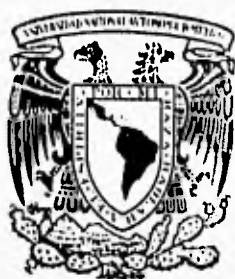


73
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"MODELO MATEMATICO DE UNA
ESTRUCTURA ALTA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

ADOLFO PEÑA GUTIERREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Señor
ADOLFO PEÑA GUTIERREZ
Presente.

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-001/96

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. DAVID MURIA VILA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"MODELO MATEMATICO DE UNA ESTRUCTURA ALTA"

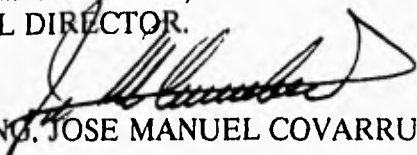
INTRODUCCION

- I. DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA**
- II. MODELADO MATEMATICO DE LA ESTRUCTURA CONSIDERANDO BASE EMPOTRADA**
- III. MODELADO MATEMATICO INCLUYENDO EFECTOS DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA**
- IV. EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE ALGUNOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES**
- V. COMENTARIOS FINALES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 15 de enero de 1996
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*nl

A mis padres por el cariño y apoyo que me han dado.

AGRADECIMIENTOS

A todos mis amigos en CENAPRED por su ayuda.

Al personal del Instituto de Ingeniería por su ayuda y su paciencia.

ÍNDICE

1 Introducción

- 1.1 ¿Por qué el edificio Jal?
- 1.2 Trabajos previos
- 1.3 Objetivo de este trabajo

2 Descripción de la estructura

- 2.1 Estructura
- 2.2 Descripción del daño identificado

3 Modelado matemático de la estructura considerando base empotrada

- 3.1 Programas de análisis
- 3.2 Consideraciones generales para el modelado
- 3.3 Modelado de la estructura en la versión 5.4
- 3.4 Conversión de los modelos a la versión 6.0
- 3.5 Análisis de sensibilidad haciendo uso de la versión 6.0
- 3.6 Elección de los modelos para la siguiente fase

4 Modelado matemático incluyendo efectos de interacción suelo-estructura (ISE)

- 4.1 Introducción
- 4.2 Modelos según el criterio del RCDF-87
- 4.3 Modelos de base flexible con el criterio de Novak
- 4.4 Comentarios

5 Evaluación del comportamiento de algunos elementos estructurales

- 5.1 Introducción
- 5.2 Modelo j4an
- 5.3 Modelo j3an
- 5.4 Modelo j3atacan
- 5.5 Revisión de fuerzas sobre los elementos estructurales

6 Comentarios finales

- 6.1 Modelado matemático
- 6.2 Comportamiento de la estructura

7 Referencias

1 Introducción

1.1 ¿Por qué el edificio Jal?

El edificio Jal es una estructura de 14 niveles de concreto reforzado instrumentada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, con el fin de llevar a cabo una serie de estudios que aportarán información sobre el comportamiento de las estructuras sometidas a sismos intensos en la zona del lago de la ciudad de México. Los criterios de selección que se siguieron para elegir el edificio a estudiar fueron los siguientes:

- Que estuviera localizado en el área de amplificación máxima de ondas sísmicas y máxima destrucción durante los sismos de septiembre de 1985 en la ciudad de México.
- Que tuviera características estructurales tales que se presentaran vibraciones de gran magnitud ante los sismos.
- Que tuviese un sistema estructural relativamente simple y representativo de edificios de la ciudad de México.
- Que existiera una documentación completa sobre su diseño, así como facilidades acceso para instalar y operar los equipos de medición.

1.2 Trabajos previos

En el Instituto de Ingeniería, en colaboración con la Universidad Técnica de Milán, se han desarrollado diversos trabajos sobre esta estructura^{2, 8, 9}. En 1990 se emprendió un proyecto enfocado a aportar información sobre tres fenómenos fundamentales: la amplificación de las ondas sísmicas en el valle de México, la interacción suelo-estructura, y la respuesta estructural de los edificios construidos en las arcillas altamente compresibles de la zona del lago de la ciudad de México.

La actividad principal de este proyecto fue la instrumentación e interpretación de los datos obtenidos, tanto de la superestructura, como de su cimentación y del subsuelo.

Además, se desarrollaron diversos estudios con la información obtenida, estos fueron los siguientes:

- Identificación de las propiedades dinámicas.
- Efectos de sitio.
- Efectos de interacción suelo-estructura (ISE).
- Modelos tridimensionales elásticos e inelásticos.

En el estudio de los modelos tridimensionales del edificio Jal, se hicieron modelos con el programa ETABS 5.4¹ de la estructura en sus condiciones actuales.

1.3 Objetivos de este trabajo

El objetivo de este trabajo es el de desarrollar varios modelos del edificio Jal, para determinar las propiedades dinámicas de la estructura antes y después de los sismos de septiembre de 1985. En estos modelos se hace un análisis de sensibilidad variando diversos parámetros (por ejemplo: la participación de algunos miembros estructurales, módulos de elasticidad, considerar secciones agrietadas en traveses), para evaluar su contribución en el comportamiento del edificio. A estos modelos en los que se pretenden reproducir algunas opciones del comportamiento real de la estructura, se les someterá a un análisis modal espectral utilizando un espectro de respuesta calculado a partir del acelerograma registrado en la estación SCT del 19 de septiembre de 1985 (componente N-S). Con el análisis de estos modelos, se intenta reproducir las propiedades dinámicas de la estructura ante las diferentes condiciones de daño que ha sufrido el edificio.

Para tener una imagen clara del comportamiento de una estructura del tipo del edificio Jal, debe recurrirse a un análisis de sensibilidad para evaluar la contribución de los diversos elementos estructurales. Debido a la disponibilidad de un conjunto limitado de opciones para modelar los elementos estructurales en el programa de análisis matemático, es necesario conocer bien, tanto las opciones de modelado que ofrece el programa, como algunas técnicas para ajustar eficazmente el comportamiento de los elementos estructurales reales al comportamiento idealizado en el programa matemático.

En los capítulos del análisis de sensibilidad y del modelo de interacción suelo-estructura, se aplican y discuten algunas técnicas de modelado utilizadas para evaluar (con las herramientas disponibles en los programas de análisis), algunos factores que sobrepasan el comportamiento lineal de la estructura.

Se hace una revisión de la resistencia de algunos elementos estructurales y se compara con la información que se dispone sobre el estado final de la estructura después del sismo de 1985.

Finalmente, se evalúa de forma global, todo el proceso de modelado de la estructura, haciendo hincapié en los puntos interesantes que se tocan durante la solución del problema.

2 Descripción de la estructura

2.1 Estructura

El edificio Jal está localizado en la zona del lago de la ciudad de México en la colonia Roma (Figura 2.1.1). Fue construido en 1981 con el reglamento vigente en ese momento.

Es una estructura de concreto de catorce niveles donde los primeros tres están ocupados por estacionamientos (Figura 2.1.2). El terreno mide 20 m de frente por 40 m de fondo; de la profundidad del terreno los primeros 32 m están ocupados por el cuerpo principal y los siguientes 8 m por un cuerpo anexo, el cual está aislado del resto de la estructura a partir del Nivel-E6 (Figura 2.1.2).

La estructura está estructurada a base de losas planas reticulares soportadas por columnas con capiteles. Originalmente la mayoría de los muros tanto internos como externos eran de mampostería. La losa reticular tiene un peralte de 45 cm (con 5 cm de zona de compresión) y las columnas varían en dimensiones. La estructura tiene cerca del centro de la planta del cuerpo principal, un cubo de elevadores de muros de concreto reforzado de 20 cm de espesor.

Dos detalles sobre el diseño y la estructuración, que deben ser mencionados, son: Primero, las nervaduras de la losa reticular no están dispuestas de forma que la nervadura principal entre columnas viaje de eje de columna a eje de columna, en vez, la losa es una retícula uniforme con casetones de 60 x 60 cm, rematada en todo el perímetro por una nervadura principal que viaja por el paño exterior de las

columnas. Segundo, todo el acero de refuerzo longitudinal en columnas está colocado en 4 paquetes de varillas en las esquinas de la sección.

La cimentación es un cajón de concreto de 3.1 m de profundidad con una losa reticular de 90 cm en el fondo, apoyada sobre pilotes de fricción intercalados con pilotes de punta (Figura 2.1.3). Este sistema consiste de un conjunto de pilotes de fricción que parten de la cimentación y no llegan a un estrato resistente; estos se intercalan con otro grupo de pilotes apoyados de punta en un estrato resistente sin llegar a tocar la cimentación. La idea de este sistema es que se transmitan de alguna manera los esfuerzos de los pilotes de fricción a los pilotes de punta que le dan, de cierta forma consistencia al suelo.

Después de los sismos de septiembre de 1985 el edificio se reestructuró encamisando columnas e introduciendo muros de concreto en las fachadas laterales.

Todo el acero de refuerzo utilizado en la construcción, tanto el longitudinal como el transversal, tiene un f_y de 6000 kg/cm².

En los planos estructurales del edificio se identifican tres distintas resistencias del concreto asignadas a los distintos niveles. Para los niveles que van del cajón de cimentación al Nivel-4 se especificó un concreto de $f'_c = 300$ kg/cm². Para los niveles que van del cinco al nueve se especifica un concreto de $f'_c = 250$ kg/cm², y finalmente, para los niveles por arriba del Nivel-9 se utilizó concreto con $f'_c = 200$ kg/cm².

Con base en un estudio realizado por el Instituto de Ingeniería² (en el cual se obtuvieron las resistencias y módulos de elasticidad de corazones de concreto extraídos de distintos elementos de la estructura), se agruparon los tres distintos tipos de concreto en dos, atendiendo a los módulos de elasticidad y para fines de análisis.

El primer tipo de concreto va de la base de la estructura hasta el Nivel-8 y tiene un módulo de elasticidad $E=197000 \text{ kg/cm}^2$ para bajos niveles de esfuerzo y $E=143000 \text{ kg/cm}^2$ como módulo de elasticidad secante para altos niveles de esfuerzo y un $f'_c=285 \text{ kg/cm}^2$. El segundo tipo de concreto tiene módulos de elasticidad de 171000 y 134000 kg/cm^2 , para bajos y altos niveles de esfuerzo respectivamente y un $f'_c=255 \text{ kg/cm}^2$.

