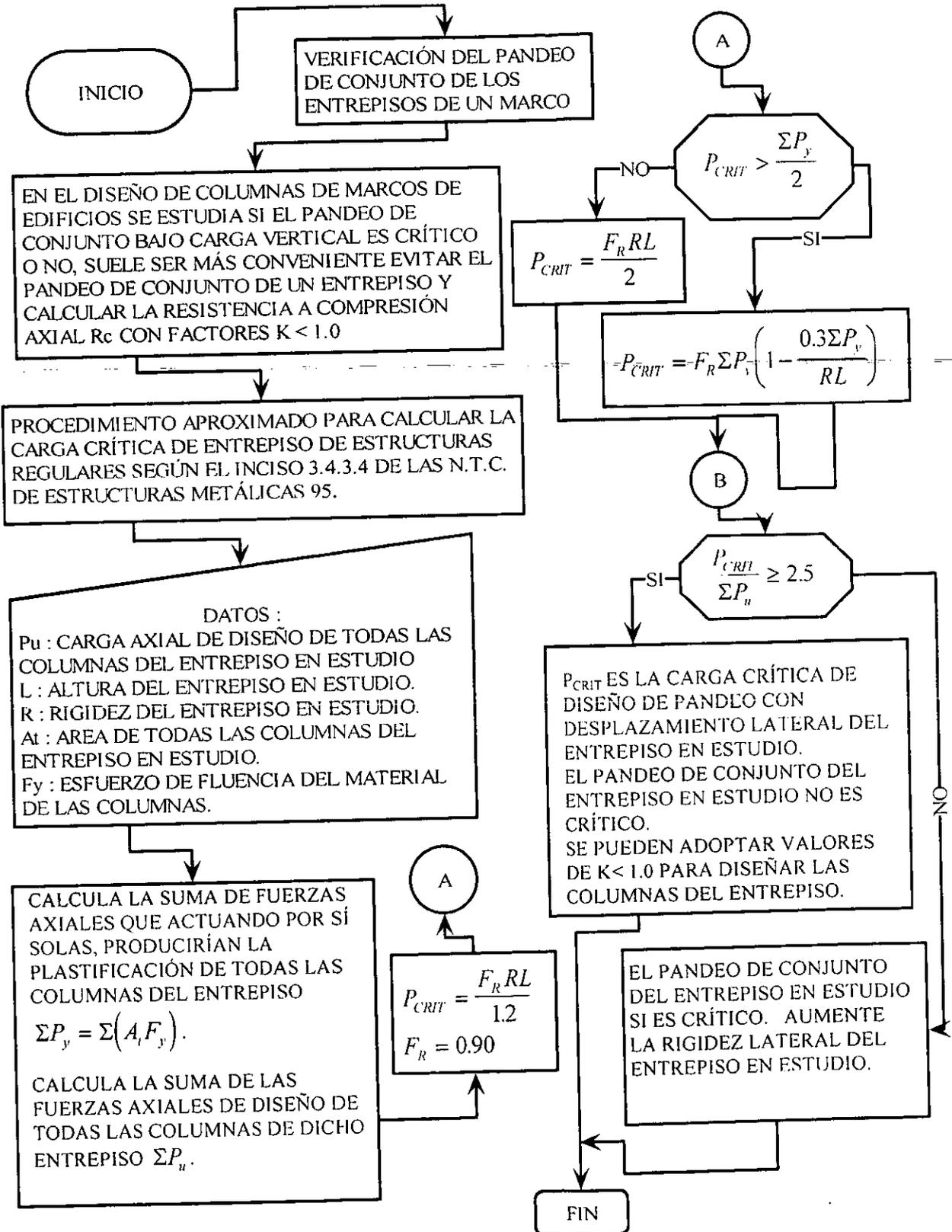


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DEL PANDEO DE CONJUNTO DE LOS ENTREPISOS DE UN MARCO (CRITERIO PROPUESTO POR DE BUEN)

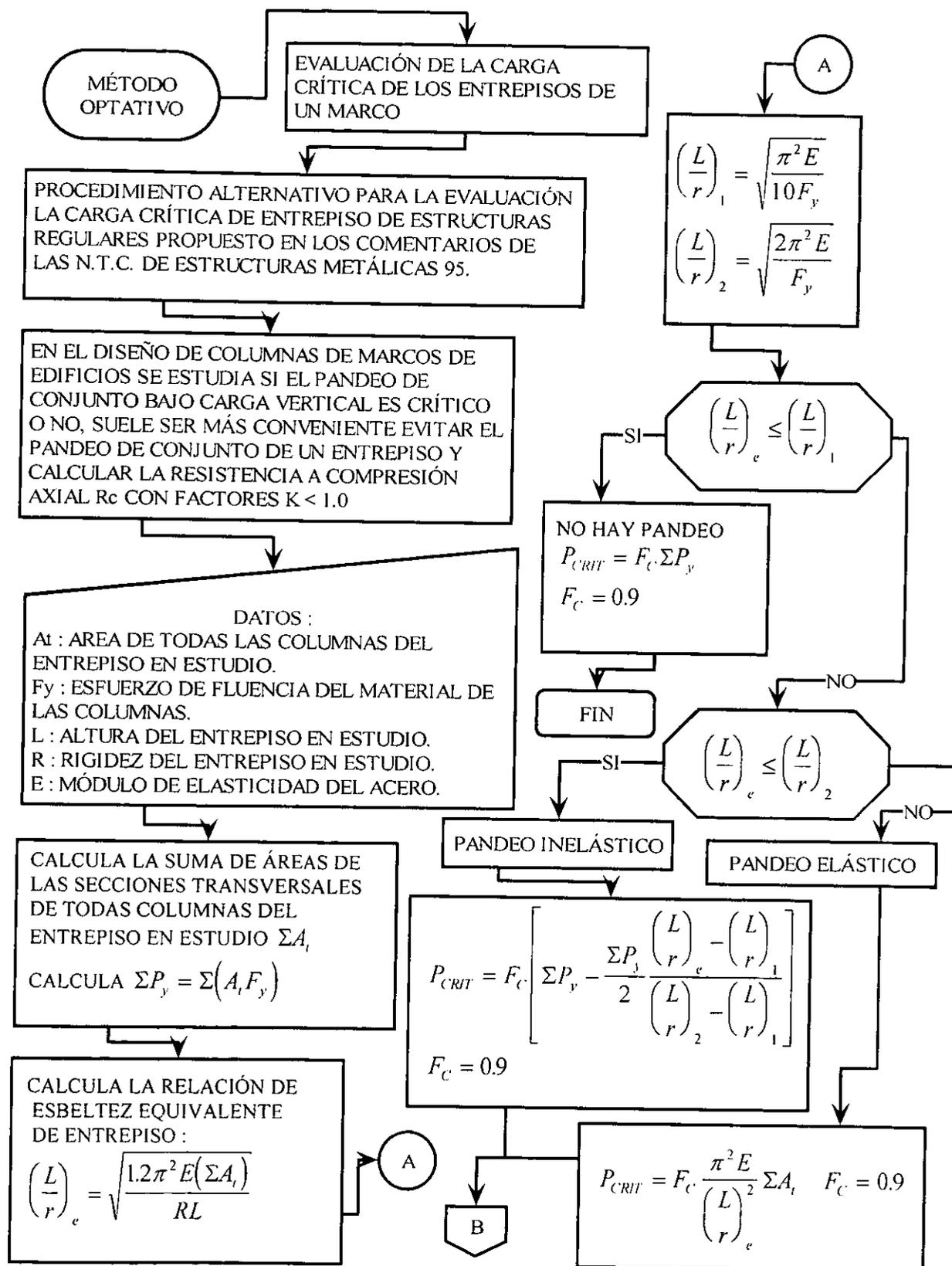


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS TRABES POR FLEXIÓN

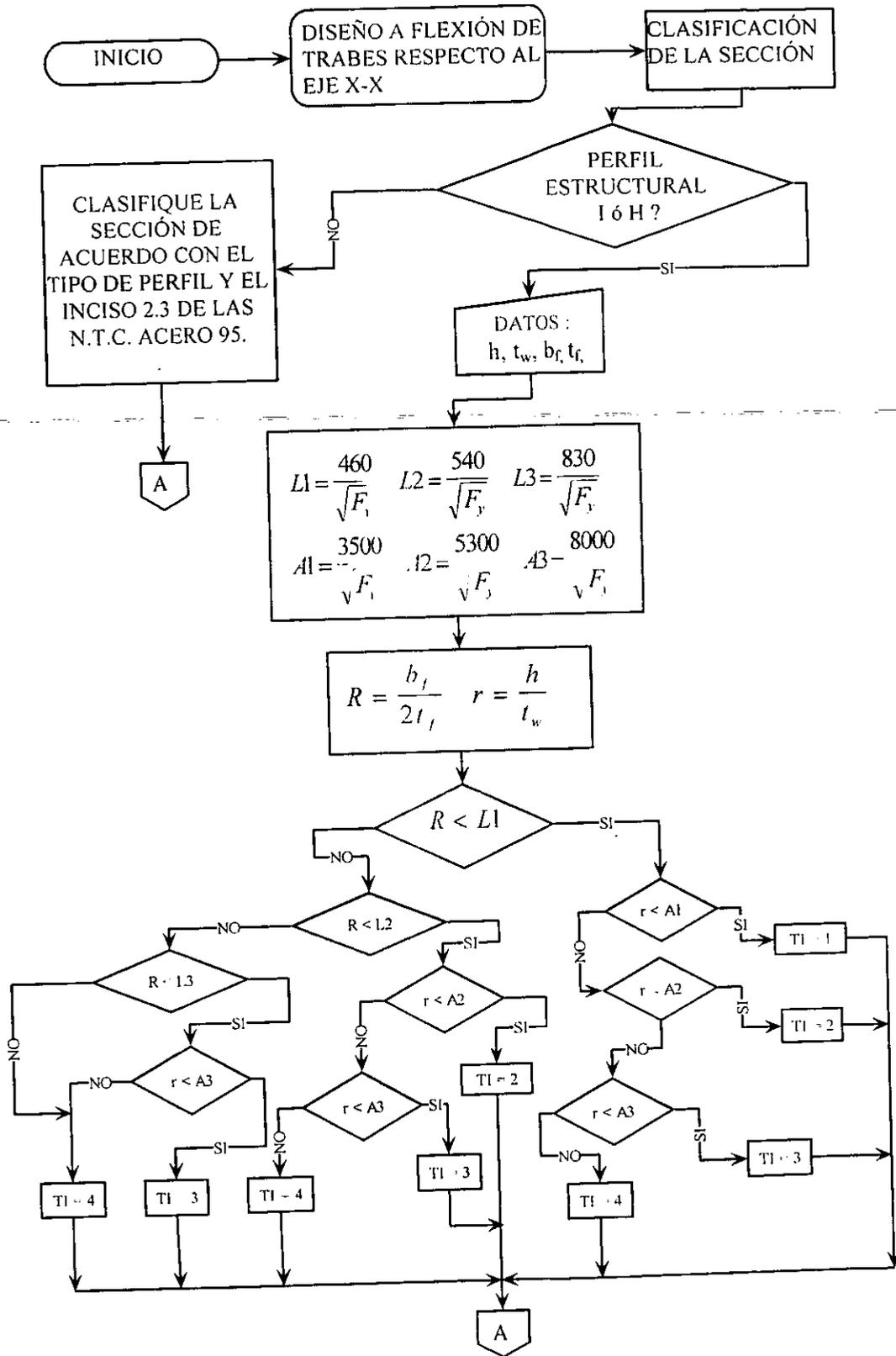


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS TRABES POR FLEXIÓN (CONTINUACIÓN)

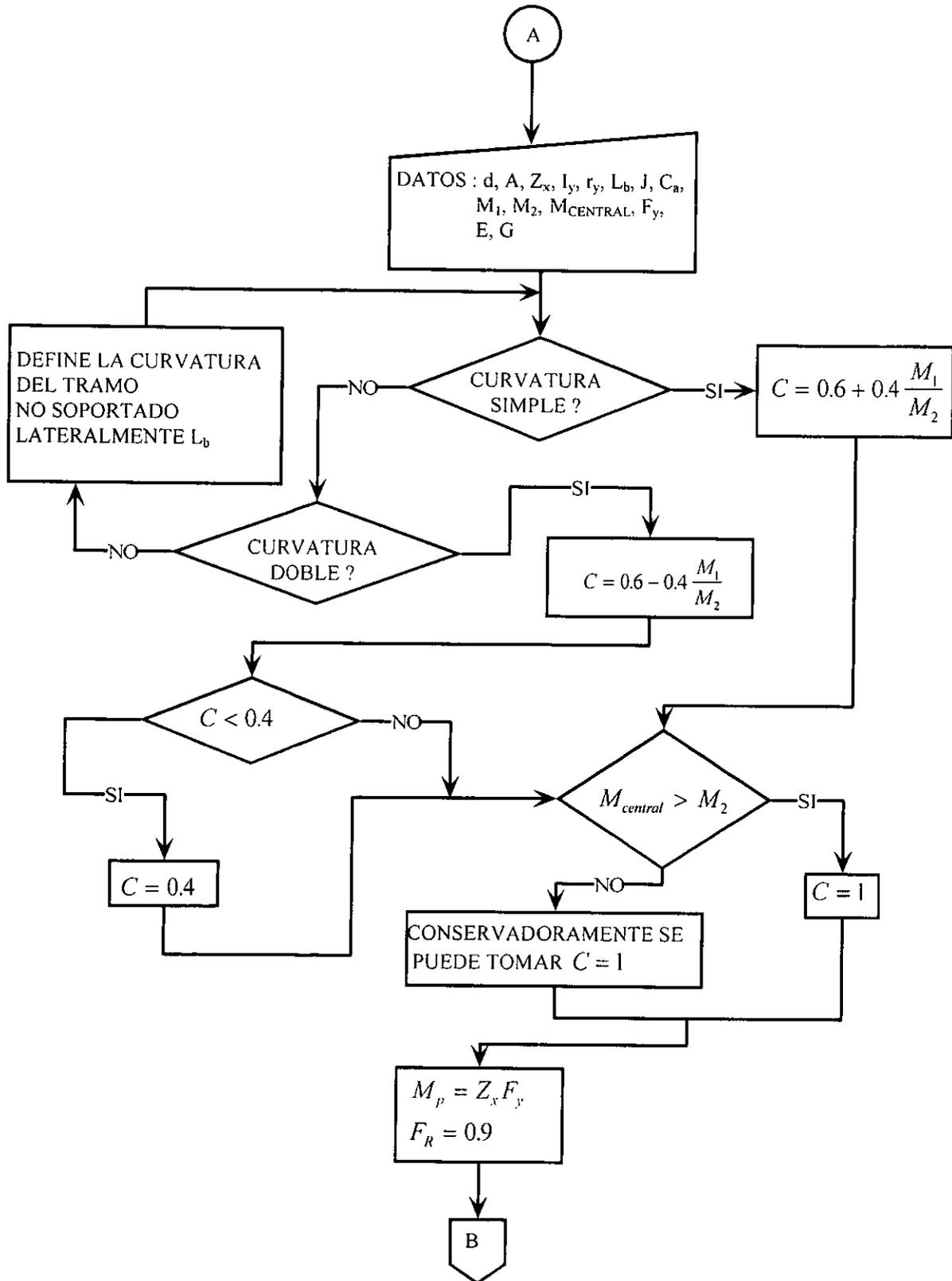


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS TRABES POR FLEXIÓN (CONTINUACIÓN)

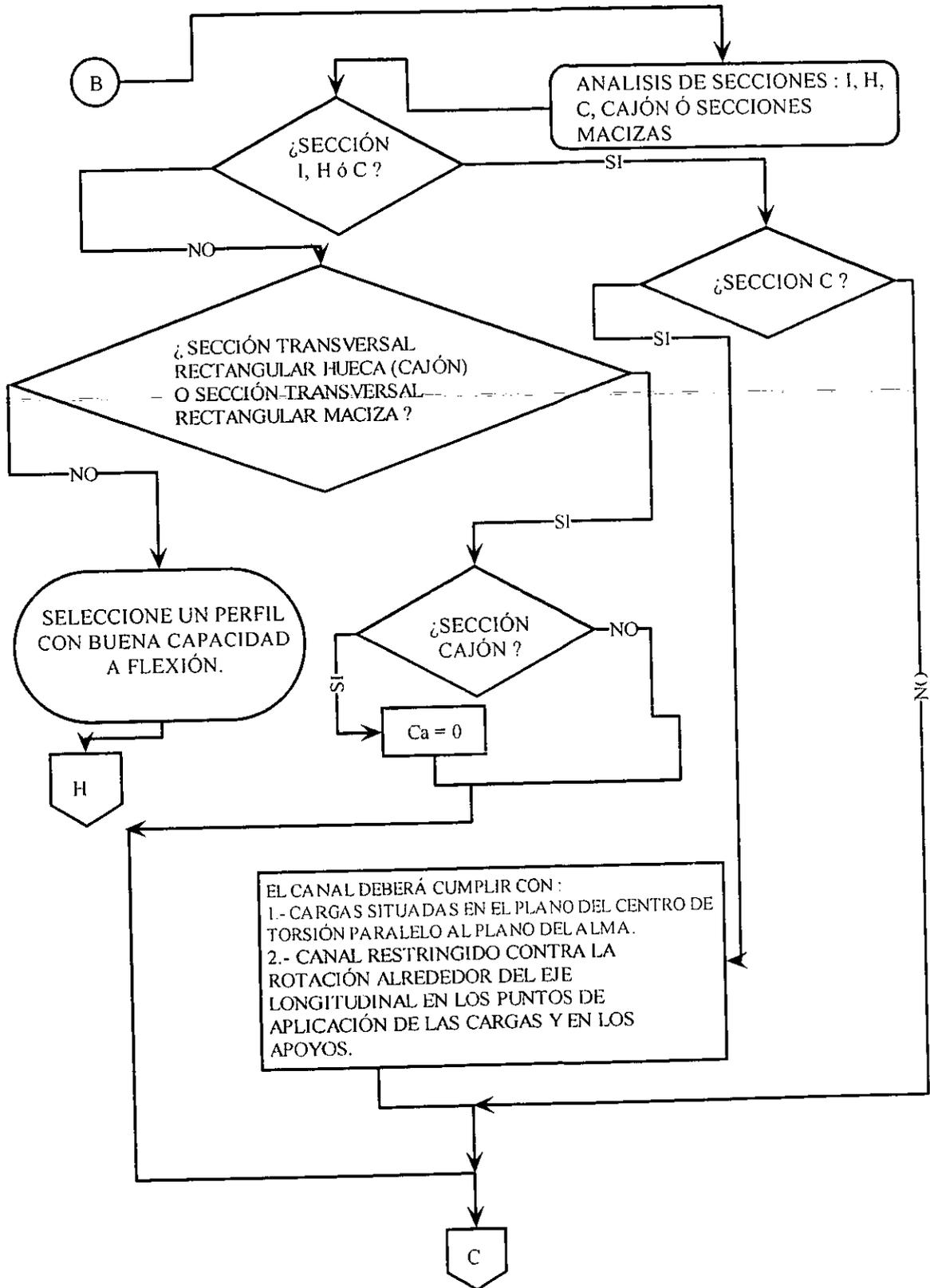


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS TRABES POR FLEXIÓN (CONTINUACIÓN)

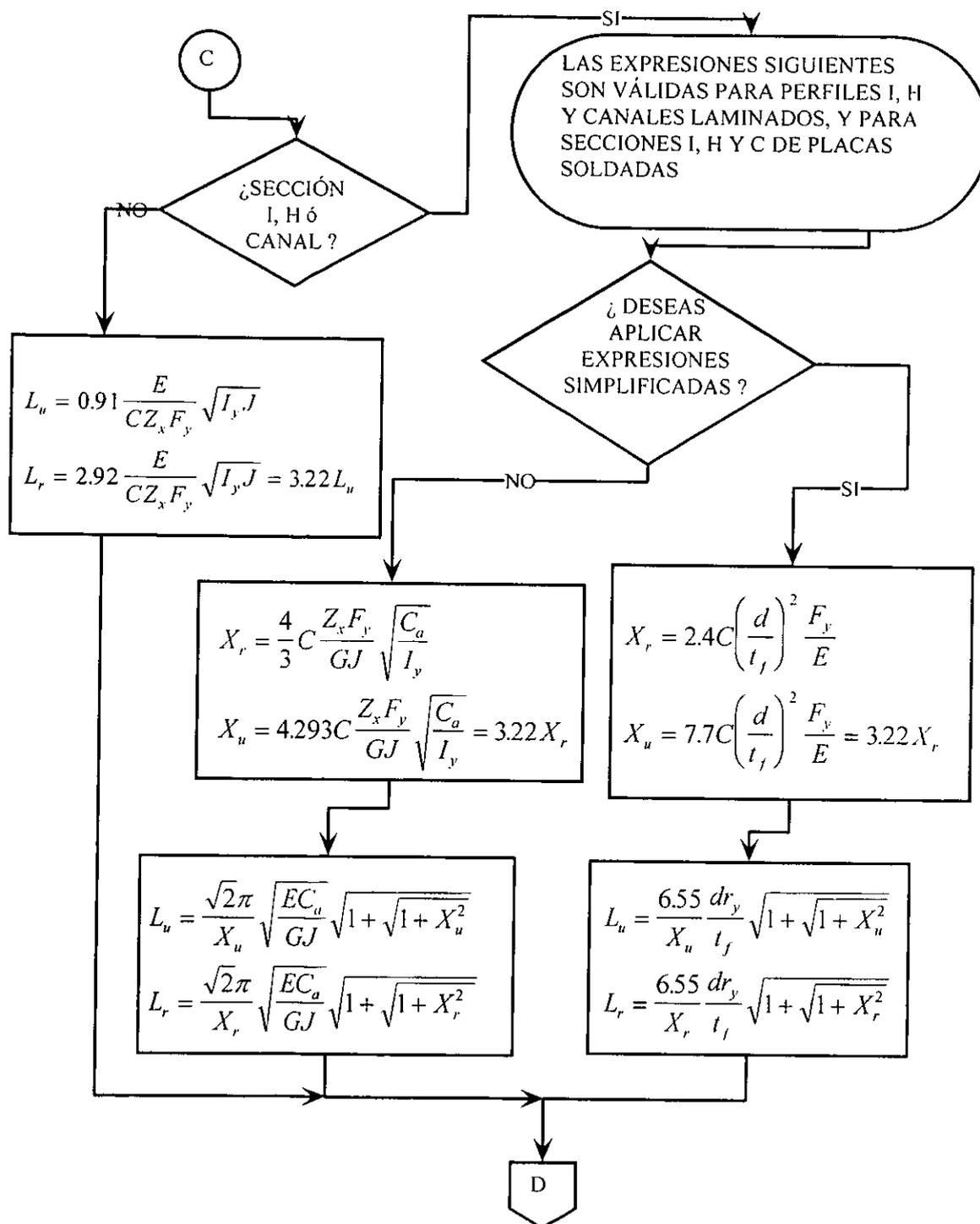


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS TRABES POR FLEXIÓN (CONTINUACIÓN)