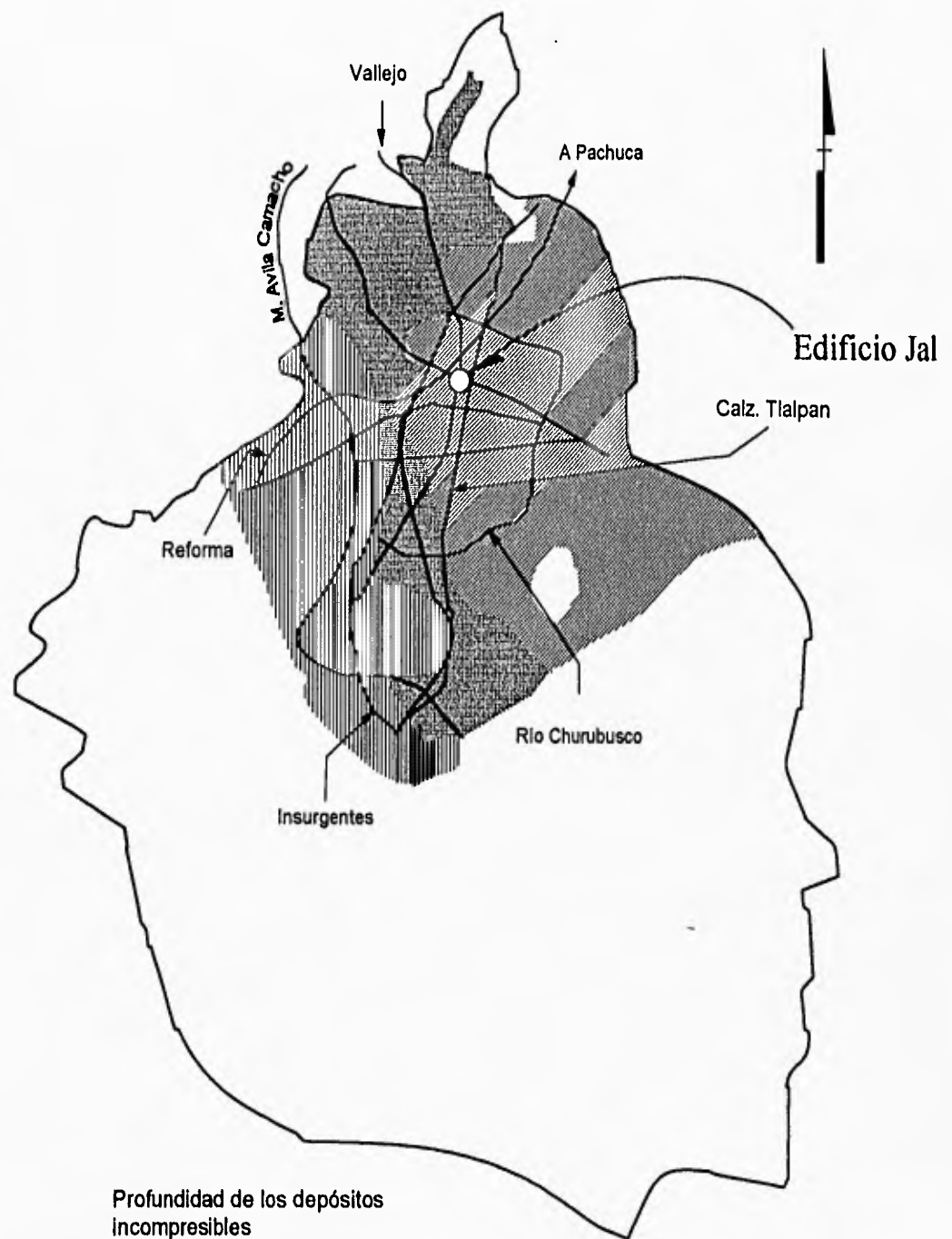
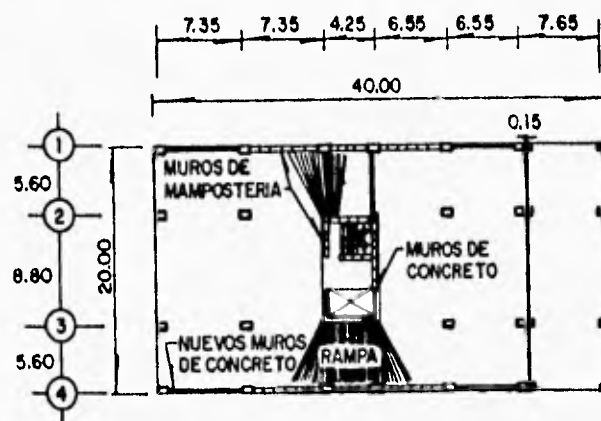
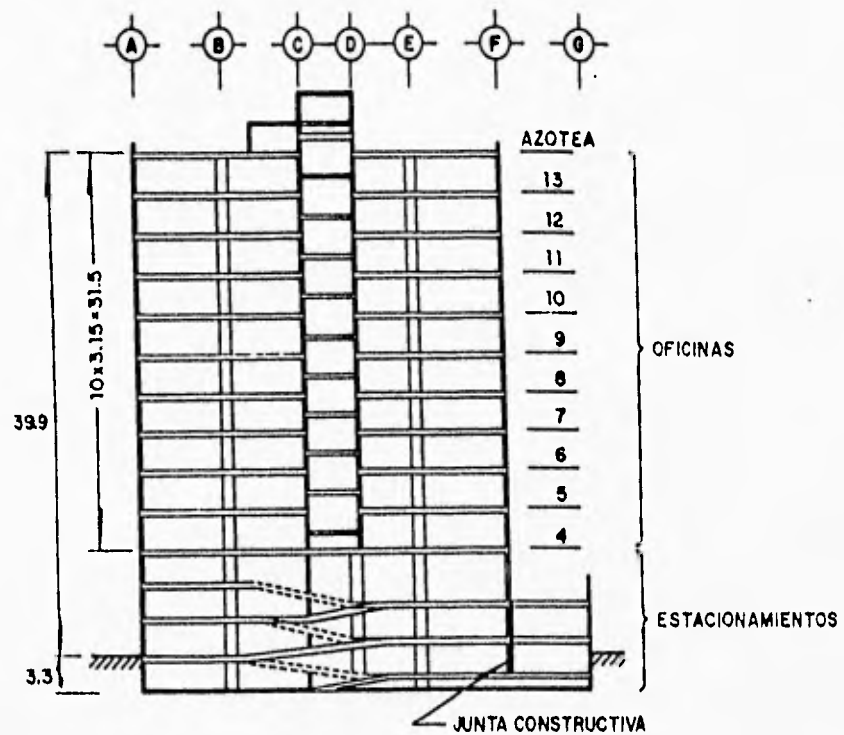


Figura 2.1.1 Ubicación del edificio Jal.



DIMENSIONES EN m

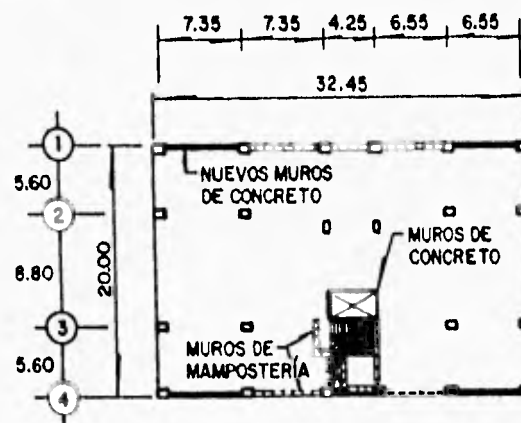


Figura 2.1.2 Fachada del edificio Jal.
Planta de la estructura.

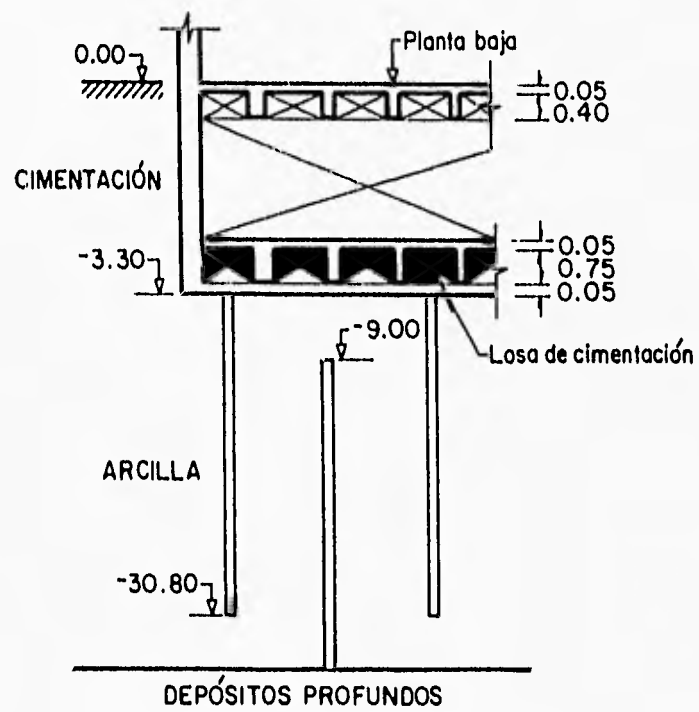


Figura 2.1.3 Corte de la cimentación.

2.2 Descripción del daño identificado

El edificio Jal sufrió daños moderados durante los sismos de septiembre de 1985 y en el dictamen desarrollado entonces se menciona que tanto los muros de mampostería como las columnas, presentaron agrietamientos por cortante, especialmente por encima del nivel 7. Después del sismo la estructura fue reparada; se revistieron todas las columnas, y se sustituyeron la mayoría de los paneles exteriores de mampostería por paneles de concreto reforzado.

Las losas reticulares presentan dos tipos de agrietamiento que es visible aún. El primero y más generalizado consiste en grietas de flexión localizadas en las nervaduras de la losa reticular, que corren paralelas a los ejes transversal y longitudinal de la estructura, y coinciden con líneas de fluencia positivas y negativas del sistema de piso; estas se encuentran en casi todos los niveles a aproximadamente $1/3$ ó $1/4$ del claro entre ejes de columnas. El segundo tipo de agrietamiento se encuentra junto a algunos capiteles en dirección paralela a las caras, este es un agrietamiento de cortante que atraviesa todo el espesor de la losa como parte de las líneas de fluencia del agrietamiento por flexión pero más cercano a las columnas.

3. Modelado matemático de la estructura considerando base empotrada

3.1 Programas de análisis

Para el modelado de la estructura se utilizaron las versiones 5.4 y 6.3 del programa ETABS^{1,3}. Como existían modelos de la estructura reparada en la versión 5.4, desarrollados para diversos estudios en el Instituto de Ingeniería, estos se utilizaron como guía para la realización del primer conjunto de modelos de la estructura en su forma original (antes de la reparación).

Ya teniendo los primeros modelos de la estructura en la versión 5.4 salió al mercado la versión 6.0. Por las opciones de modelado que ofrecía ésta, se decidió hacer modelos nuevos utilizándola. Dentro del estudio se incluyó la comparación de los resultados obtenidos haciendo uso de las dos versiones.

3.2 Consideraciones generales para el modelado

La estructura se modeló como un solo marco tridimensional de concreto reforzado; para lograr esto, se asumieron anchos equivalentes de losa plana como trabes.

La información utilizada para armar el modelo se obtuvo de los planos estructurales originales, de la observación directa de detalles de la estructura, de la verificación de las dimensiones, de la estimación de cargas, y de la determinación experimental de las características mecánicas de los diferentes tipos de concreto con que cuenta el edificio.