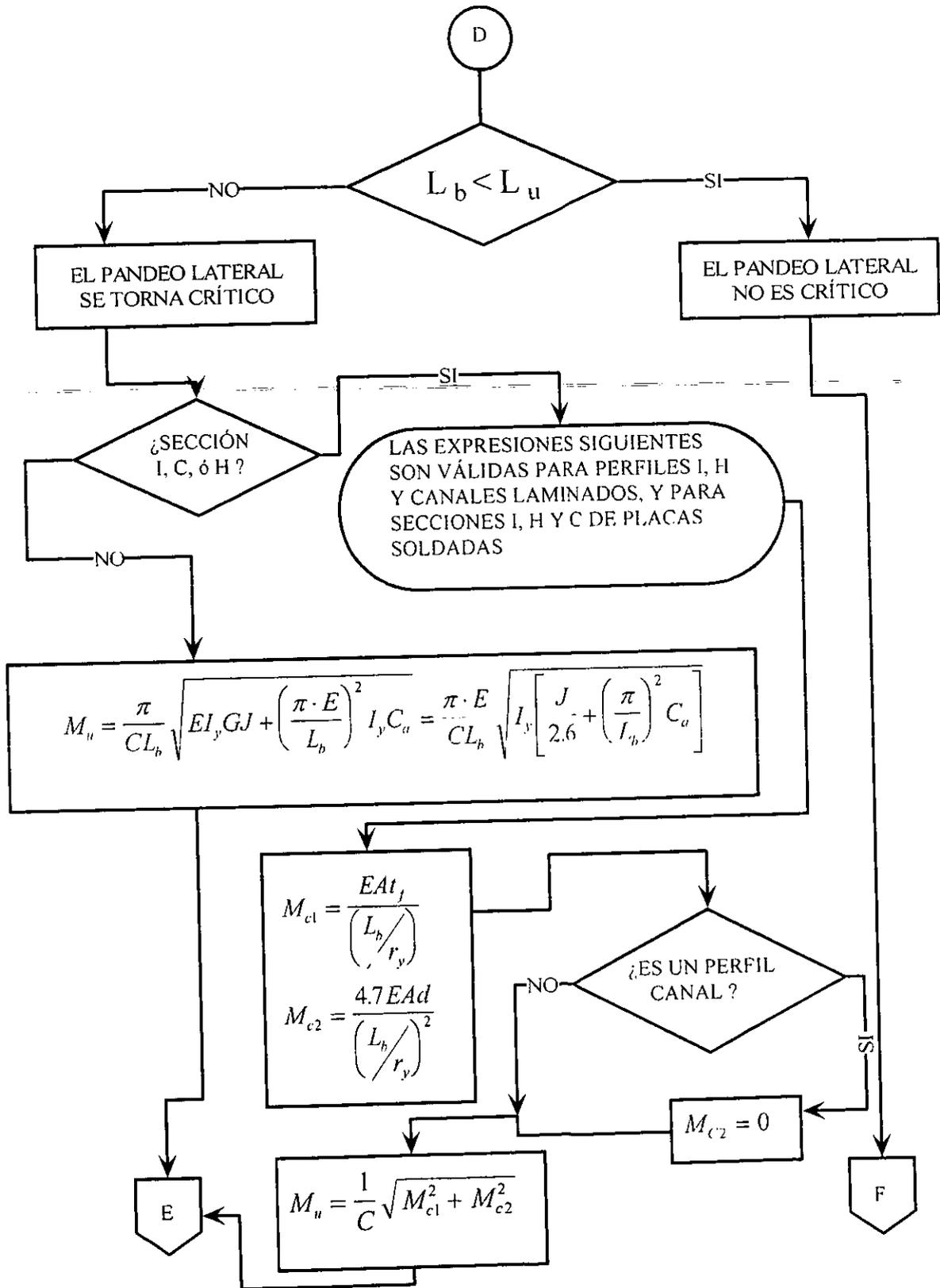


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS TRABES POR FLEXIÓN (CONTINUACIÓN)

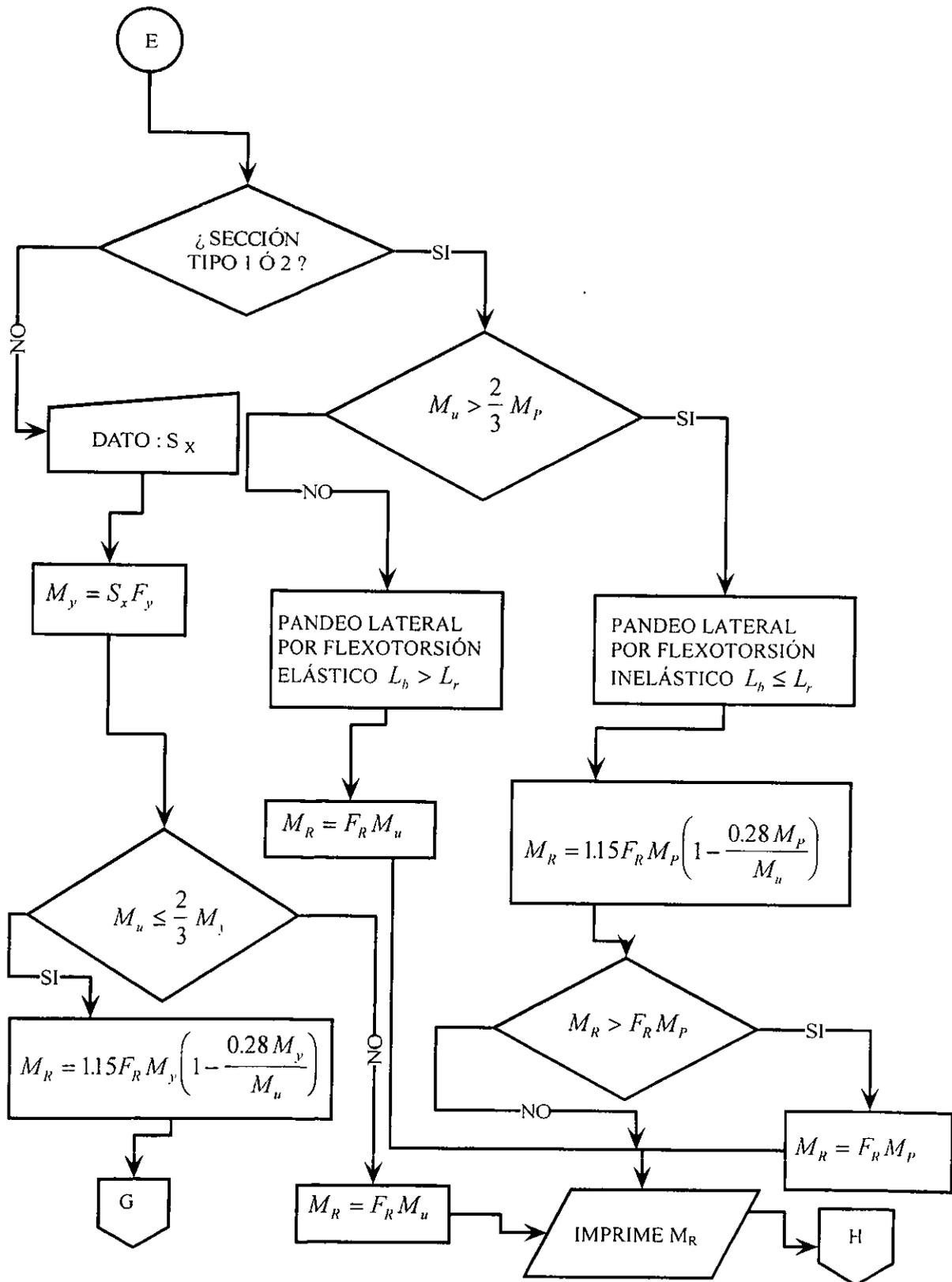
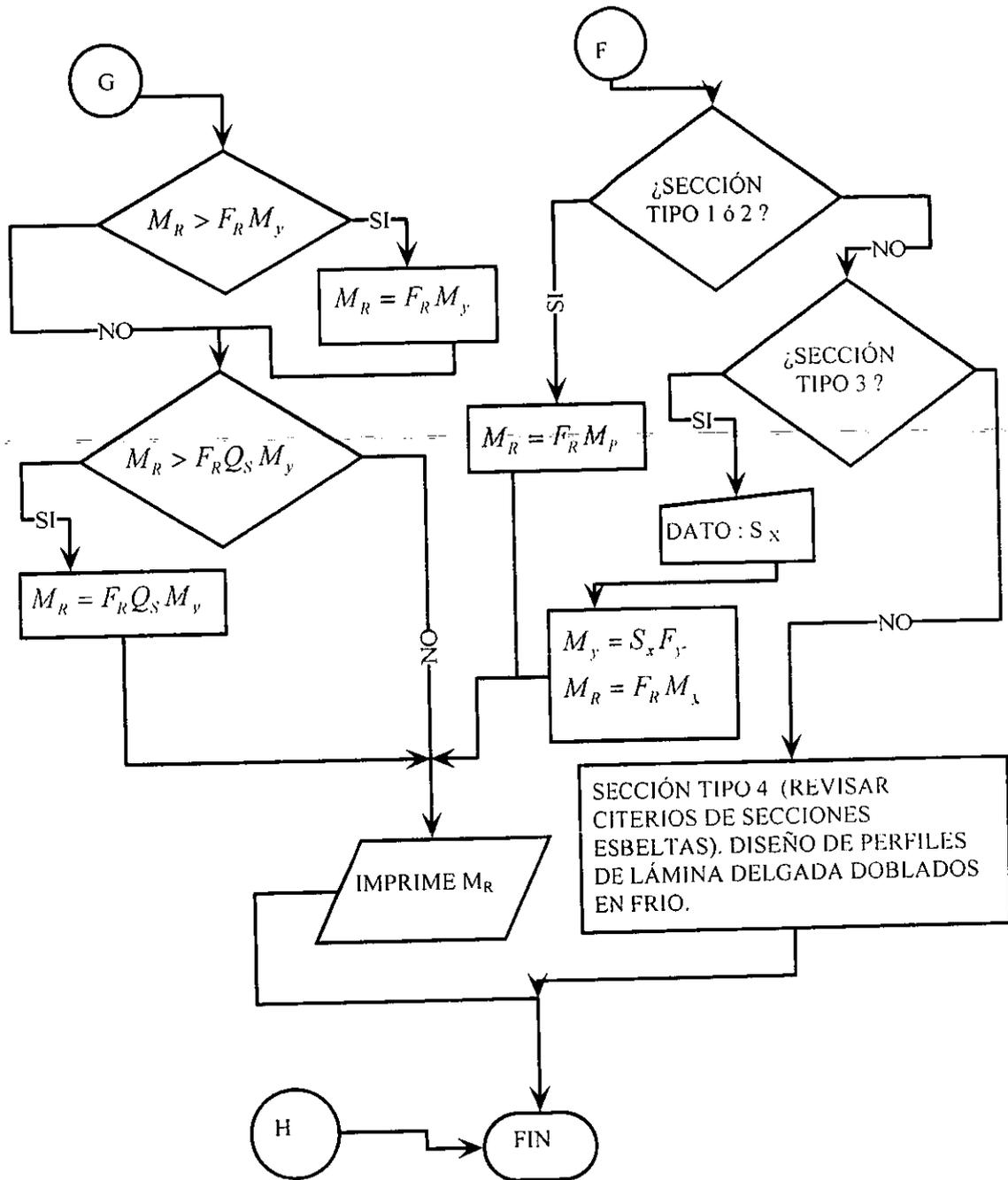


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE LAS TRABES POR FLEXIÓN (CONTINUACIÓN)



APÉNDICE C

Para utilizar el programa de cómputo SAP-90 (Habibullah y Wilson, 1992) y el programa de análisis DRAIN-2D (Powell, 1973) se requiere conformar un archivo de datos. A continuación se presentan dos listados de archivos de datos del marco con disipadores TADAS doble. El primer listado que se muestra es para el programa de análisis SAP-90, el cual se utilizó en el capítulo 3 y el segundo listado se conformó para el programa de análisis DRAIN-2D que se utilizó en el capítulo 4.

APÉNDICE C

ARCHIVO DE DATOS DEL MARCO CON DISIPADORES TADAS DOBLE PARA EL PROGRAMA SAP-90

```
C This is file MARCONDI
C archivo MARCONDI= MARCO CON DISIPADORES TADAS DOBLE
C
C Units are Ton METERS
SYSTEM
R=0 L=4 C=0 V=10 T=0.0001 P=0 W=0 Z=0
GRID :ARREGLO DE LA MALLA
XN=7 YN=1 ZN=41
0 3.5 7 10.5 14 17.5 21
0
0 2.95 3.5 5.95 6.5 8.95 9.5 11.95
12.5 14.95 15.5 17.95 18.5 20.95 21.5 23.95
24.5 26.95 27.5 29.95 30.5 32.95 33.5 35.95
36.5 38.95 39.5 41.95 42.5 44.95 45.5 47.95
48.5 50.95 51.5 53.95 54.5 56.95 57.5 59.95
60.5
```

JOINTS:

```
C GENERACION DE NODOS PARA EL MARCO
1 X=0 Y=0 Z=0
7 X=21 Y=0 Z=0 G=1,7,2
8 X=0 Y=0 Z=3.5
14 X=21 Y=0 Z=3.5
141 X=0 Y=0 Z=60.5
147 X=21 Y=0 Z=60.5 Q=8,14,141,147,1,7
C
C GENERACION DE NODOS PARA EL DISIPADOR
148 X=3.5 Y=0 Z=2.95
149 X=3.5 Y=0 Z=8.95
150 X=3.5 Y=0 Z=14.95
151 X=3.5 Y=0 Z=20.95
152 X=3.5 Y=0 Z=26.95
153 X=3.5 Y=0 Z=32.95
154 X=3.5 Y=0 Z=38.95
155 X=3.5 Y=0 Z=44.95
156 X=3.5 Y=0 Z=50.95
157 X=3.5 Y=0 Z=56.95
158 X=10.5 Y=0 Z=5.95
159 X=10.5 Y=0 Z=11.95
160 X=10.5 Y=0 Z=17.95
161 X=10.5 Y=0 Z=23.95
162 X=10.5 Y=0 Z=29.95
163 X=10.5 Y=0 Z=35.95
164 X=10.5 Y=0 Z=41.95
165 X=10.5 Y=0 Z=47.95
166 X=10.5 Y=0 Z=53.95
167 X=10.5 Y=0 Z=59.95
168 X=17.5 Y=0 Z=2.95
169 X=17.5 Y=0 Z=8.95
170 X=17.5 Y=0 Z=14.95
171 X=17.5 Y=0 Z=20.95
172 X=17.5 Y=0 Z=26.95
173 X=17.5 Y=0 Z=32.95
174 X=17.5 Y=0 Z=38.95
175 X=17.5 Y=0 Z=44.95
176 X=17.5 Y=0 Z=50.95
177 X=17.5 Y=0 Z=56.95
```

```
FRAME :ELEMENTOS FRAME
NM=100 NL=6 NSEC=6 X=0,0,0 Y=0,0,0 Z=-1,0,0 :PoPo PROPIO INCLUIDO COND 1
C
C 100 SECCIONES TRANSVERSALES
C 20 DE COLUMNAS (1 SECCION POR C/NIVEL)
C 40 DE TRABES (? SECCIONES POR C/NIVEL)
```

C 20 TRABES DE CRUJIAS EXTERIORES Y 20 DE LA CRUJIA CENTRAL)
C 20 DIAGONALES (1 SECCION POR C/NIVEL Y EN EL ARREGLO SON
C 4 DIAGONALES DOBLES POR NIVEL ALTERNANDOSE CON
C 2 DIAGONALES DOBLES EN EL NIVEL SIGUIENTE)
C 20 DISPOSITIVOS TADAS (1 SECCION POR C/NIVEL Y EN EL ARREGLO SON
C 2 TADAS POR NIVEL Y
C 1 TADAS EN EL NIVEL SIGUIENTE)
C
C 3 CONDICIONES DE CARGA ESTATICA VERTICAL (CM=1, CVmax=2, CVins=3)
C
C PROPIEDADES GEOMETRICAS DE COLUMNAS NIVEL 1-20
C
1 SH=B T=0.90,0.90,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.19 M=0.121\
TC=8.3E-06
2 SH=B T=0.90,0.90,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.19 M=0.121\
TC=8.3E-06
3 SH=B T=0.90,0.90,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.19 M=0.121\
TC=8.3E-06
4 SH=B T=0.85,0.85,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.12 M=0.114\
TC=8.3E-06
5 SH=B T=0.85,0.85,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.12 M=0.114\
TC=8.3E-06
6 SH=B T=0.85,0.85,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.12 M=0.114\
TC=8.3E-06
7 SH=B T=0.85,0.85,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.12 M=0.114\
TC=8.3E-06
8 SH=B T=0.85,0.85,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.12 M=0.114\
TC=8.3E-06
9 SH=B T=0.85,0.85,0.0444,0.0444 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=1.12 M=0.114\
TC=8.3E-06
10 SH=B T=0.80,0.80,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.91 M=0.092\
TC=8.3E-06
11 SH=B T=0.80,0.80,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.91 M=0.092\
TC=8.3E-06
12 SH=B T=0.80,0.80,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.91 M=0.092\
TC=8.3E-06
13 SH=B T=0.75,0.75,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.85 M=0.086\
TC=8.3E-06
14 SH=B T=0.75,0.75,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.85 M=0.086\
TC=8.3E-06
15 SH=B T=0.75,0.75,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.85 M=0.086\
TC=8.3E-06
16 SH=B T=0.75,0.75,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.85 M=0.086\
TC=8.3E-06
17 SH=B T=0.75,0.75,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.85 M=0.086\
TC=8.3E-0618
18 SH=B T=0.75,0.75,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.85 M=0.086\
TC=8.3E-06
19 SH=B T=0.70,0.70,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.79 M=0.080\
TC=8.3E-06
20 SH=B T=0.70,0.70,0.0381,0.0381 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.79 M=0.080\
TC=8.3E-06
C
C PROPIEDADES GEOMETRICAS DE TRABES NIVEL 1-20
C
C PROP GEOM DE LAS TRABES DE LAS CRUJIAS EXTERIORES DEL NIVEL 1-20
C
21 SH=W16X31 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.046 M=0.0046 TC=8.3E-06
22 SH=W16X31 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.046 M=0.0046 TC=8.3E-06
23 SH=W16X31 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.046 M=0.0046 TC=8.3E-06
24 SH=W21X50 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.075 M=0.0076 TC=8.3E-06
25 SH=W18X50 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.075 M=0.0076 TC=8.3E-06
26 SH=W18X50 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.075 M=0.0076 TC=8.3E-06
27 SH=W18X50 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.075 M=0.0076 TC=8.3E-06
28 SH=W18X50 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.075 M=0.0076 TC=8.3E-06
29 SH=W18X50 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.075 M=0.0076 TC=8.3E-06
30 SH=W18X50 E=2.04E+07 G=7.84E+06 W=0.075 M=0.0076 TC=8.3E-06

APÉNDICE C

31	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
32	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
33	SH=W16X36	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.054	M=0.0055	TC=8.3E-06
34	SH=W16X36	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.054	M=0.0055	TC=8.3E-06
35	SH=W16X36	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.054	M=0.0055	TC=8.3E-06
36	SH=W16X36	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.054	M=0.0055	TC=8.3E-06
37	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
38	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
39	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
40	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06

C
C PROP GEOM DE LAS TRABES DE LA CRUJIA CENTRAL DEL NIVEL 1-20

41	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
42	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
43	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
44	SH=W21X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
45	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
46	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
47	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
48	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
49	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
50	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
51	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
52	SH=W18X50	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.075	M=0.0076	TC=8.3E-06
53	SH=W16X36	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.054	M=0.0055	TC=8.3E-06
54	SH=W16X36	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.054	M=0.0055	TC=8.3E-06
55	SH=W16X36	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.054	M=0.0055	TC=8.3E-06
56	SH=W16X36	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.054	M=0.0055	TC=8.3E-06
57	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
58	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
59	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06
60	SH=W16X31	E=2.04E+07	G=7.84E+06	W=0.046	M=0.0046	TC=8.3E-06

C
C PROPIEDADES GEOMETRICAS DE DIAGONALES NIVEL 1-20

61	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
62	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
63	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
64	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
65	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
66	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
67	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
68	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
69	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
70	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
71	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
72	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
73	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
74	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
75	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
76	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
77	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
78	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
79	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
80	A=0.048774	J=0	I=0,0	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0

C
C PROPIEDADES GEOMETRICAS DE LOS DISPOSITIVOS TADAS NIVEL 1-20

81	A=0	J=0	I=0.00009034/2	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
82	A=0	J=0	I=0.00002928	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
83	A=0	J=0	I=0.00001556/2	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
84	A=0	J=0	I=0.00000813	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
85	A=0	J=0	I=0.00000740/2	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
86	A=0	J=0	I=0.00000845	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
87	A=0	J=0	I=0.00000845/2	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0
88	A=0	J=0	I=0.00000845	AS=0,0	E=2.04E+07	G=0	W=0	M=0

89 A=0 J=0 I=0.00000845/2 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 90 A=0 J=0 I=0.00000740 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 91 A=0 J=0 I=0.00000634/2 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 92 A=0 J=0 I=0.00000634 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 93 A=0 J=0 I=0.00000805/2 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 94 A=0 J=0 I=0.00000805 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 95 A=0 J=0 I=0.00000538/2 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 96 A=0 J=0 I=0.00000614 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 97 A=0 J=0 I=0.00000414/2 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 98 A=0 J=0 I=0.00000261 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 99 A=0 J=0 I=0.00000224/? AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0
 100 A=0 J=0 I=0.00000149 AS=0,0 E=2.04E+07 G=0 W=0 M=0

C
 C 3 CONDICIONES DE CARGA ESTÁTICA VERTICAL
 C 6 MODELOS DE CARGA [CM=COND 1 Modelo=1 Y 2, CVmax=COND 2 Modelo=3 Y 4
 C CVins=COND 3 Modelo=5 Y 6]
 C 1 TRAP CARGA MUERTA NIVELES 1-19
 C 3 TRAP CARGA VIVA MÁXIMA NIVELES 1-19
 C 5 TRAP CARGA VIVA INSTANTÁNEA NIVELES 1-19
 C 2 TRAP CARGA MUERTA NIVEL 20
 C 4 TRAP CARGA VIVA MÁXIMA NIVEL 20
 C 6 TRAP CARGA VIVA INSTANTÁNEA NIVEL 20

C
 1 TRAP=0,0,0,-0.5,-1.2065,0,-1
 2 TRAP=0,0,0,-0.5,-1.1366,0,-1
 3 TRAP=0,0,0,-0.5,-0.4371,0,-1
 4 TRAP=0,0,0,-0.5,-0.1749,0,-1
 5 TRAP=0,0,0,-0.5,-0.3147,0,-1
 6 TRAP=0,0,0,-0.5,-0.1224,0,-1

C
 C LOCALIZACIÓN DE COLUMNAS POR NIVEL 1-20
 C

1	1	8	M=1,1,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
5	8	15	M=2,2,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
9	15	22	M=3,3,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
13	22	29	M=4,4,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
17	29	36	M=5,5,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
21	36	43	M=6,6,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
25	43	50	M=7,7,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
29	50	57	M=8,8,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
33	57	64	M=9,9,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
37	64	71	M=10,10,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
41	71	78	M=11,11,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
45	78	85	M=12,12,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
49	85	92	M=13,13,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
53	92	99	M=14,14,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
57	99	106	M=15,15,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
61	106	113	M=16,16,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
65	113	120	M=17,17,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
69	120	127	M=18,18,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
73	127	134	M=19,19,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0
77	134	141	M=20,20,1 LP=-2,0 RE=0,0 RZ=0.0 MS= 0,0 G=3,1,2,2,0,0

C
 C LOCALIZACIÓN DE TRABES POR NIVEL 1-20
 C POR CADA NIVEL PRIMERO SE UBICAN LAS TRABES DE LAS CRUJIAS EXTREMAS Y
 C DESPUES LAS TRABES DE LA CRUJIA CENTRAL