Se asumieron distintas hipótesis generales en el comportamiento de la estructura, así como de ciertos miembros estructurales, estas son:

-Se modelaron vigas equivalentes a partir de anchos "B" efectivos de la losa reticular, iguales a $B=c+3h$, según el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1987 (RCDF-87⁴), donde "c" es la dimensión de la columna en la dirección perpendicular a la viga equivalente y "h" es el peralte de la losa reticular. Se calcularon las propiedades geométricas de la sección a partir de este ancho equivalente. Debido a la gran cantidad de secciones distintas de losa reticular identificadas para el modelo, se agruparon secciones de losa similares en un solo grupo, bajo la condición de que el momento de inercia en la dirección mayor no variara entre extremos de un mismo grupo en más de un 5%.

-Se consideró la unión viga-columna rígida en un 50% de su dimensión.

-Se estimaron diagonales equivalentes a los muros de mampostería (en los casos donde se incluyó su participación), sustituyendo los paneles de mampostería de los niveles superiores, por marcos de concreto con una diagonal efectiva de mampostería⁵. Esto se hace para evitar la sobre evaluación que hace el programa de la rigidez de los muros como paneles, suponiendo que trabajan en forma continua junto con los elementos que los rodean.

-La estructura se consideró empotrada en la base.

-Se modificó la disposición de algunos elementos dentro de la estructura, de manera que se simplificara la geometría del modelo, cuidando de no afectar significativamente el comportamiento dinámico global. Por ejemplo, se reubican algunos muros interiores de mampostería, de tal forma que se concentren en una misma crujía para que no sea necesario generar elementos extras para localizarlos.

-Se calcularon las masas del edificio, considerando las posiciones y magnitudes de masas concentradas (como las columnas, los muros, y la caseta de máquinas sobre el nivel de azotea). De esta manera se obtienen valores más realistas de las excentricidades de masas, esto se hace dada la importancia que ellas tienen para representar los efectos de torsión.

- Se asumieron dos módulos de elasticidad evaluados en laboratorio, para modelar condiciones de altos o bajos niveles de esfuerzo correspondientes a desplazamientos grandes y pequeños.

3.3 Modelado de la estructura en la versión 5.4

En esta primera etapa se desarrollaron cuatro modelos de la estructura, sus nombres y características son los siguientes:

-Modelo Jal1, es la estructura sin considerar la presencia del cuerpo anexo, y sin contar con el aporte de los muros exteriores de mampostería (Figura 3.3.1).

-Modelo Jal2, es la estructura sin cuerpo anexo, pero considerando la participación de los muros de mampostería de las fachadas laterales como diagonales equivalentes (Figura 3.3.2).

-Modelo Jal3, igual en el cuerpo principal al modelo Jal1, prolongando la dimensión de la planta del sótano para abarcar el área ocupada por el cuerpo anexo y agregando toda la masa de éste en dicha ampliación (Figura 3.3.3).

-Modelo Jal4, igual en su estructura principal al modelo Jal2 (con participación de muros de mampostería), pero incluyendo el cuerpo anexo de igual manera que en Jal3 (Figura 3.3.4).

7

Para modelar la estructura en la versión 5.4 se hacen consideraciones adicionales, para simular la participación de algunos miembros estructurales con las opciones que nos brinda el programa. Estas son:

-Se consideraron los aportes de rigidez de capiteles directamente, modelando las vigas en tres segmentos, definiendo columnas ficticias en los extremos de los capiteles.

-Las escaleras y las rampas de estacionamiento se modelaron como diagonales.

-En los modelos Jal3 y Jal4 se consideró la presencia del cuerpo anexo, tomando en cuenta únicamente su masa colocada en el nivel inferior, por ser este el único ligado al resto de la estructura.

Estos primeros modelos sirvieron como un instrumento de calibración, y sobre todo, para adquirir sensibilidad de cómo y cuánto afectan las distintas variables a las propiedades dinámicas.

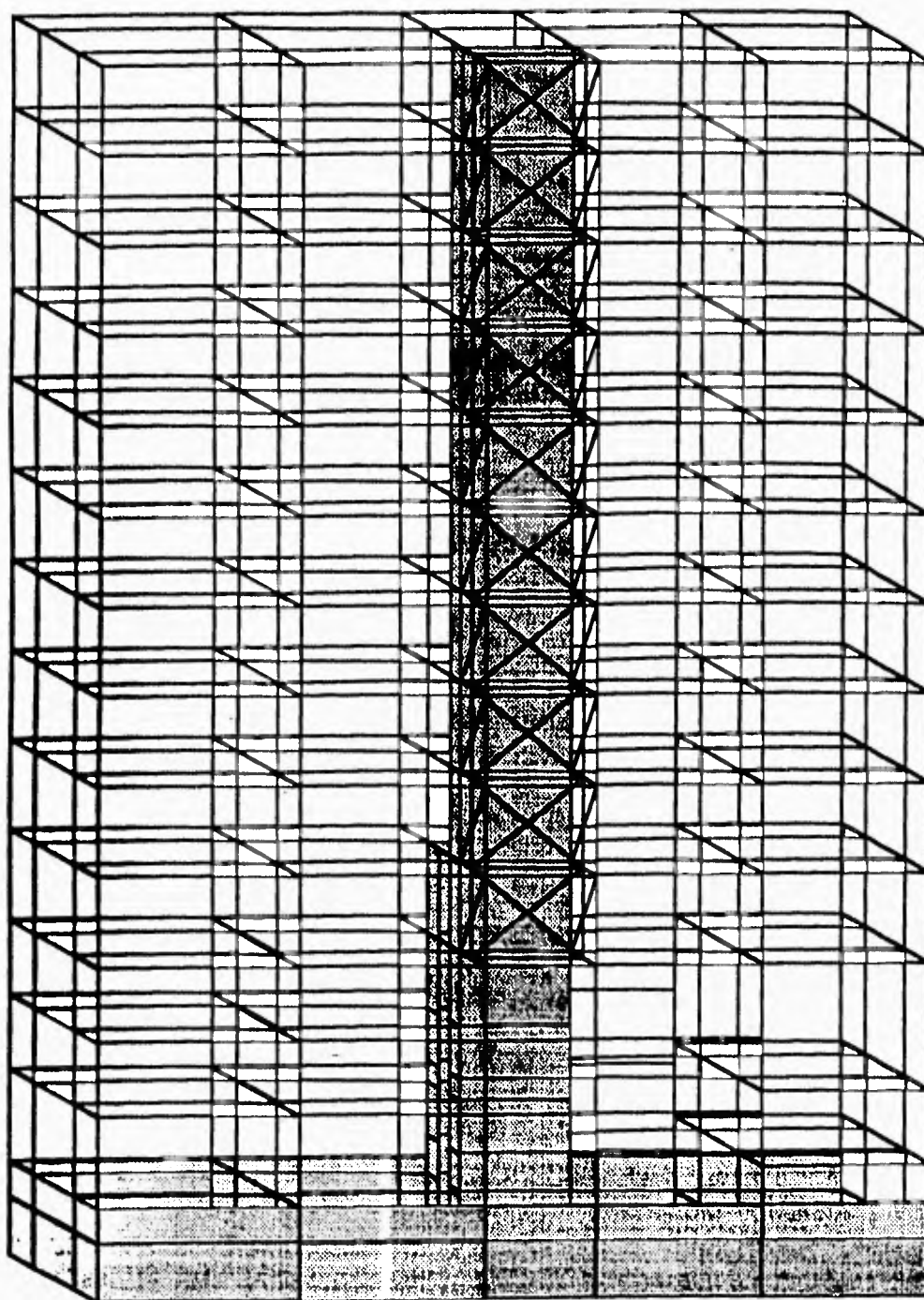


Figura 3.3.1 Modelo Jal1.

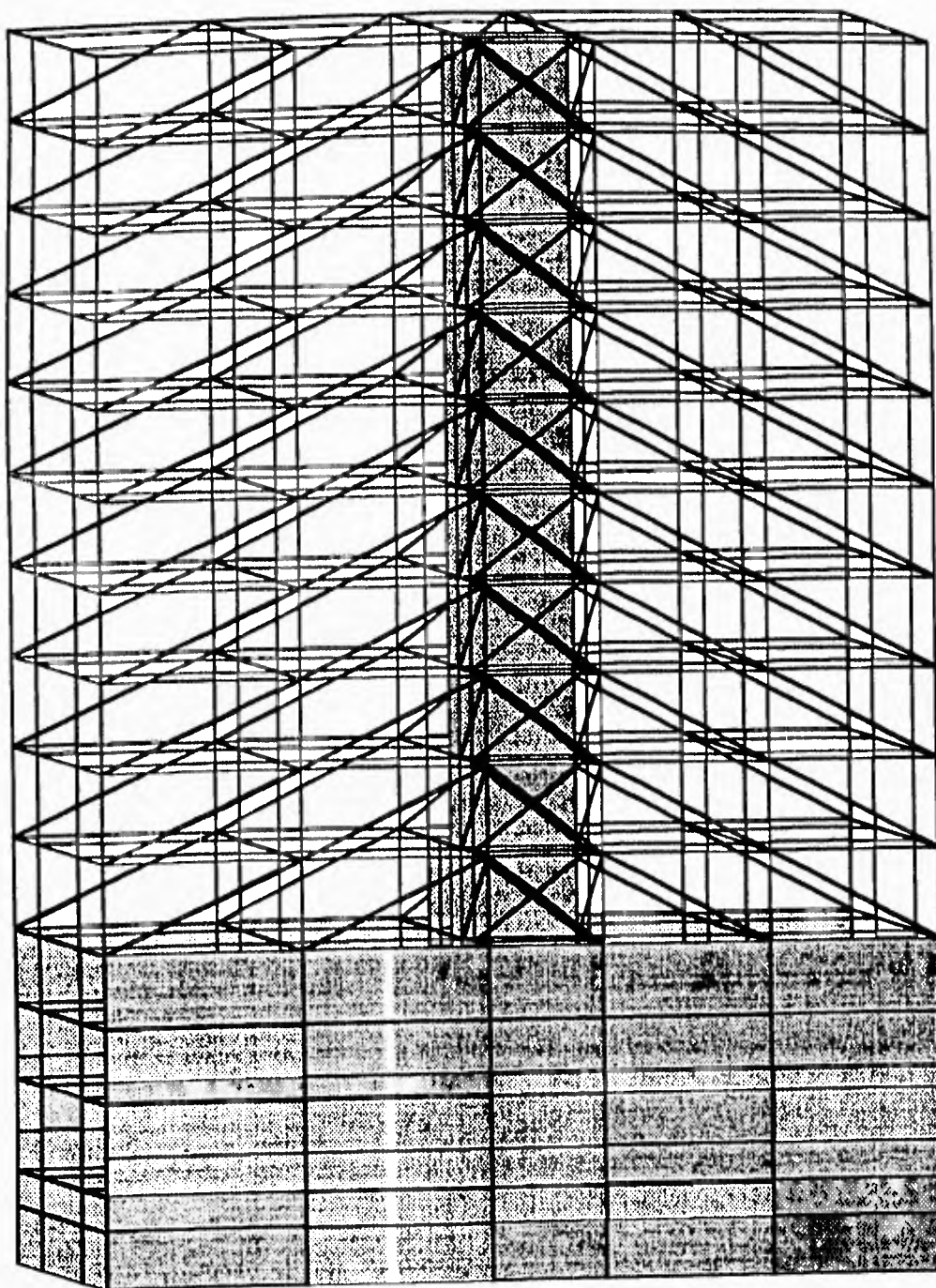


Figura 3.3.2 Modelo Jal2.