C NIVEL 1
 81 8 9 M=21,21,1 LP=-2,0 RE=0.45,0.476 RZ=0.194 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,C,0
 82 9 10 M=21,21,1 LP=-2,0 RE=0.476,0.45 RZ=0.194 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,C,0
 83 10 11 M=41,41,1 LP=-2,0 RE=0.45,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
 84 11 12 M=41,41,1 LP=-2,0 RE=0,0.45 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
 C NIVEL 2
 87 15 16 M=22,22,1 LP=-2,0 RE=0.45,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
 88 16 17 M=22,22,1 LP=-2,0 RE=0,0.45 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
 89 17 18 M=42,42,1 LP=-2,0 RE=0.45,0.444 RZ=0.201 MS= 0,0 NSL=1,3,5
 90 18 19 M=42,42,1 LP=-2,0 RE=0.444,0.45 RZ=0.201 MS= 0,0 NSL=1,3,5
 C NIVEL 3

APÉNDICE C

93	22	23	M=23,23,1 LP=-2,0 RE=0.45,0.142 RZ=0.304 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
94	23	24	M=23,23,1 LP=-2,0 RE=0.142,0.45 RZ=0.304 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
95	24	25	M=43,43,1 LP=-2,0 RE=0.45,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
96	25	26	M=43,43,1 LP=-2,0 RE=0,0.45 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 4		
99	29	30	M=24,24,1 LP=-2,0 RE=0.425,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
100	30	31	M=24,24,1 LP=-2,0 RE=0,0.425 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
101	31	32	M=44,44,1 LP=-2,0 RE=0.425,0.222 RZ=0.262 MS= 0,0 NSL=1,3,5
102	32	33	M=44,44,1 LP=-2,0 RE=0.222,0.425 RZ=0.262 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 5		
105	36	37	M=25,25,1 LP=-2,0 RE=0.425,0.088 RZ=0.331 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
106	37	38	M=25,25,1 LP=-2,0 RE=0.088,0.425 RZ=0.331 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
107	38	39	M=45,45,1 LP=-2,0 RE=0.425,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
108	39	40	M=45,45,1 LP=-2,0 RE=0,0.425 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 6		
111	43	44	M=26,26,1 LP=-2,0 RE=0.425,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
112	44	45	M=26,26,1 LP=-2,0 RE=0,0.425 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
113	45	46	M=46,46,1 LP=-2,0 RE=0.425,0.203 RZ=0.270 MS= 0,0 NSL=1,3,5
114	46	47	M=46,46,1 LP=-2,0 RE=0.203,0.425 RZ=0.270 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 7		
117	50	51	M=27,27,1 LP=-2,0 RE=0.425,0.101 RZ=0.323 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
118	51	52	M=27,27,1 LP=-2,0 RE=0.101,0.425 RZ=0.323 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
119	52	53	M=47,47,1 LP=-2,0 RE=0.425,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
120	53	54	M=47,47,1 LP=-2,0 RE=0,0.425 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 8		
123	57	58	M=28,28,1 LP=-2,0 RE=0.425,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
124	58	59	M=28,28,1 LP=-2,0 RE=0,0.425 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
125	59	60	M=48,48,1 LP=-2,0 RE=0.425,0.203 RZ=0.270 MS= 0,0 NSL=1,3,5
126	60	61	M=48,48,1 LP=-2,0 RE=0.203,0.425 RZ=0.270 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 9		
129	64	65	M=29,29,1 LP=-2,0 RE=0.425,0.101 RZ=0.323 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
130	65	66	M=29,29,1 LP=-2,0 RE=0.101,0.425 RZ=0.323 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
131	66	67	M=49,49,1 LP=-2,0 RE=0.425,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
132	67	68	M=49,49,1 LP=-2,0 RE=0,0.425 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 10		
135	71	72	M=30,30,1 LP=-2,0 RE=0.40,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
136	72	73	M=30,30,1 LP=-2,0 RE=0,0.40 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
137	73	74	M=50,50,1 LP=-2,0 RE=0.40,0.177 RZ=0.277 MS= 0,0 NSL=1,3,5
138	74	75	M=50,50,1 LP=-2,0 RE=0.177,0.40 RZ=0.277 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 11		
141	78	79	M=31,31,1 LP=-2,0 RE=0.40,0.076 RZ=0.336 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
142	79	80	M=31,31,1 LP=-2,0 RE=0.076,0.40 RZ=0.336 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
143	80	81	M=51,51,1 LP=-2,0 RE=0.40,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
144	81	82	M=51,51,1 LP=-2,0 RE=0,0.40 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 12		
147	85	86	M=32,32,1 LP=-2,0 RE=0.40,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
148	86	87	M=32,32,1 LP=-2,0 RE=0,0.40 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
149	87	88	M=52,52,1 LP=-2,0 RE=0.40,0.152 RZ=0.289 MS= 0,0 NSL=1,3,5
150	88	89	M=52,52,1 LP=-2,0 RE=0.152,0.40 RZ=0.289 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 13		
153	92	93	M=33,33,1 LP=-2,0 RE=0.375,0.088 RZ=0.323 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
154	93	94	M=33,33,1 LP=-2,0 RE=0.088,0.375 RZ=0.323 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
155	94	95	M=53,53,1 LP=-2,0 RE=0.375,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
156	95	96	M=53,53,1 LP=-2,0 RE=0,0.375 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 14		
159	99	100	M=34,34,1 LP=-2,0 RE=0.375,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
160	100	101	M=34,34,1 LP=-2,0 RE=0,0.375 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
161	101	102	M=54,54,1 LP=-2,0 RE=0.375,0.177 RZ=0.271 MS= 0,0 NSL=1,3,5
162	102	103	M=54,54,1 LP=-2,0 RE=0.177,0.375 RZ=0.271 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 15		
165	106	107	M=35,35,1 LP=-2,0 RE=0.375,0.077 RZ=0.331 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
166	107	108	M=35,35,1 LP=-2,0 RE=0.077,0.375 RZ=0.331 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
167	108	109	M=55,55,1 LP=-2,0 RE=0.375,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
168	109	110	M=55,55,1 LP=-2,0 RE=0,0.375 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5
C	NIVEL 16		
171	113	114	M=36,36,1 LP=-2,0 RE=0.375,0 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
172	114	115	M=36,36,1 LP=-2,0 RE=0,0.375 RZ=0.4 MS= 0,0 NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0

173	115	116	M=56,56,1	LP=-2,0	RE=0.375,0.177	RZ=0.271	MS= 0,0	NSL=1,3,5
174	116	117	M=56,56,1	LP=-2,0	RE=0.177,0.375	RZ=0.271	MS= 0,0	NSL=1,3,5
C NIVEL 17								
177	120	121	M=37,37,1	LP=-2,0	RE=0.375,0.077	RZ=0.331	MS= 0,0	NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
178	121	122	M=37,37,1	LP=-2,0	RE=0.077,0.375	RZ=0.331	MS= 0,0	NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
179	122	123	M=57,57,1	LP=-2,0	RE=0.375,0	RZ=0.4	MS= 0,0	NSL=1,3,5
180	123	124	M=57,57,1	LP=-2,0	RE=0,0.375	RZ=0.4	MS= 0,0	NSL=1,3,5
C NIVEL 18								
183	127	128	M=38,38,1	LP=-2,0	RE=0.375,0	RZ=0.4	MS= 0,0	NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
184	128	129	M=38,38,1	LP=-2,0	RE=0,0.375	RZ=0.4	MS= 0,0	NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
185	129	130	M=58,58,1	LP=-2,0	RE=0.375,0.133	RZ=0.295	MS= 0,0	NSL=1,3,5
186	130	131	M=58,58,1	LP=-2,0	RE=0.133,0.375	RZ=0.295	MS= 0,0	NSL=1,3,5
C NIVEL 19								
189	134	135	M=39,39,1	LP=-2,0	RE=0.35,0.057	RZ=0.343	MS= 0,0	NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
190	135	136	M=39,39,1	LP=-2,0	RE=0.057,0.35	RZ=0.343	MS= 0,0	NSL=1,3,5 G=1,4,4,4,0,0
191	136	137	M=59,59,1	LP=-2,0	RE=0.35,0	RZ=0.4	MS= 0,0	NSL=1,3,5
192	137	138	M=59,59,1	LP=-2,0	RE=0,0.35	RZ=0.4	MS= 0,0	NSL=1,3,5
C NIVEL 20								
195	141	142	M=40,40,1	LP=-2,0	RE=0.35,0	RZ=0.4	MS= 0,0	NSL=2,4,6 G=1,4,4,4,0,0
196	142	143	M=40,40,1	LP=-2,0	RE=0,0.35	RZ=0.4	MS= 0,0	NSL=2,4,6 G=1,4,4,4,0,0
197	143	144	M=60,60,1	LP=-2,0	RE=0.35,0.076	RZ=0.328	MS= 0,0	NSL=2,4,6
198	144	145	M=60,60,1	LP=-2,0	RE=0.076,0.35	RZ=0.328	MS= 0,0	NSL=2,4,6

C LOCALIZACION DE DIAGONALES POR NIVEL 1-20

201	1	148	M=61,61,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
202	3	148	M=61,61,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
203	5	168	M=61,61,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
204	7	168	M=61,61,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
205	10	158	M=62,62,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
206	12	158	M=62,62,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
207	15	149	M=63,63,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
208	17	149	M=63,63,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
209	19	169	M=63,63,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
210	21	169	M=63,63,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
211	24	159	M=64,64,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
212	26	159	M=64,64,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
213	29	150	M=65,65,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
214	31	150	M=65,65,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
215	33	170	M=65,65,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
216	35	170	M=65,65,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
217	38	160	M=66,66,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
218	40	160	M=66,66,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
219	43	151	M=67,67,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
220	45	151	M=67,67,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
221	47	171	M=67,67,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
222	49	171	M=67,67,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
223	52	161	M=68,68,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
224	54	161	M=68,68,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
225	57	152	M=69,69,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
226	59	152	M=69,69,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
227	61	172	M=69,69,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
228	63	172	M=69,69,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
229	66	162	M=70,70,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
230	68	162	M=70,70,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
231	71	153	M=71,71,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
232	73	153	M=71,71,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
233	75	173	M=71,71,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
234	77	173	M=71,71,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
235	80	163	M=72,72,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
236	82	163	M=72,72,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
237	85	154	M=73,73,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
238	87	154	M=73,73,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
239	89	174	M=73,73,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
240	91	174	M=73,73,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
241	94	164	M=74,74,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
242	96	164	M=74,74,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0

APÉNDICE C

243	99	155	M=75,75,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
244	101	155	M=75,75,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
245	103	175	M=75,75,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
246	105	175	M=75,75,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
247	108	165	M=76,76,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
248	110	165	M=76,76,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
249	113	156	M=77,77,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
250	115	156	M=77,77,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
251	117	176	M=77,77,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
252	119	176	M=77,77,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
253	122	166	M=78,78,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
254	124	166	M=78,78,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
255	127	157	M=79,79,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
256	129	157	M=79,79,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
257	131	177	M=79,79,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
258	133	177	M=79,79,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
259	136	167	M=80,80,1	LP=-2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0
260	138	167	M=80,80,1	LP=2,0	LR=1,1,0,0,0,0	RE=0,0	RZ=0	MS= 0,0

C LOCALIZACION DE LOS DISPOSITIVOS TADAS POR NIVEL 1-20

261	148	9	M=81,81,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
262	168	13	M=81,81,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
263	158	18	M=82,82,1	LP=-2,0	LR=1,C,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
264	149	23	M=83,83,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
265	169	27	M=83,83,1	LP=-2,0	LR=1,C,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
266	159	32	M=84,84,1	LP=-2,0	LR=1,C,1,0,0,0	RE=0,0.26	MS= 0,0
267	150	37	M=85,85,1	LP=-2,0	LR=1,C,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
268	170	41	M=85,85,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
269	160	46	M=86,86,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
270	151	51	M=87,87,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
271	171	55	M=87,87,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
272	161	60	M=88,88,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
273	152	65	M=89,89,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
274	172	69	M=89,89,1	LP=-2,0	LR=1,C,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
275	162	74	M=90,90,1	LP=-2,0	LR=1,C,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
276	153	79	M=91,91,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
277	173	83	M=91,91,1	LP=-2,0	LR=1,C,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
278	163	88	M=92,92,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.22	MS= 0,0
279	154	93	M=93,93,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
280	174	97	M=93,93,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
281	164	102	M=94,94,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
282	155	107	M=95,95,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
283	175	111	M=95,95,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
284	165	116	M=96,96,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
285	156	121	M=97,97,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
286	176	125	M=97,97,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
287	166	130	M=98,98,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
288	157	135	M=99,99,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
289	177	139	M=99,99,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0
290	167	144	M=100,100,1	LP=-2,0	LR=1,0,1,0,0,0	RE=0,0.20	MS= 0,0

RESTRAINTS

1	7	2	R=1,1,1,1,1,1
8	147	1	R=0,1,0,1,0,1

CONSTRAINTS

9	142	7	C=8,0,0,0,0,0 I=7,0,0,0,0,0
10	143	7	C=8,0,0,0,0,0 I=7,0,0,0,0,0
11	144	7	C=8,0,0,0,0,0 I=7,0,0,0,0,0
12	145	7	C=8,0,0,0,0,0 I=7,0,0,0,0,0
13	146	7	C=8,0,0,0,0,0 I=7,0,0,0,0,0
14	147	7	C=8,0,0,0,0,0 I=7,0,0,0,0,0

LOADS

C
C CARGAS PUNTUALES

C CONDICION DE CARGA ESTATICA 2 CARGA MUERTA + CARGA VIVA MAXIMA
C (PROVENIENTE DE TRABES SECUNDARIAS)

9	135	7	L=2 F=0,0,-4.5,0,0,0
11	137	7	L=2 F=0,0,-3.6,0,0,0
13	139	7	L=2 F=0,0,-4.5,0,0,0
142	146	4	L=2 F=0,0,-3.6,0,0,0
144	144	1	L=2 F=0,0,-3.0,0,0,0

C
C CARGAS PUNTOALES

C CONDICION DE CARGA ESTATICA 3 CARGA MUERTA + CARGA VIVA INSTANTANEA
C (PROVENIENTE DE TRABES SECUNDARIAS)

9	135	7	L=3 F=0,0,-4.2,0,0,0
11	137	7	L=3 F=0,0,-3.4,0,0,0
13	139	7	L=3 F=0,0,-4.2,0,0,0
142	146	4	L=3 F=0,0,-3.5,0,0,0
144	144	1	L=3 F=0,0,-2.8,0,0,0

C
C CONDICION DE CARGA 4 SISMO ESTATICO (FUERZAS LATERALES PROVENIENTES
C DEL ANALISIS DINAMICO MODAL)

8	8	1	L=4 F=2.262,0,0,0,0,0
15	15	1	L=4 F=6.190,0,0,0,0,0
22	22	1	L=4 F=10.807,0,0,0,0,0
29	29	1	L=4 F=15.604,0,0,0,0,0
36	36	1	L=4 F=20.037,0,0,0,0,0
43	43	1	L=4 F=24.257,0,0,0,0,0
50	50	1	L=4 F=28.245,0,0,0,0,0
57	57	1	L=4 F=31.951,0,0,0,0,0
64	64	1	L=4 F=35.305,0,0,0,0,0
71	71	1	L=4 F=38.408,0,0,0,0,0
78	78	1	L=4 F=41.806,0,0,0,0,0
85	85	1	L=4 F=45.149,0,0,0,0,0
92	92	1	L=4 F=48.451,0,0,0,0,0
99	99	1	L=4 F=52.758,0,0,0,0,0
106	106	1	L=4 F=57.404,0,0,0,0,0
113	113	1	L=4 F=62.956,0,0,0,0,0
120	120	1	L=4 F=68.735,0,0,0,0,0
127	127	1	L=4 F=75.003,0,0,0,0,0
134	134	1	L=4 F=81.329,0,0,0,0,0
141	141	1	L=4 F=73.060,0,0,0,0,0

:Vo=Suma de Fuerzas=819.717 Ton

MASSES

8	8	1	M=10.009,0,0,0,0,0
15	15	1	M=10.008,0,0,0,0,0
22	22	1	M=10.006,0,0,0,0,0
29	29	1	M=10.066,0,0,0,0,0
36	36	1	M=10.066,0,0,0,0,0
43	43	1	M=10.066,0,0,0,0,0
50	50	1	M=10.066,0,0,0,0,0
57	57	1	M=10.066,0,0,0,0,0
64	64	1	M=10.069,0,0,0,0,0
71	71	1	M=10.073,0,0,0,0,0
78	78	1	M=10.073,0,0,0,0,0
85	85	1	M=10.073,0,0,0,0,0
92	92	1	M=10.028,0,0,0,0,0
99	99	1	M=10.028,0,0,0,0,0
106	106	1	M=10.028,0,0,0,0,0
113	113	1	M=10.028,0,0,0,0,0
120	120	1	M=10.012,0,0,0,0,0
127	127	1	M=10.011,0,0,0,0,0
134	134	1	M=10.009,0,0,0,0,0
141	141	1	M=8.320,0,0,0,0,0

SPEC

A=0 S=9.81 D=0.05 C=0

APÉNDICE C

0,	0.1,	0,	0
0.6,	0.5,	0,	0
3.9,	0.5,	0,	0

COMBO

1	C=1.4,1.4,0,0	D=0	:CM + CVmax
2	C=1.1,0,1.1,0	D=0	:CM + CVins
3	C=0,0,0,0	D=1	:DINAMICO
4	C=0,0,0,1	D=0	:ESTATICO
5	C=1.1,0,1.1,1.1	D=0	:CM + CVins + ESTATICO

**ARCHIVO DE DATOS DEL MARCO CON DISIPADORES TADAS DOBLE PARA EL ANÁLISIS
INELÁSTICO CON EL PROGRAMA DRAIN 2D**

START MARCO DE 20 NIVELES CON DISIPADORES TADAS DOBLE

144	144	0	1	20	20	8	0
1	0.	6050.					
2	700.	6050.					
3	1050.	6050.					
4	1400.	6050.					
5	2100.	6050.					
6	1050.	5995.					
7	0.	5750.					
8	350.	5750.					
9	700.	5750.					
10	1400.	5750.					
11	1750.	5750.					
12	2100.	5750.					
13	350.	5695.					
14	1750.	5695.					
15	0.	5450.					
16	700.	5450.					
17	1050.	5450.					
18	1400.	5450.					
19	2100.	5450.					
20	1050.	5395.					
21	0.	5150.					
22	350.	5150.					
23	700.	5150.					
24	1400.	5150.					
25	1750.	5150.					
26	2100.	5150.					
27	350.	5095.					
28	1750.	5095.					
29	0.	4850.					
30	700.	4850.					
31	1050.	4850.					
32	1400.	4850.					
33	2100.	4850.					
34	1050.	4795.					
35	0.	4550.					
36	350.	4550.					
37	700.	4550.					
38	1400.	4550.					
39	1750.	4550.					
40	2100.	4550.					
41	350.	4495.					
42	1750.	4495.					
43	0.	4250.					
44	700.	4250.					
45	1050.	4250.					
46	1400.	4250.					
47	2100.	4250.					
48	1050.	4195.					
49	0.	3950.					
50	350.	3950.					

51	700.	3950.
52	1400.	3950.
53	1750.	3950.
54	2100.	3950.
55	350.	3895.
56	1750.	3895.
57	0.	3650.
58	700.	3650.
59	1050.	3650.
60	1400.	3650.
61	2100.	3650.
62	1050.	3595.
63	0.	3350.
64	350.	3350.
65	700.	3350.
66	1400.	3350.
67	1750.	3350.
68	2100.	3350.
69	350.	3295.
70	1750.	3295.
71	0.	3050.
72	700.	3050.
73	1050.	3050.
74	1400.	3050.
75	2100.	3050.
76	1050.	2995.
77	0.	2750.
78	350.	2750.
79	700.	2750.
80	1400.	2750.
81	1750.	2750.
82	2100.	2750.
83	350.	2695.
84	1750.	2695.
85	0.	2450.
86	700.	2450.
87	1050.	2450.
88	1400.	2450.
89	2100.	2450.
90	1050.	2395.
91	0.	2150.
92	350.	2150.
93	700.	2150.
94	1400.	2150.
95	1750.	2150.
96	2100.	2150.
97	350.	2095.
98	1750.	2095.
99	0.	1850.
100	700.	1850.
101	1050.	1850.
102	1400.	1850.
103	2100.	1850.
104	1050.	1795.
105	0.	1550.
106	350.	1550.
107	700.	1550.
108	1400.	1550.
109	1750.	1550.
110	2100.	1550.
111	350.	1495.
112	1750.	1495.
113	0.	1250.
114	700.	1250.
115	1050.	1250.
116	1400.	1250.
117	2100.	1250.

APÉNDICE C

118	1050.	1195.						
119	0.	950.						
120	350.	950.						
121	700.	950.						
122	1400.	950.						
123	1750.	950.						
124	2100.	950.						
125	350.	895.						
126	1750.	895.						
127	0.	650.						
128	700.	650.						
129	1050.	650.						
130	1400.	650.						
131	2100.	650.						
132	1050.	595.						
133	0.	350.						
134	350.	350.						
135	700.	350.						
136	1400.	350.						
137	1750.	350.						
138	2100.	350.						
139	350.	295.						
140	1750.	295.						
141	0.	0.						
142	700.	0.						
143	1400.	0.						
144	2100.	0.						
141	1	1	1	144	1			
1	5	1	2	3	4	5		
1	6	7	8	9	10	11	12	
1	5	15	16	17	18	19		
1	6	21	22	23	24	25	26	
1	5	29	30	31	32	33		
1	6	35	36	37	38	39	40	
1	5	43	44	45	46	47		
1	6	49	50	51	52	53	54	
1	5	57	58	59	60	61		
1	6	63	64	65	66	67	68	
1	5	71	72	73	74	75		
1	6	77	78	79	80	81	82	
1	5	85	86	87	88	89		
1	6	91	92	93	94	95	96	
1	5	99	100	101	102	103		
1	6	105	106	107	108	109	110	
1	5	113	114	115	116	117		
1	6	119	120	121	122	123	124	
1	5	127	128	129	130	131		
1	6	133	134	135	136	137	138	
1	87.2684		0.		0.			
7	108.5459		0.		0.			
15	108.9059		0.		0.			
21	109.2659		0.		0.			
29	109.6034		0.		0.			
35	109.6034		0.		0.			
43	109.6034		0.		0.			
49	109.6034		0.		0.			
57	110.8459		0.		0.			
63	111.2059		0.		0.			
71	111.2059		0.		0.			
77	112.4659		0.		0.			
85	113.7259		0.		0.			
91	113.7259		0.		0.			
99	113.7259		0.		0.			
105	113.7259		0.		0.			
113	113.7259		0.		0.			
119	112.9259		0.		0.			
127	113.3459		0.		0.			

981.