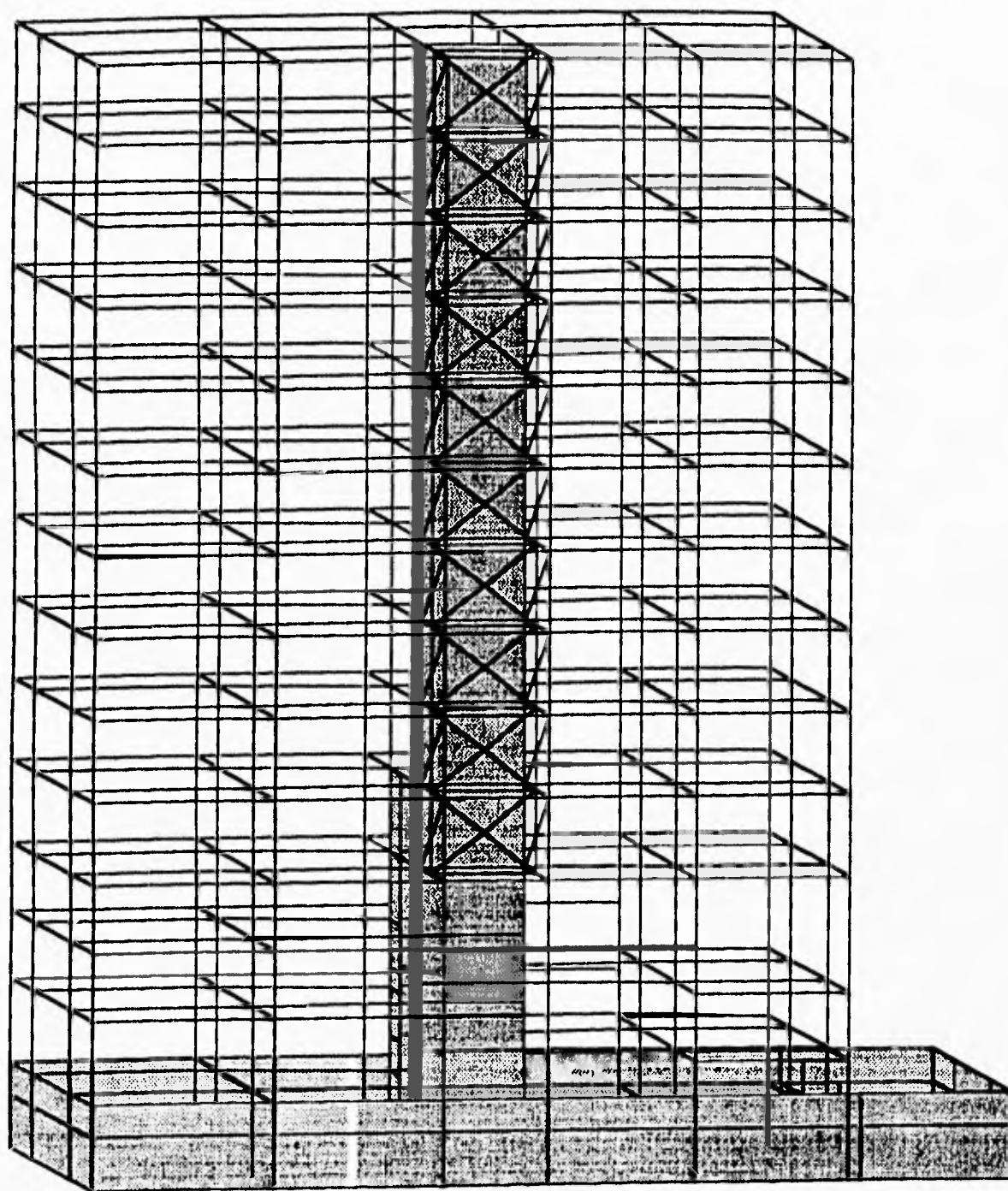


Figura 3.3.3 Modelo Jal3.

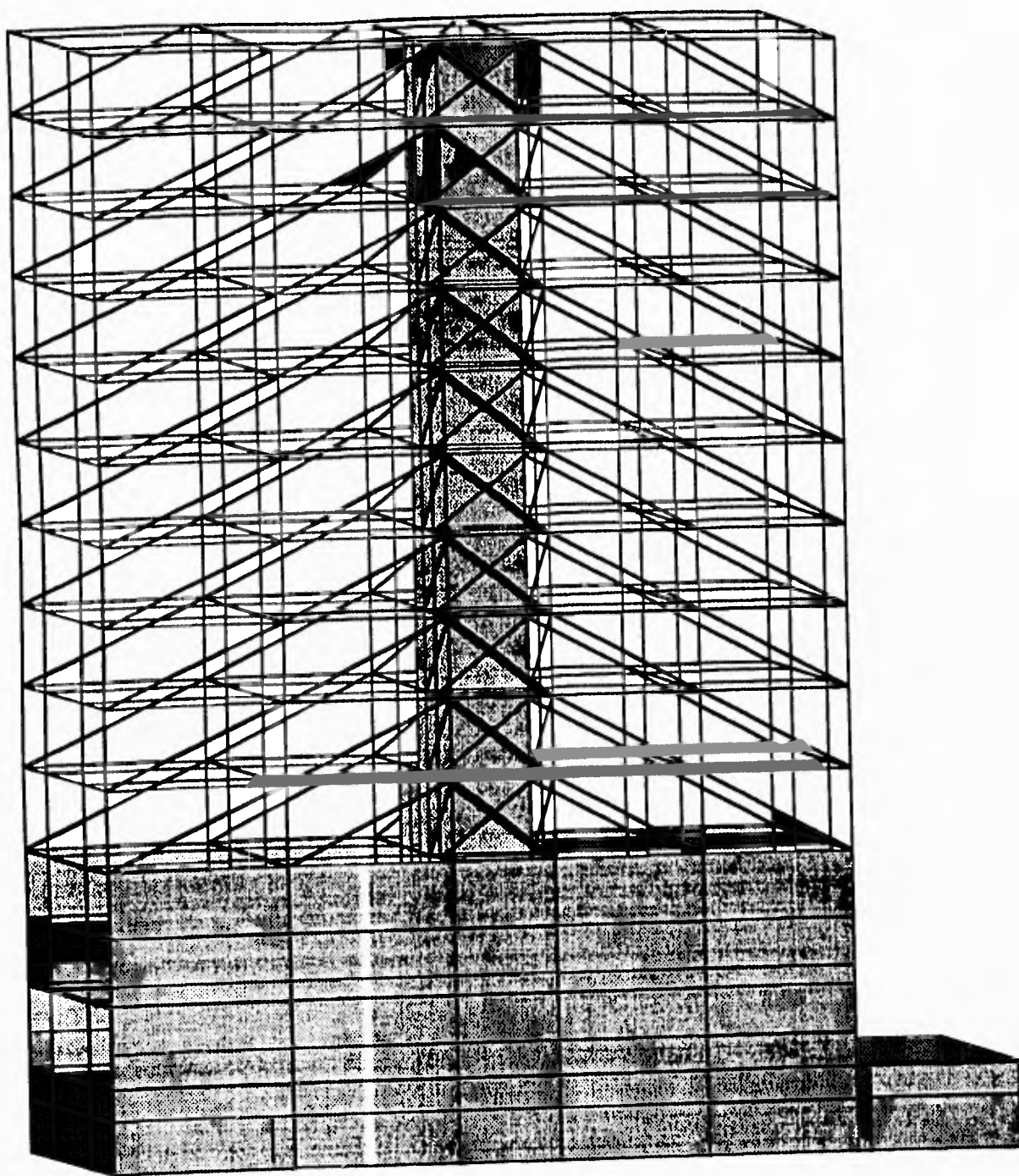


Figura 3.3.4 Modelo Jal4.

3.4 Conversión de los modelos a la versión 6.0

Después de elaborar los modelos de la estructura en la versión 5.4 del programa ETABS, se estudió la posibilidad de utilizar la versión 6.0. Las ventajas que ofrece esta son varias: debido a la opción de introducir resortes de seis grados de libertad se simplifica mucho la tarea de incluir los efectos ISE. Además, ofrece una opción de "elementos losa", que permite modelar losas inclinadas, ya sea para incluir escaleras o rampas de estacionamiento. También tiene la opción de considerar trabes y columnas de sección variable, lo que resultaba atractivo por la forma en que se modelan las trabes equivalentes a las losas reticulares.

El paquete ETABS 6.0 cuenta con un traductor que permite actualizar modelos generados en la versión 5.4, pero por la complejidad de los modelos y la utilización de columnas ficticias para modelar las trabes con capitel, el traductor no pudo hacer su trabajo y se tuvo que hacer una traducción del modelo "desarmado", es decir, se tradujeron las propiedades de los elementos, los materiales y las masas, para redefinir la geometría con estas en la nueva versión.

Debido a la necesidad de "desarmar" el modelo de un lado y "rearmarlo" en el otro, junto con la forma de definir elementos en el nuevo programa, se hicieron innecesarias algunas de las simplificaciones del modelo, al mismo tiempo que tuvieron que hacerse nuevas consideraciones. Estas son: la utilización de elementos piso; la reagrupación de propiedades de trabes, de tal forma que se tuvieran que definir el menor número posible de trabes de sección variable, cuidando que la variación entre propiedades geométricas

fuera poco significativa; y finalmente, la reubicación de muros de mampostería para conformar un modelo más sencillo.

Ante la necesidad de homologar el trabajo en ambos programas, se construyeron dos grupos distintos de modelos: en dos de ellos se respetan los tipos de elementos de los modelos de la versión anterior y en los otros dos se sustituyen las diagonales destinadas a modelar las rampas de estacionamiento por la nueva opción de pisos inclinados.

Todos los modelos descritos aquí están empotrados en la base e incluyen al cuerpo anexo con todas sus características, es decir, que a diferencia de los modelos anteriores, aquí se incluye al cuerpo anexo con sus tres niveles, las masas, y los elementos que les corresponden. A continuación se describen los distintos modelos realizados en esta fase:

- Modelo Jal3i-6, equivalente al Jal3 de la versión 5.4 (Figura 3.4.1).

- Modelo Jal3-6, equivalente al modelo Jal3 de la versión 5.4, pero con la opción del elemento piso para modelar las rampas de estacionamiento (Figura 3.4.2).

- Modelo Jal4i-6, equivalente al Jal4 de la versión 5.4 (Figura 3.4.3).

- Modelo Jal4-6, equivalente al modelo Jal4 de la versión 5.4, pero con la opción del elemento losa en las rampas de estacionamiento (Figura 3.4.4).

El objetivo principal de los modelos Jal3i-6 y Jal4i-6 es el proporcionar un elemento de comparación entre los modelos realizados en la versión previa del programa (ETABS 5.4) y la versión presente, sobre todo para poder evaluar la importancia del cambio de propiedades entre las trabes definidas con columnas ficticias y los nuevos elementos trabe de sección variable.

Las frecuencias obtenidas como resultado del análisis modal pueden observarse en la Tabla 3.4.1.

Al comparar los modelos Jal3 con Jal3i-6 y Jal4 con Jal4i-6 se aprecia que la conversión fue adecuada ya que la variación en las frecuencias es menor al 4%, siendo esta consecuencia de la reagrupación de las propiedades de las trabes equivalentes.

En el modelo Jal3-6, que utiliza el elemento piso, aparece un gran acoplamiento entre los componentes de vibración, al grado de que el porcentaje de dirección modal del primer modo del modelo Jal3-6 es de la misma magnitud en los componentes T y R (Tabla 3.4.1).

El acoplamiento aparecido se debe a dos condiciones de los "elementos losa". El primero es la ubicación de las rampas en forma de espiral, lo que produce un efecto de torsión con los desplazamientos horizontales. El segundo y más notable, es la enorme rigidez en su plano que el programa asigna a los "elementos losa". Al final de la Tabla 3.4.1 se muestran los resultados del análisis modal de dos variantes de Jal3i-6, en estos, se modelan las rampas de estacionamiento con diagonales equivalentes: en el modelo Jal3ira se asignan las propiedades geométricas de la sección de estas rampas a los elementos "diagonal", mientras que en Jal3irb, se asigna a estos

7

elementos diagonal una rigidez infinita en su plano, simulando las condiciones del elemento piso.

En la Tabla 3.4.1 se aprecia que mientras el aumento en las frecuencias de los tres primeros modos del modelo Jal3irb es mínima, el acoplamiento entre los componentes T y R alcanza niveles cercanos a los observados en el modelo Jal3-6.

Tabla 3.4.1. Frecuencias de los tres primeros modos y factores de dirección de los modos fundamentales.

Modelos en ETABS 5.4

	Modo	Frecuencias (Hz)				Modo	Factores de dirección (%)		
		L	T	R			L	T	R
Jal1	1	0.59	0.53	0.53	Jal1		0.04	99.64	0.32
Sin cuerpo anexo	2	1.99	1.58	1.47	Sin cuerpo anexo		3.2	0.41	96.39
Sin muros exteriores	3	4.06	3.02	2.49	Sin muros exteriores		96.91	0.01	3.07
Jal2	1	0.9	0.53	0.82	Jal2		0	100	0
Sin cuerpo anexo	2	2.89	1.59	2.37	Sin cuerpo anexo		0.28	0.06	99.65
Con muros exteriores	3	5.38	3.08	3.97	Con muros exteriores		99.88	0	0.12
Jal3	1	0.58	0.52	0.53	Jal3		0.63	94.61	4.76
Con cuerpo anexo	2	1.99	1.59	1.46	Con cuerpo anexo		6.02	5.42	88.56
Sin muros exteriores	3	4.11	3.07	2.49	Sin muros exteriores		93.52	0.05	6.43
Jal4	1	0.9	0.53	0.82	Jal4		0	99.99	0
Con cuerpo anexo	2	2.9	1.6	2.38	Con cuerpo anexo		0.48	0.06	99.46
Con muros exteriores	3	5.42	3.09	3.98	Con muros exteriores		99.69	0	0.31

Modelos en ETABS 6.0. Todos con cuerpo anexo.

Jal3-6	1	0.6	0.57	0.55	Jal3-6		0.12	49.94	49.94
Elemento piso	2	2.04	1.74	1.59	Elemento piso		18.4	41.71	39.89
Sin muros exteriores	3	4.15	3.25	2.69	Sin muros exteriores		81.62	8.47	9.91
Jal3i-6	1	0.59	0.52	0.56	Jal3i-6		0.13	97.9	1.97
Diagonales	2	1.98	1.62	1.56	Diagonales		13.67	2.18	84.15
Sin muros exteriores	3	4.07	3.09	2.65	Sin muros exteriores		86.35	0.07	13.58
Jal4-6	1	0.89	0.57	0.84	Jal4-6		0.02	99.83	0.15
Elemento piso	2	2.86	1.74	2.43	Elemento piso		0.81	0.25	98.94
Con muros exteriores	3	5.27	3.23	4.03	Con muros exteriores		99.31	0.04	0.64
Jal4i-6	1	0.88	0.53	0.84	Jal4i-6		0	99.97	0.03
Diagonales	2	2.83	1.6	2.42	Diagonales		0.69	0.2	99.11
Con muros exteriores	3	4.81	3.07	3.99	Con muros exteriores		99.47	0	0.53

Diagonales modelando rampas de estacionamiento

Jal3lrh	1	0.64	0.62	0.63	Jal3lrh		2.72	40.59	56.70
Diagonales rígidas	2	2.16	1.89	1.73	Diagonales rígidas		10.01	58.75	31.24
	3	4.41	3.5	2.93			84.41	3.72	11.87
Jal3lra	1	0.62	0.57	0.6	Jal3lra		0.36	90.74	8.90
Diagonales normales	2	2.08	1.75	1.67	Diagonales normales		5.05	9.37	85.58
	3	4.22	3.29	2.84			94.74	0.03	5.23

L-longitudinal, T-transversal, R-torsión

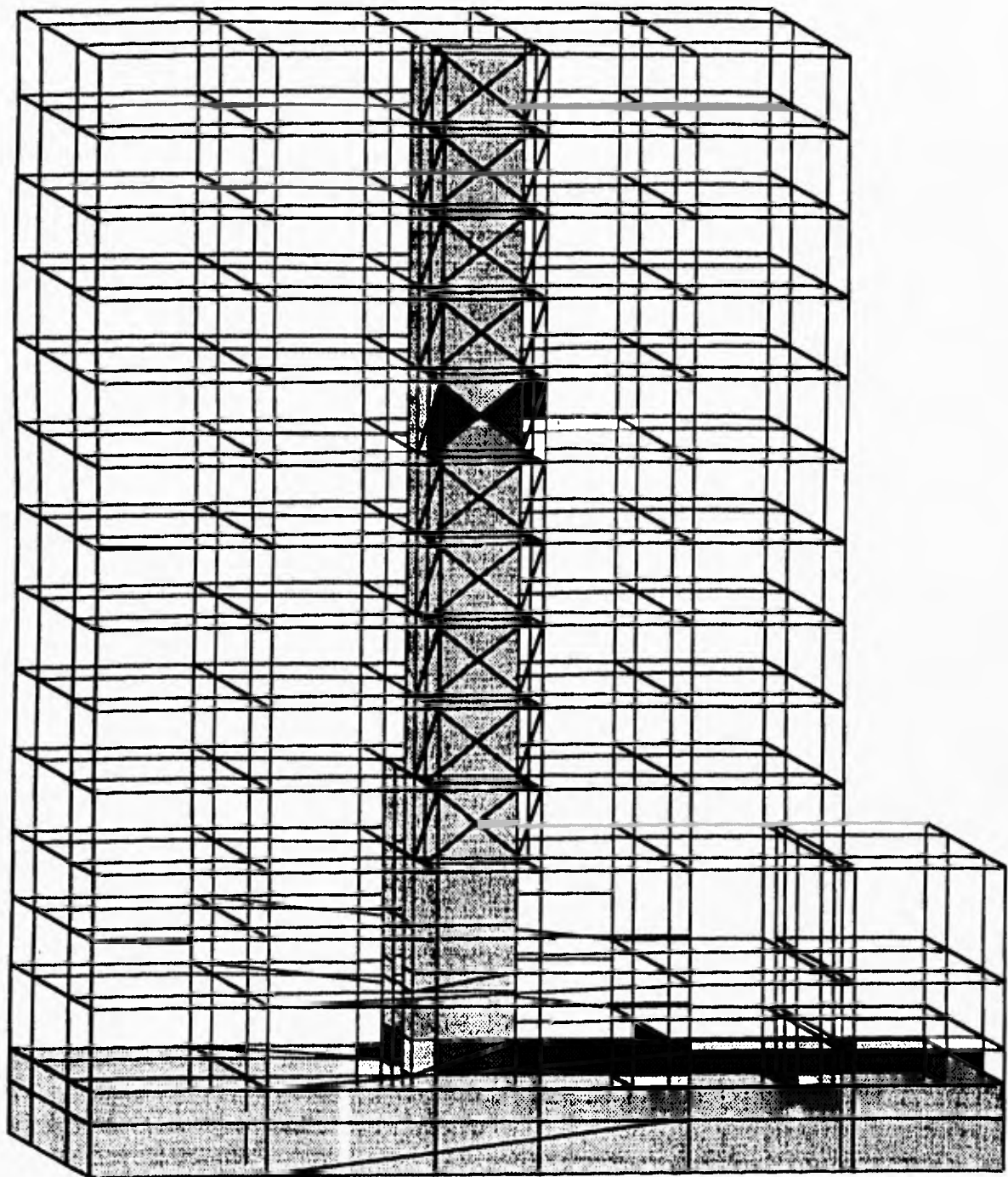


Figura 3.4.1 Modelo Jal3i-6.