133	114.5359	0.	0.		
1	82 3696	0.01	1.	5	1.
1	0	-4.835	0	4	4
2	0	-11.495	0	4	2
7	0	-5.732	0	12	5
9	0	-13.714	0	10	1
7	0	-2.607	0	9	2
10	0	-2.607	0	12	2
15	0	-5.720	0	19	4
16	0	-13.696	0	18	2
15	0	-2.607	0	16	1
18	0	-2.607	0	19	1
21	0	-5.715	0	26	5
23	0	-13.688	0	24	1
21	0	-2.805	0	23	2
24	0	-2.805	0	26	2
29	0	-5.791	0	33	4
30	0	-13.867	0	32	2
29	0	-2.805	0	30	1
32	0	-2.805	0	33	1
35	0	-5.778	0	40	5
37	0	-13.843	0	38	1
35	0	-2.805	0	37	2
38	0	-2.805	0	40	2
43	0	-5.762	0	47	4
44	0	-13.813	0	46	2
43	0	-2.805	0	44	1
46	0	-2.805	0	47	1
49	0	-5.744	0	54	5
51	0	-13.779	0	52	1
49	0	-2.805	0	51	2
52	0	-2.805	0	54	2
57	0	-6.032	0	61	4
58	0	-14.422	0	60	2
57	0	-2.805	0	58	1
60	0	-2.805	0	61	1
63	0	-5.996	0	68	5
65	0	-14.353	0	66	1
63	0	-3.003	0	65	2
66	0	-3.003	0	68	2
71	0	-5.952	0	75	4
72	0	-14.268	0	74	2
71	0	-3.003	0	72	1
74	0	-3.003	0	75	1
77	0	-5.901	0	82	5
79	0	-14.177	0	80	1
77	0	-3.003	0	79	2
80	0	-3.003	0	82	2
85	0	-5.860	0	89	4
86	0	-14.101	0	88	2
85	0	-3.696	0	86	1
88	0	-3.696	0	89	1
91	0	-5.813	0	96	5
93	0	-14.010	0	94	1
91	0	-3.696	0	93	2
94	0	-3.696	0	96	2
99	0	-5.762	0	103	4
100	0	-13.914	0	102	2
99	0	-3.696	0	100	1
102	0	-3.696	0	103	1
105	0	-5.708	0	110	5
107	0	-13.811	0	108	1
105	0	-3.696	0	107	2
108	0	-3.696	0	110	2
113	0	-5.702	0	117	4
114	0	-13.840	0	116	2
113	0	-3.696	0	114	1

APÉNDICE C

116	0	-3.696	0	117	1
119	0	-5.407	0	124	5
121	0	-13.137	0	122	1
119	0	-3.696	0	121	2
122	0	-3.696	0	124	2
127	0	-5.376	0	131	4
128	0	-13.082	0	130	2
127	0	-3.927	0	128	1
130	0	-3.927	0	131	1
133	0	-5.343	0	138	5
135	0	-13.019	0	136	1
133	0	-3.927	0	135	2
136	0	-3.927	0	138	2
3	0	-3.0	0		0
8	0	-4.6	0	134	14
17	0	-3.7	0	129	14
11	0	-4.6	0	137	14

1849 0 1 1 SISMO DE S.C.T. E-W Amax=168 GALS
 0.2350435 0.0083499

1	60	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2.04e+03		0.050	4.88e+02	2.530	2.530					
1	9	6	0	1	1	0					
2	6	10	0	1	1	0					
3	15	13	0	1	1	0					
4	13	16	0	1	1	0					
5	18	14	0	1	1	0					
6	14	19	0	1	1	0					
7	23	20	0	1	1	0					
8	20	24	0	1	1	0					
9	29	27	0	1	1	0					
10	27	30	0	1	1	0					
11	32	28	0	1	1	0					
12	28	33	0	1	1	0					
13	37	34	0	1	1	0					
14	34	38	0	1	1	0					
15	43	41	0	1	1	0					
16	41	44	0	1	1	0					
17	46	42	0	1	1	0					
18	42	47	0	1	1	0					
19	51	48	0	1	1	0					
20	48	52	0	1	1	0					
21	57	55	0	1	1	0					
22	55	58	0	1	1	0					
23	60	56	0	1	1	0					
24	56	61	0	1	1	0					
25	65	62	0	1	1	0					
26	62	66	0	1	1	0					
27	71	69	0	1	1	0					
28	69	72	0	1	1	0					
29	74	70	0	1	1	0					
30	70	75	0	1	1	0					
31	79	76	0	1	1	0					
32	76	80	0	1	1	0					
33	85	83	0	1	1	0					
34	83	86	0	1	1	0					
35	88	84	0	1	1	0					
36	84	89	0	1	1	0					
37	93	90	0	1	1	0					
38	90	94	0	1	1	0					
39	99	97	0	1	1	0					
40	97	100	0	1	1	0					
41	102	98	0	1	1	0					
42	98	103	0	1	1	0					
43	107	104	0	1	1	0					
44	104	108	0	1	1	0					
45	113	111	0	1	1	0					

46	111	114	0	1	1	0			
47	116	112	0	1	1	0			
48	112	117	0	1	1	0			
49	121	118	0	1	1	0			
50	118	122	0	1	1	0			
51	127	125	0	1	1	0			
52	125	128	0	1	1	0			
53	130	126	0	1	1	0			
54	126	131	0	1	1	0			
55	135	132	0	1	1	0			
56	132	136	0	1	1	0			
57	141	139	0	1	1	0			
58	139	142	0	1	1	0			
59	143	140	0	1	1	0			
60	140	144	0	1	1	0			
5	30	20	20	20	0	0			
1	2.04e+03		0.05		0.	1.4e+02	3	0	0
2	2.04e+03		0.05		0.	1.1e+02	3	0	0
3	2.04e+03		0.05		0.	2.6e+02	3	0	0
4	2.04e+03		0.05		0.	2.1e+02	3	0	0
5	2.04e+03		0.05		0.	6.1e+02	3	0	0
6	2.04e+03		0.05		0.	2.7e+02	3	0	0
7	2.04e+03		0.05		0.	8.0e+02	3	0	0
8	2.04e+03		0.05		0.	4.0e+02	3	0	0
9	2.04e+03		0.05		0.	6.3e+02	3	0	0
10	2.04e+03		0.05		0.	3.1e+02	3	0	0
11	2.04e+03		0.05		0.	7.4e+02	3	0	0
12	2.04e+03		0.05		0.	4.2e+02	3	0	0
13	2.04e+03		0.05		0.	8.4e+02	3	0	0
14	2.04e+03		0.05		0.	4.2e+02	3	0	0
15	2.04e+03		0.05		0.	8.4e+02	3	0	0
16	2.04e+03		0.05		0.	3.7e+02	3	0	0
17	2.04e+03		0.05		0.	8.1e+02	3	0	0
18	2.04e+03		0.05		0.	7.8e+02	3	0	0
19	2.04e+03		0.05		0.	2.92e+03	3	0	0
20	2.04e+03		0.05		0.	4.52e+03	3	0	0
1		0		0	-20.3		0		
2		0		0	-20.3		0		
3		0		0	-20.3		0		
4		0		0	-20.3		0		
5		0		0	-20.3		0		
6		0		0	-20.3		0		
7		0		0	-20.3		0		
8		0		0	-20.3		0		
9		0		0	-22.9		0		
10		0		0	-22.9		0		
11		0		0	-22.9		0		
12		0		0	-22.9		0		
13		0		0	-22.9		0		
14		0		0	-22.9		0		
15		0		0	-22.9		0		
16		0		0	-22.9		0		
17		0		0	-26.4		0		
18		0		0	-20.3		0		
19		0		0	-20.3		0		
20		0		0	-20.3		0		
1	1	2.61e+02	-2.61e+02						
2	1	1.96e+02	-1.96e+02						
3	1	4.57e+02	-4.57e+02						
4	1	3.10e+02	-3.10e+02						
5	1	9.22e+02	-9.22e+02						
6	1	4.03e+02	-4.03e+02						
7	1	10.57e+02	-10.57e+02						
8	1	5.28e+02	-5.28e+02						
9	1	9.69e+02	-9.69e+02						
10	1	4.84e+02	-4.84e+02						
11	1	11.30e+02	-11.30e+02						

APÉNDICE C

27	53	54	0	6	13	6	6	1	0	18	1		
5	13	3	7	3	9								
1	2.04e+03		0.05	9.48e+01	3.329e+04				4	4	2	4.12e+01	0.30
2	2.04e+03		0.05	9.48e+01	3.329e+04				4	4	2	4.12e+01	0.30
3	2.04e+03		0.05	9.48e+01	3.329e+04				4	4	2	4.12e+01	0.30
1	24.		-24.										
2	28.4		-10.8										
3	10.8		-28.4										
4	26.6		-5.										
5	5.		-26.6										
6	28.9		-12.8										
7	12.8		-28.9										
1	1	33.16e+02	-33.16e+02										
2	1	33.16e+02	-33.16e+02										
3	1	33.16e+02	-33.16e+02										
1	0	0	5.5148	7.983e+02				0	5.5148	-7.983e+02			
2	0	0	5.0648	7.193e+02				0	5.0648	-7.193e+02			
3	0	0	5.5148	7.983e+02				0	5.5148	-7.983e+02			
4	0	0	3.2148	3.963e+02				0	0	1.661e+02			
5	0	0	0	-1.661e+02				0	3.2148	-3.963e+02			
6	0	0	3.2148	3.963e+02				0	0	1.661e+02			
7	0	0	0	-1.661e+02				0	3.2148	-3.963e+02			
8	0	0	3.2148	3.963e+02				0	0	1.661e+02			
9	0	0	0	-1.661e+02				0	3.2148	-3.963e+02			
1	57	58	0	1	1	1	1	0	1	1			
2	58	59	0	1	2	1	1	0	4	1			
3	59	60	0	1	3	1	1	0	5	1			
4	60	61	0	1	1	1	1	0	1	1			
5	63	64	0	2	4	2	2	0	6	1			
6	64	65	0	2	5	2	2	0	7	1			
7	65	66	0	2	1	2	2	0	2	1			
8	66	67	0	2	4	2	2	0	6	1			
9	67	68	0	2	5	2	2	0	7	1			
10	71	72	0	3	1	3	3	0	3	1			
11	72	73	0	3	4	3	3	0	8	1			
12	73	74	0	3	5	3	3	0	9	1			
13	74	75	0	3	1	3	3	0	3	1			
5	27	6	13	6	18								
1	2.04e+03		0.05	9.48e+01	3.329e+04				4	4	2	4.12e+01	0.30
2	2.04e+03		0.05	9.48e+01	3.329e+04				4	4	2	4.12e+01	0.30
3	2.04e+03		0.05	9.48e+01	3.329e+04				4	4	2	4.12e+01	0.30
4	2.04e+03		0.05	9.48e+01	3.329e+04				4	4	2	4.12e+01	0.30
5	2.04e+03		0.05	9.48e+01	3.329e+04				4	4	2	4.12e+01	0.30
6	2.04e+03		0.05	9.48e+01	4.095e+04				4	4	2	5.11e+01	0.30
1	25.5		-25.5										
2	28.8		-6.8										
3	6.8		-28.8										
4	31.		-14.8										
5	14.8		-31.										
6	28.8		-6.8										
7	6.8		-28.8										
8	31.		-14.8										
9	14.8		-31.										
10	28.4		-5.9										
11	5.9		-28.4										
12	31.4		-16.4										
13	16.4		-31.4										
1	1	33.16e+02	-33.16e+02										
2	1	33.16e+02	-33.16e+02										
3	1	33.16e+02	-33.16e+02										
4	1	33.16e+02	-33.16e+02										
5	1	33.16e+02	-33.16e+02										
6	1	35.26e+02	-35.26e+02										
1	0	0	5.0648	7.193e+02				0	5.0648	-7.193e+02			
2	0	0	5.5148	7.983e+02				0	5.5148	-7.983e+02			
3	0	0	5.0648	7.193e+02				0	5.0648	-7.193e+02			
4	0	0	5.5148	7.983e+02				0	5.5148	-7.983e+02			