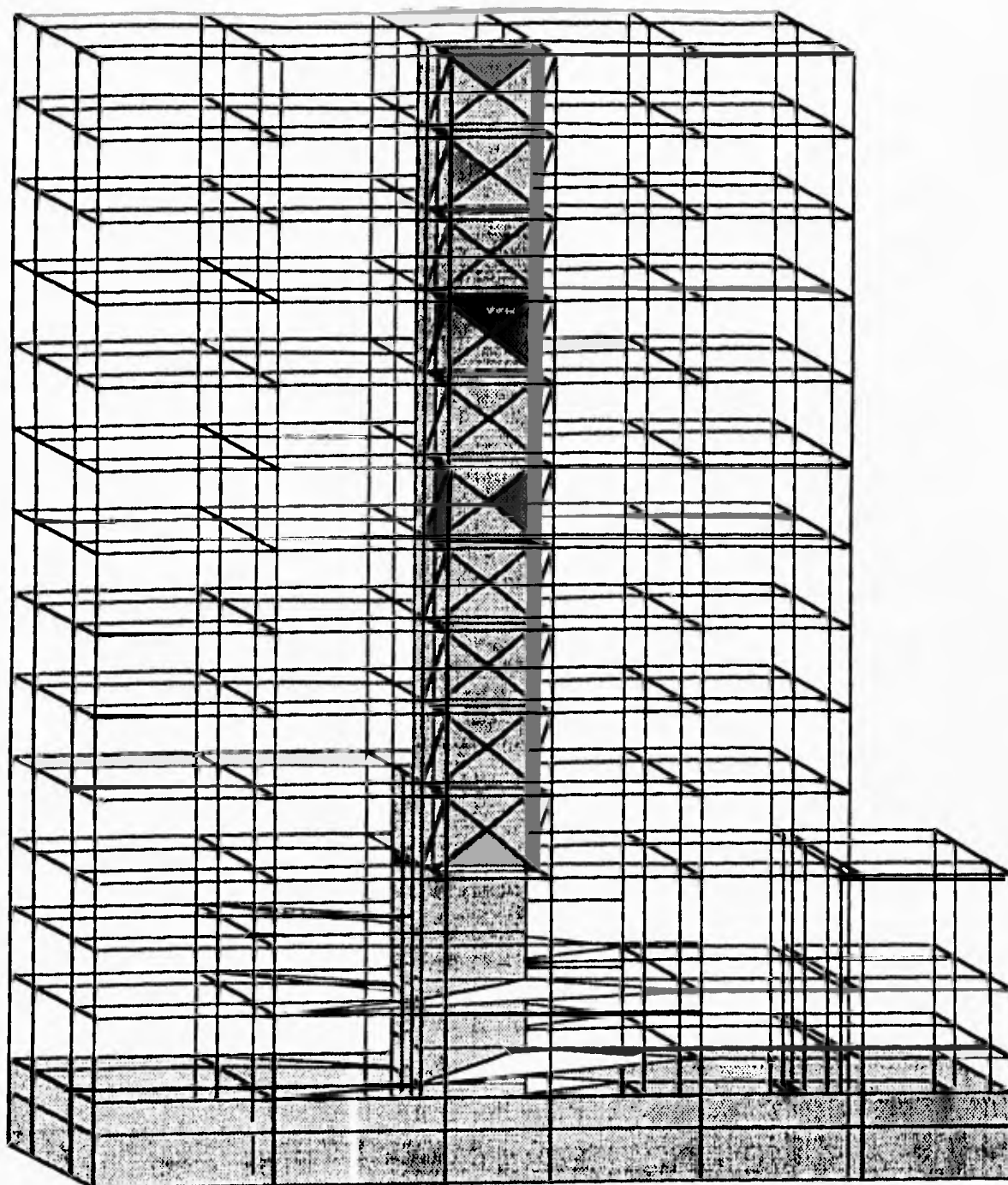


Figura 3.4.2 Modelo Jal3-6.

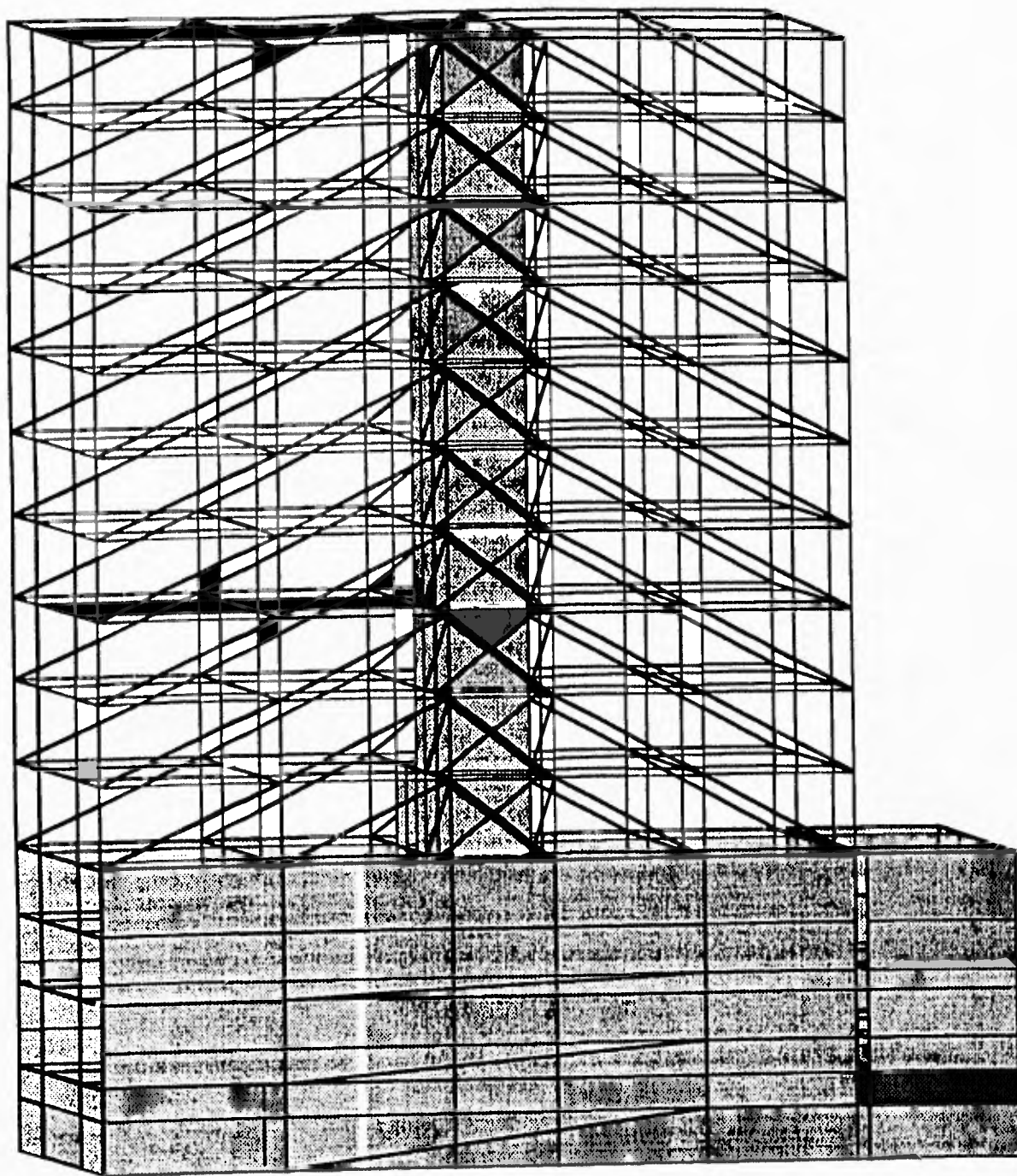


Figura 3.4.3 Modelo Jal4i-6.

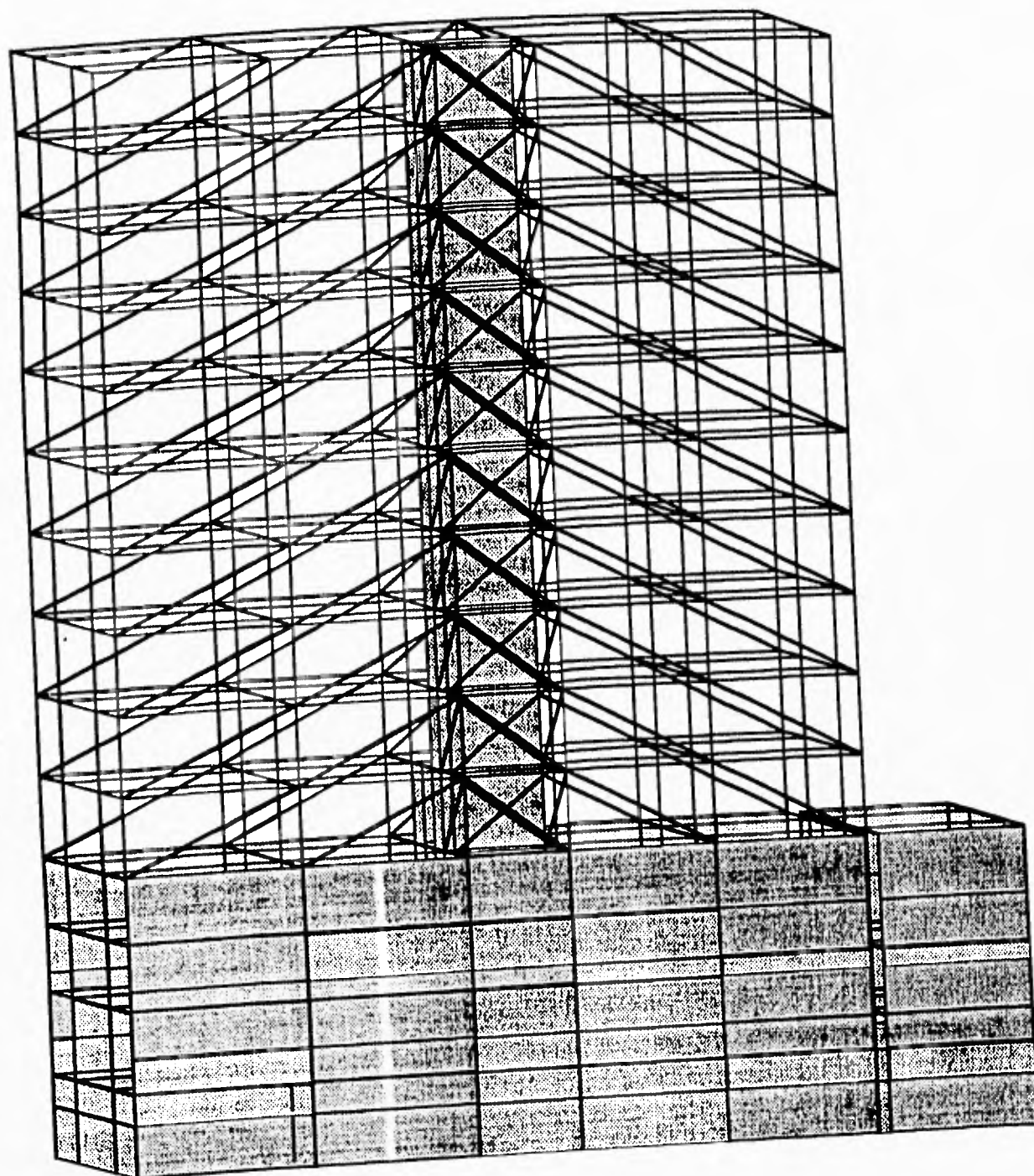


Figura 3.4.4 Modelo Jal4-6.

3.5 Análisis de sensibilidad haciendo uso de la versión 6.0

Después de comprobar la afinidad de los modelos realizados en el programa ETABS 6.1 con la de la versión 5.4, se estudian las propiedades dinámicas de la estructura haciendo uso de los modelos generados en la versión más reciente. Al variar algunos parámetros para ajustar los modelos a distintas condiciones de comportamiento de la estructura, se obtienen resultados que acotan sus posibles propiedades dinámicas y brindan una noción de la importancia relativa de la variación de éstas.