5	0	0	5.0648	7.193e+02	0	5.0648-7.193e+02				
6	0	0	5.5148	7.983e+02	0	5.5148-7.983e+02				
7	0	0	3.2148	3.963e+02	0	0 1.661e+02				
8	0	0		0-1.661e+02	0	3.2148-3.963e+02				
9	0	0	3.2148	3.963e+02	0	0 1.661e+02				
10	0	0		0-1.661e+02	0	3.2148-3.963e+02				
11	0	0	3.2148	3.963e+02	0	0 1.661e+02				
12	0	0		0-1.661e+02	0	3.2148-3.963e+02				
13	0	0	3.2148	3.963e+02	0	0 1.661e+02				
14	0	0		0-1.661e+02	0	3.2148-3.963e+02				
15	0	0	3.2148	3.963e+02	0	0 1.661e+02				
16	0	0		0-1.661e+02	0	3.2148-3.963e+02				
17	0	0	3.2148	3.963e+02	0	0 1.661e+02				
18	0	0		0-1.661e+02	0	3.2148-3.963e+02				
1	77	78	0	1 2 1 1	1	0 7 1				
2	78	79	0	1 3 1 1	1	0 8 1				
3	79	80	0	1 1 1 1	1	0 1 1				
4	80	81	0	1 2 1 1	1	0 7 1				
5	81	82	0	1 3 1 1	1	0 8 1				
6	85	86	0	2 1 2 2	1	0 2 1				
7	86	87	0	2 4 2 2	1	0 9 1				
8	87	88	0	2 5 2 2	1	0 10 1				
9	88	89	0	2 1 2 2	1	0 2 1				
10	91	92	0	3 6 3 3	1	0 11 1				
11	92	93	0	3 7 3 3	1	0 12 1				
12	93	94	0	3 1 3 3	1	0 3 1				
13	94	95	0	3 6 3 3	1	0 11 1				
14	95	96	0	3 7 3 3	1	0 12 1				
15	99	100	0	4 1 4 4	1	0 4 1				
16	100	101	0	4 8 4 4	1	0 13 1				
17	101	102	0	4 9 4 4	1	0 14 1				
18	102	103	0	4 1 4 4	1	0 4 1				
19	105	106	0	5 10 5 5	1	0 15 1				
20	106	107	0	5 11 5 5	1	0 16 1				
21	107	108	0	5 1 5 5	1	0 5 1				
22	108	109	0	5 10 5 5	1	0 15 1				
23	109	110	0	5 11 5 5	1	0 16 1				
24	113	114	0	6 1 6 6	1	0 6 1				
25	114	115	0	6 12 6 6	1	0 17 1				
26	115	116	0	6 13 6 6	1	0 18 1				
27	116	117	0	6 1 6 6	1	0 6 1				
5	14	3	7	3 9						
1	2.04e+03		0.05	5.88e+01	1.56e+04	4	4	2	2.82e+01	0.30
2	2.04e+03		0.05	5.88e+01	1.56e+04	4	4	2	2.82e+01	0.30
3	2.04e+03		0.05	5.88e+01	1.56e+04	4	4	2	2.82e+01	0.30
1	27.		-27.							
2	31.3		-9.9							
3	9.9		-31.3							
4	36.		-35.5							
5	35.5		-36.							
6	36.3		-38.4							
7	38.4		-36.3							
1	17.61e+02		-17.61e+02							
2	17.61e+02		-17.61e+02							
3	17.61e+02		-17.61e+02							
1	0	0	4.9559	7.066e+02	0	4.9559-7.066e+02				
2	0	0	5.4059	7.856e+02	0	5.4059-7.856e+02				
3	0	0	4.9559	7.066e+02	0	4.9559-7.066e+02				
4	0	0	3.1059	3.836e+02	0	0 1.597e+02				
5	0	0		0-1.597e+02	0	3.1059-3.836e+02				
6	0	0	3.1059	3.836e+02	0	0 1.597e+02				
7	0	0		0-1.597e+02	0	3.1059-3.836e+02				
8	0	0	3.1059	3.836e+02	0	0 1.597e+02				
9	0	0		0-1.597e+02	0	3.1059-3.836e+02				
1	119	120	0	1 2 1 1	1	0 4 1				
2	120	121	0	1 3 1 1	1	0 5 1				
3	121	122	0	1 1 1 1	1	0 1 1				

APÉNDICE C

4	122	123	0	1	2	1	1	1	0	4	1
5	123	124	0	1	3	1	1	1	0	5	1
6	127	128	0	2	1	2	2	1	0	1	1
7	128	129	0	2	4	2	2	1	0	6	1
8	129	130	0	2	5	2	2	1	0	7	1
9	130	131	0	2	1	2	2	1	0	1	1
10	133	134	0	3	6	3	3	1	0	8	1
11	134	135	0	3	7	3	3	1	0	9	1
12	135	136	0	3	1	3	3	1	0	1	1
13	136	137	0	3	6	3	3	1	0	8	1
14	137	138	0	3	7	3	3	1	0	9	1
2	80	20	1	20	0	0					
1	2.04e+03		0.05	0.101e+04	7.390e+05	4	4	2	5.33e+01	0.30	
2	2.04e+03		0.05	0.101e+04	7.390e+05	4	4	2	5.33e+01	0.30	
3	2.04e+03		0.05	0.108e+04	9.190e+05	4	4	2	5.72e+01	0.30	
4	2.04e+03		0.05	0.108e+04	9.190e+05	4	4	2	5.72e+01	0.30	
5	2.04e+03		0.05	0.108e+04	9.190e+05	4	4	2	5.72e+01	0.30	
6	2.04e+03		0.05	0.108e+04	9.190e+05	4	4	2	5.72e+01	0.30	
7	2.04e+03		0.05	0.108e+04	9.190e+05	4	4	2	5.72e+01	0.30	
8	2.04e+03		0.05	0.108e+04	9.190e+05	4	4	2	5.72e+01	0.30	
9	2.04e+03		0.05	0.116e+04	1.126e+06	4	4	2	6.10e+01	0.30	
10	2.04e+03		0.05	0.116e+04	1.126e+06	4	4	2	6.10e+01	0.30	
11	2.04e+03		0.05	0.116e+04	1.126e+06	4	4	2	6.10e+01	0.30	
12	2.04e+03		0.05	0.143e+04	1.552e+06	4	4	2	7.55e+02	0.30	
13	2.04e+03		0.05	0.143e+04	1.552e+06	4	4	2	7.55e+02	0.30	
14	2.04e+03		0.05	0.143e+04	1.552e+06	4	4	2	7.55e+02	0.30	
15	2.04e+03		0.05	0.143e+04	1.552e+06	4	4	2	7.55e+02	0.30	
16	2.04e+03		0.05	0.143e+04	1.552e+06	4	4	2	7.55e+02	0.30	
17	2.04e+03		0.05	0.143e+04	1.552e+06	4	4	2	7.55e+02	0.30	
18	2.04e+03		0.05	0.152e+04	1.857e+06	4	4	2	7.99e+02	0.30	
19	2.04e+03		0.05	0.152e+04	1.857e+06	4	4	2	7.99e+02	0.30	
20	2.04e+03		0.05	0.152e+04	1.857e+06	4	4	2	7.99e+02	0.30	
1	0.		0.	0.	0.						
1	2 480.6e+02-480.6e+02		2296e+00	-2296e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
2	2 480.6e+02-480.6e+02		2296e+00	-2296e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
3	2 558.0e+02-558.0e+02		2469e+00	-2469e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
4	2 558.0e+02-558.0e+02		2469e+00	-2469e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
5	2 558.0e+02-558.0e+02		2469e+00	-2469e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
6	2 558.0e+02-558.0e+02		2469e+00	-2469e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
7	2 558.0e+02-558.0e+02		2469e+00	-2469e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
8	2 558.0e+02-558.0e+02		2469e+00	-2469e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
9	2 640.8e+02-640.8e+02		2643e+00	-2643e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
10	2 640.8e+02-640.8e+02		2643e+00	-2643e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
11	2 640.8e+02-640.8e+02		2643e+00	-2643e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
12	2 831.6e+02-831.6e+02		3257e+00	-3257e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
13	2 831.6e+02-831.6e+02		3257e+00	-3257e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
14	2 831.6e+02-831.6e+02		3257e+00	-3257e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
15	2 831.6e+02-831.6e+02		3257e+00	-3257e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
16	2 831.6e+02-831.6e+02		3257e+00	-3257e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
17	2 831.6e+02-831.6e+02		3257e+00	-3257e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
18	2 940.5e+02-940.5e+02		3459e+00	-3459e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
19	2 940.5e+02-940.5e+02		3459e+00	-3459e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
20	2 940.5e+02-940.5e+02		3459e+00	-3459e+00	0.5	0.5	0.5	0.5			
1	1 7	0	1	1	1	1	1	0			
2	2 9	0	1	1	1	1	1	0			
3	4 10	0	1	1	1	1	1	0			
4	5 12	0	1	1	1	1	1	0			
5	7 15	0	2	1	2	2	1	0			
6	9 16	0	2	1	2	2	1	0			
7	10 18	0	2	1	2	2	1	0			
8	12 19	0	2	1	2	2	1	0			
9	15 21	0	3	1	3	3	1	0			
10	16 23	0	3	1	3	3	1	0			
11	18 24	0	3	1	3	3	1	0			
12	19 26	0	3	1	3	3	1	0			
13	21 29	0	4	1	4	4	1	0			
14	23 30	0	4	1	4	4	1	0			

15	24	32	0	4	1	4	4	1	0
16	26	33	0	4	1	4	4	1	0
17	29	35	0	5	1	5	5	1	0
18	30	37	0	5	1	5	5	1	0
19	32	38	0	5	1	5	5	1	0
20	33	40	0	5	1	5	5	1	0
21	35	43	0	6	1	6	6	1	0
22	37	44	0	6	1	6	6	1	0
23	38	46	0	6	1	6	6	1	0
24	40	47	0	6	1	6	6	1	0
25	43	49	0	7	1	7	7	1	0
26	44	51	0	7	1	7	7	1	0
27	46	52	0	7	1	7	7	1	0
28	47	54	0	7	1	7	7	1	0
29	49	57	0	8	1	8	8	1	0
30	51	58	0	8	1	8	8	1	0
31	52	60	0	8	1	8	8	1	0
32	54	61	0	8	1	8	8	1	0
33	57	63	0	9	1	9	9	1	0
34	58	65	0	9	1	9	9	1	0
35	60	66	0	9	1	9	9	1	0
36	61	68	0	9	1	9	9	1	0
37	63	71	0	10	1	10	10	1	0
38	65	72	0	10	1	10	10	1	0
39	66	74	0	10	1	10	10	1	0
40	68	75	0	10	1	10	10	1	0
41	71	77	0	11	1	11	11	1	0
42	72	79	0	11	1	11	11	1	0
43	74	80	0	11	1	11	11	1	0
44	75	82	0	11	1	11	11	1	0
45	77	85	0	12	1	12	12	1	0
46	79	86	0	12	1	12	12	1	0
47	80	88	0	12	1	12	12	1	0
48	82	89	0	12	1	12	12	1	0
49	85	91	0	13	1	13	13	1	0
50	86	93	0	13	1	13	13	1	0
51	88	94	0	13	1	13	13	1	0
52	89	96	0	13	1	13	13	1	0
53	91	99	0	14	1	14	14	1	0
54	93	100	0	14	1	14	14	1	0
55	94	102	0	14	1	14	14	1	0
56	96	103	0	14	1	14	14	1	0
57	99	105	0	15	1	15	15	1	0
58	100	107	0	15	1	15	15	1	0
59	102	108	0	15	1	15	15	1	0
60	103	110	0	15	1	15	15	1	0
61	105	113	0	16	1	16	16	1	0
62	107	114	0	16	1	16	16	1	0
63	108	116	0	16	1	16	16	1	0
64	110	117	0	16	1	16	16	1	0
65	113	119	0	17	1	17	17	1	0
66	114	121	0	17	1	17	17	1	0
67	116	122	0	17	1	17	17	1	0
68	117	124	0	17	1	17	17	1	0
69	119	127	0	18	1	18	18	1	0
70	121	128	0	18	1	18	18	1	0
71	122	130	0	18	1	18	18	1	0
72	124	131	0	18	1	18	18	1	0
73	127	133	0	19	1	19	19	1	0
74	128	135	0	19	1	19	19	1	0
75	130	136	0	19	1	19	19	1	0
76	131	138	0	19	1	19	19	1	0
77	133	141	0	20	1	20	20	1	0
78	135	142	0	20	1	20	20	1	0
79	136	143	0	20	1	20	20	1	0
80	138	144	0	20	1	20	20	1	0

STOP