Para esta fase del estudio se obtuvieron las propiedades dinámicas de la estructura variando tres factores:

Primero, se consideraron dos conjuntos de módulos de elasticidad de los materiales, el primero para la condición de bajos niveles de esfuerzo, donde estos valores son mayores, y el segundo para altos niveles de esfuerzo en los cuales el módulo de elasticidad es menor; estos valores se obtuvieron mediante el ensaye de corazones extraídos del edificio.

El segundo factor, es el agrietamiento de columnas, por un lado se consideraron las secciones brutas y por otro las secciones agrietadas calculadas con el criterio de la sección transformada.

El tercer factor, es el agrietamiento de trabes en el tramo central, obtenido con el mismo criterio que el empleado en el caso de las columnas.

Las dimensiones de las secciones efectivas, tomando en cuenta el agrietamiento, resultaron ser bastante homogéneas para todas las columnas y trabes; siendo la razón promedio entre momento de inercia

agrietado y momento de inercia de la sección bruta (I_{Agr}/I_B) de alrededor de 0.2 para el caso de trabes y de alrededor de 1 para columnas (este valor tan alto obtenido para el caso de las columnas se debe a la cantidad y disposición del acero de refuerzo longitudinal).

Esta uniformidad respalda a algunos trabajos, en los que se recomienda, tomar porciones constantes de las propiedades geométricas de los elementos estructurales, para ahorrarse el trabajo del contéo de acero y cálculo de secciones agrietadas. De esta forma, se simplifica el análisis de la estructura tomando en cuenta el agrietamiento, y se obtiene un error relativamente pequeño en el cálculo de las frecuencias.

Se desarrollaron entonces los 16 modelos a partir de dos variedades básicas de modelos planteadas previamente, los identificados con "J3" que modelan a la estructura sin incluir la participación de los muros de mampostería exteriores y con "J4" que si incluyen su participación.

La nomenclatura de los modelos comienza con el tipo de modelo, ya sea "J3" (como en la Figura 3.4.1) ó "J4" (como en la Figura 3.4.3), y sigue con las propiedades mecánicas de los materiales, ya sea para niveles de esfuerzo altos o bajos; por ejemplo "J3a" sería el modelo tipo "J3" para altos niveles de esfuerzo y "J4b" sería el modelo "J4" con propiedades mecánicas para bajos niveles de esfuerzo. Después siguen las propiedades de agrietamiento: "ca" indicando columnas agrietadas y "ta" trabes agrietadas; entonces "J4ataca" indica que se trata del modelo "J4" en altos niveles de esfuerzo con propiedades agrietadas de trabes y columnas y "J3bta" es el modelo "J3" para bajos niveles de esfuerzo con agrietamiento en trabes.

Los nombres de los 16 modelos y sus propiedades se enlistan a continuación:

Nivel de esfuerzo	Alto	Bajo	Alto	Bajo
Sin agrietamiento	J3a	J3b	J4a	J4b
Columnas agrietadas	J3aca	J3bca	J4aca	J4bca
Trabes agrietadas	J3ata	J3bta	J4ata	J4bta
Trabes y columnas agrietadas	J3ataca	J3btaca	J4ataca	J4btaca

Finalmente, de los resultados del análisis de sensibilidad (Tabla 3.5.1), se encontró que los factores que más afectan el comportamiento de la estructura son las secciones agrietadas en trabes y la variación de módulos de elasticidad. La poca variación provocada por la sección agrietada en columnas en las propiedades dinámicas de la estructura, se debe a la variación tan pequeña en las propiedades geométricas de la sección al considerar el agrietamiento.

Tabla 3.5.1. Frecuencias de los modelos obtenidas en el análisis de sensibilidad.

Modelo	Modo	L	T	R	Modelo	Modo	L	T	R
J3a	1	0.54	0.50	0.52	J4a	1	0.77	0.51	0.74
	2	1.82	1.56	1.46		2	2.48	1.55	2.14
	3	3.68	2.89	2.47		3	4.57	2.87	3.54
J3aca	1	0.54	0.49	0.51	J4aca	1	0.77	0.51	0.73
	2	1.80	1.53	1.40		2	2.47	1.52	2.10
	3	3.64	2.83	2.36		3	4.56	2.81	3.46
J3ata	1	0.42	0.39	0.38	J4ata	1	0.70	0.40	0.64
	2	1.57	1.28	1.14		2	2.31	1.28	1.91
	3	3.36	2.46	1.97		3	4.34	2.45	3.19
J3ataca	1	0.42	0.39	0.38	J4ataca	1	0.70	0.40	0.64
	2	1.56	1.27	1.12		2	2.31	1.26	1.89
	3	3.35	2.45	1.92		3	4.34	2.43	3.15
J3b	1	0.63	0.58	0.60	J4b	1	0.91	0.59	0.87
	2	2.10	1.81	1.69		2	2.90	1.80	2.51
	3	4.25	3.36	2.86		3	5.35	3.33	4.15
J3bca	1	0.60	0.57	0.55	J4bca	1	0.89	0.57	0.84
	2	2.02	1.71	1.52		2	2.85	1.71	2.39
	3	4.12	3.19	2.56		3	5.26	3.17	3.94
J3bta	1	0.49	0.46	0.44	J4bta	1	0.82	0.47	0.76
	2	1.82	1.49	1.33		2	2.72	1.49	2.26
	3	3.89	2.88	2.29		3	5.10	2.86	3.76
J3btaca	1	0.49	0.46	0.44	J4btaca	1	0.82	0.47	0.75
	2	1.81	1.48	1.30		2	2.71	1.48	2.23
	3	3.87	2.86	2.23		3	5.09	2.84	3.72

L- longitudinal, T- transversal, R- torsión

J3: Modelos sin muros de mampostería exteriores

J4: Modelos con muros de mampostería exteriores

a : Altos niveles de esfuerzo

b : Bajos niveles de esfuerzo

ta: trabes agrietadas

ca: columnas agrietadas

3.6 Elección de modelos para la siguiente fase

De los 16 modelos desarrollados para el análisis de sensibilidad se eligieron solo aquellos que pudieran representar condiciones posibles de comportamiento de la estructura para incluir en ellos los efectos de interacción.

De esta forma se descartaron los modelos que consideraban únicamente la sección agrietada en columnas o en trabes, por ser despreciable la diferencia en propiedades dinámicas con respecto a los que consideran la sección agrietada en ambos o ningún agrietamiento (Tabla 3.5.1). Así entonces, nos quedamos únicamente con las combinaciones de los modelos para altos y bajos niveles de esfuerzo, con y sin agrietamiento, y finalmente con la participación o la no participación de los muros de mampostería.

Así pues, se analizarán en la siguiente fase ocho modelos, estos son:

- Modelos J3b y J4b, que corresponden al comportamiento original de la estructura, ya sea con o sin el aporte de los muros exteriores a la rigidez.
- Modelos J3btaca y J4btaca, correspondientes a las propiedades dinámicas ante pequeños desplazamientos de la estructura dañada.
- Modelos J3a y J4a, corresponden a la respuesta de la estructura sin agrietamiento ante un sismo de magnitud importante

-Modelos J3ataca y J4ataca, correspondientes a la respuesta de la estructura agrietada durante un sismo de magnitud importante.

4 Modelado matemático incluyendo efectos de interacción suelo-estructura (ISE)

4.1 Introducción

Considerar los efectos ISE en el análisis, quiere decir que se toma en cuenta en el modelo matemático de la estructura la naturaleza deformable del suelo en donde se apoya. Los modelos en donde estos efectos no se incluyen suponen que las estructuras están perfectamente empotradas en la base, introduciendo así un error que varía en magnitud dependiendo de las características de la estructura y del suelo.

Al tomar en cuenta los efectos ISE los modelos se hacen más flexibles, disminuyendo sus frecuencias de oscilación. Además, la deformabilidad del suelo tiende a aumentar el amortiguamiento del sistema suelo-estructura.

Las arcillas altamente compresibles del valle de México, son muy particulares durante la ocurrencia de sismos debido a dos efectos. El primero, es la enorme amplificación de aquellas ondas sísmicas cuyas frecuencias coinciden a las frecuencias naturales de oscilación del subsuelo. El segundo, es el efecto ISE, que en el caso de la zona del lago de la ciudad de México alcanza niveles muy superiores a los usuales en otras ciudades del mundo. Los efectos ISE hacen que las respuestas de ciertos sistemas suelo-estructura sean excepcionalmente elevadas cuando las frecuencias naturales de oscilación, modificadas por la interacción, se aproximan a las frecuencias dominantes del terreno.

El RCDF-87 fue el primer reglamento del país en proponer que se tomaran en cuenta los efectos ISE. Por ser el primero y por su carácter reglamentario, se buscó que su aplicación fuera lo más sencilla posible. En el criterio que se adoptó se hacen diversas simplificaciones entre las que destacan las siguientes:

- Se considera que los cimientos se desplazan como cuerpos infinitamente rígidos.
- De los seis grados de libertad que tiene la cimentación se descartan tanto el desplazamiento vertical como el giro alrededor de un eje vertical.
- Se descarta la masa del suelo desplazado en el análisis.
- Se desprecian los efectos de interacción en los modos superiores de la estructura.

La forma de tomar en cuenta los efectos ISE en el RCDF-87 es obteniendo frecuencias fundamentales del sistema suelo-estructura, modificadas por los efectos de la interacción. Se modela la estructura, en cada dirección, como la combinación lineal de tres sistemas independientes de un solo grado de libertad⁶. Estos son:

- La estructura vibrando en el modo fundamental de traslación con base empotrada en la dirección analizada; esto equivale a considerarla como un sistema de un solo grado de libertad.

- La masa total de la estructura vibrando horizontalmente detenida por un resorte. La rigidez del resorte se obtiene de las propiedades elásticas del suelo y del área de una circunferencia equivalente a la cimentación.
- Un sistema equivalente al momento de inercia de masa alrededor del nivel de desplante de la estructura, girando alrededor de un resorte. La rigidez de éste se obtiene de las propiedades elásticas del suelo y del momento de inercia de una circunferencia equivalente a la cimentación.

Las propiedades elásticas del suelo se calculan a partir de la velocidad característica de propagación de ondas de cortante en el subsuelo; esta puede obtenerse tanto indirectamente con un método e información disponible en las normas técnicas complementarias, o realizando estudios del subsuelo de la estructura.

El método que se propone en las Normas Técnicas Complementarias para calcular la velocidad característica de propagación de ondas de cortante en el subsuelo, es mediante la ecuación: $T_s = 4H/V_s$; utilizando como datos la profundidad de los depósitos profundos (H) y el período de oscilación natural del terreno en el sitio (T_s). Ambos valores pueden obtenerse de los mapas del valle de México incluidos en las Normas Técnicas Complementarias.

Una vez obtenida la velocidad de propagación característica de ondas de cortante (V_s) y habiendo obtenido un valor de la densidad media del subsuelo (ρ), se evalúa el módulo de elasticidad al cortante con la ecuación: $V_s = \sqrt{G/\rho}$.

Con las propiedades geométricas de la cimentación y las características elásticas del subsuelo, se calculan las rigideces asociadas a los efectos ISE.

Finalmente, se obtiene un período de oscilación del sistema equivalente como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los tres períodos calculados,

$$T = (T_0^2 + T_x^2 + T_r^2)^{1/2}.$$

Donde:

T_0 período fundamental de la estructura en la dirección analizada.

T_x período del sistema de translación equivalente.

T_r período del sistema de rotación equivalente.

Otra forma de tomar en cuenta los efectos ISE es modelando la estructura completa y asignando a la cimentación las rigideces asociadas a los efectos de interacción. A un grupo de modelos realizados en el programa ETABS se les agregó un nivel extra debajo de la cimentación para desconectar a la estructura del "suelo" del programa; se agregó una hilera de columnas en el centro de la planta de cimentación y se localizó en ese punto un resorte con seis grados de libertad conectado por trabes de rigidez prácticamente infinita a las bases de muros y columnas. A este resorte se le asignan 6 constantes de rigidez asociadas a los efectos de interacción (2 de cabeceo, 3 de translación y 1 de giro alrededor del eje vertical).

Esta forma de tomar en cuenta la ISE nos permite modelar el sistema suelo-estructura en las direcciones L y T simultáneamente,

además de introducir la posibilidad de giro alrededor del eje vertical. Esto puede ser útil en el caso de estructuras con acoplamientos fuertes entre sus componentes, o en aquellas en las que exista una participación importante de los modos de torsión.

En esta fase se comparan primero los resultados obtenidos a través de esta forma de modelar el sistema suelo-estructura, contra los obtenidos por el criterio del RCDF-87, asignando a ambos modelos las mismas rigideces asociadas a los efectos ISE. Después se modela la estructura de igual forma pero con otro conjunto de rigideces obtenidas por un método de cálculo más fino⁷ y se discuten los resultados.

4.2 Modelos según el criterio del RCDF-87.

Se estudiaron los efectos ISE desde dos enfoques distintos. El primero fue obtener valores asociadas a los efectos ISE, con las fórmulas propuestas por el RCDF-87, más un valor de rigidez para el giro alrededor de un eje vertical obtenido con otro método⁷, debido a que el criterio del RCDF-87 no considera este grado de libertad. Después se modela una cimentación infinitamente rígida asignándole estas mismas rigideces asociadas a efectos ISE como únicas restricciones a los desplazamientos de la cimentación, por medio de la introducción de un elemento resorte; a estos modelos se les llama "de base flexible". El segundo enfoque fue aplicar al pie de la letra el criterio del reglamento a las frecuencias fundamentales de oscilación obtenidas para los modelos de base rígida y obtener entonces las frecuencias modificadas con la interacción.

En el cálculo de las rigideces asociadas a los efectos ISE se obtuvo el valor de G a partir de la fórmula de la velocidad característica de propagación de ondas de cortante, la cual es en este caso igual a 68 m/s, y el valor de la densidad media es de $\rho=0.122 \text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$. Ambos valores fueron obtenidos de un estudio de las propiedades del subsuelo del edificio Jalisco. Por otro lado, el valor de la rigidez de torsión alrededor del eje vertical se obtuvo con el método de Novak⁷.

De esta manera se llegó a los valores siguientes:

$$G=564 \text{ t/m}^2$$

Dirección L.

$$K_d=70.8 \times 10^3 \text{ t/m}$$

$$K_c=41.9 \times 10^6 \text{ t}\cdot\text{m/rad.}$$

Dirección T.

$$K_d=70.8 \times 10^3 \text{ t/m}$$

$$K_c=14.7 \times 10^6 \text{ t}\cdot\text{m/rad.}$$

Rotación.

$$K_r=36.8 \times 10^6 \text{ t}\cdot\text{m/rad.}$$

El cálculo de las masas se hizo con el criterio del reglamento, modificando los totales descontando el valor de la masa y el momento polar de inercia del suelo desplazado por la cimentación. El cálculo se incluye en la Tabla 4.2.1.

Tabla 4.2.1 Obtención de masas para el cálculo de las frecuencias del sistema equivalente suelo estructura según RCDF-87.

NIVEL	MASA [t·s ² /m]	ALTURA [m]	I _c [t·s ² ·m]	LL [m]	TT [m]	IT [t·s ² ·m]	IL [t·s ² ·m]
AZOTEA	68.7	43.20	128270	32.8	19.6	134434	130471
NIVEL-13	63.0	40.05	101062	32.8	19.6	106712	103079
NIVEL-12	63.0	36.90	85790	32.8	19.6	91439	87807
NIVEL-11	63.0	33.75	71768	32.8	19.6	77418	73785
NIVEL-10	63.9	30.60	59863	32.8	19.6	65596	61910
NIVEL-9	63.9	27.45	48173	32.8	19.6	53906	50220
NIVEL-8	63.9	24.30	37751	32.8	19.6	43484	39798
NIVEL-7	64.7	21.15	28926	32.8	19.6	34725	30996
NIVEL-6	64.7	18.00	20951	32.8	19.6	26750	23022
NIVEL-5	64.7	14.85	14260	32.8	19.6	20059	16330
NIVEL-4	66.6	11.70	9119	32.8	19.6	15093	11252
	10.0	11.70	1371	6.5	19.6	1407	1691
NIVEL-E1	30.6	9.10	2538	17.3	19.6	3307	3519
NIVEL-E4	28.3	7.25	1487	16.0	19.6	2091	2392
	10.0	7.25	526	6.5	19.6	563	847
NIVEL-E2	30.6	6.50	1295	17.3	19.6	2064	2276
NIVEL-E5	4.6	4.65	99	16.0	19.6	197	245
	10.0	4.65	217	6.5	19.6	253	537
NIVEL-E3	30.6	3.30	334	17.3	19.6	1103	1315
NIVEL-E6	4.6	2.05	19	16.0	19.6	117	166
	10.0	2.05	42	6.5	19.6	78	363
Cimiento	131.4	0.00	0	39.9	19.6	17394	4207
M. desp.	-315.6	1.65	-859	39.9	19.6	-42633	-10964
Wo[t] =	9922.9				JT y JL=	698187	646226

Wo - M. desplazada= 6825 < 0.7 wo J'T= 655554 J'L= 635262

Como Wo - M.desplazada es menor al 70% de Wo, adoptamos el valor límite

Wo = 6946 [t]

Donde:

Wo es el peso total de la estructura en toneladas

Wo es el peso total corregido de la estructura

Ic es el momento de inercia del nivel con respecto al nivel de desplante

IT e IL son momentos de inercia de masa locales más Ic alrededor de los ejes T y L respectivamente

JT y JL son los momentos de inercia de masa totales de la estructura alrededor de los ejes T y L

J'T y J'L son los momentos de inercia de masa corregidos alrededor de los ejes T y L

El RCDF-87 indica que debe restarse el peso y el momento de inercia de la masa de suelo desplazada por la cimentación, hasta un límite del 30% de los valores totales de peso y momento de inercia con respecto al nivel de desplante de la estructura. En el caso del edificio Jal, el peso de la masa del suelo desplazado es más del 30% del peso total de la estructura por lo que se toma un valor final de peso corregido $W'o=0.7 W_o$; en cambio los momentos de inercia al nivel de desplante varían muy poco al ser reducidos. Las frecuencias obtenidas descontando la masa de suelo desplazada por la cimentación y sin descontarla se incluyen en la tabla 4.2.2

Tabla 4.2.2. Frecuencias obtenidas según el criterio del RCDF-87

Modelo	Masas completas		Masas corregidas	
	L	T	L	T
j4a	0.59	0.40	0.61	0.41
j4ataca	0.55	0.34	0.57	0.34
j4b	0.64	0.44	0.67	0.45
j4btaca	0.61	0.38	0.63	0.39
j3a	0.47	0.40	0.48	0.40
j3ataca	0.38	0.33	0.38	0.33
j3b	0.52	0.44	0.53	0.44
j3btaca	0.43	0.38	0.44	0.38

L- longitudinal, T-transversal

J3: Modelos sin muros de mampostería exteriores
 J4: Modelos con muros de mampostería exteriores
 a : Altos niveles de esfuerzo
 b : Bajos niveles de esfuerzo
 ta: trabes agrietadas
 ca: columnas agrietadas

Como podemos ver, las frecuencias casi no se ven afectadas al tomar en cuenta la masa desplazada, ya que el componente de interacción más importante es el cabeceo, y el momento de inercia de la masa de suelo retirada con respecto a los ejes centroidales de la superficie de desplante es prácticamente despreciable con respecto al momento de inercia de la estructura completa.

Las frecuencias que se comparan más adelante contra los modelos de base flexible son aquellos obtenidos con los valores de masas corregidos.

Los modelos en los que se considera la base flexible, con rigideces asociadas a los efectos ISE calculadas con base en el RCDF-87 son:

- Modelos J3bi y J4bi que corresponden al comportamiento original de la estructura, ya sea con o sin el aporte de los muros exteriores a la rigidez, con módulo de elasticidad de los materiales para bajos niveles de esfuerzo y las secciones brutas de los elementos estructurales.

- Modelos J3btacai y J4btacai correspondientes a las propiedades dinámicas de la estructura, con las secciones agrietadas de los elementos estructurales y los módulos de elasticidad para bajos niveles de esfuerzo.

- Modelos J3ai y J4ai que corresponden a la estructura con las secciones brutas de los elementos estructurales y los módulos de elasticidad de materiales ante bajos niveles de esfuerzo.

-Modelos J3atacai y J4atacai correspondientes a la respuesta de la estructura con secciones agrietadas y módulos de elasticidad para altos niveles de esfuerzo.

Las frecuencias calculadas para estos modelos de base flexible con rigideces asociadas a efectos ISE obtenidas a partir del criterio del RCDF-87 se enlistan en la tabla 4.2.3.

Tabla 4.2.3 Frecuencias calculadas para los modelos de base flexible con rigideces asociadas a efectos ISE según RCDF-87

Modelo	L	T
j4ai	0.63	0.44
j4atacai	0.58	0.36
j4bi	0.70	0.50
j4btacai	0.65	0.42
j3ai	0.49	0.43
j3atacai	0.40	0.33
j3bi	0.55	0.49
j3btacai	0.46	0.40

L- longitudinal, T-transversal

J3: Modelos sin muros de mampostería exteriores

J4: Modelos con muros de mampostería exteriores

a : Altos niveles de esfuerzo

b : Bajos niveles de esfuerzo

ta: trabes agrietadas

ca: columnas agrietadas

i : base flexible con rigideces asociadas según RCDF-87

4.3 Modelos de base flexible con el criterio de Novak

Estos modelos son iguales a los modelos de base flexible de la sección anterior pero con rigideces asociadas a los efectos ISE, calculadas con el programa DYNA2⁷, el cual utiliza el método propuesto por Novak.

Este método de cálculo es más riguroso que el propuesto en el RCDF-87. Este, permite contemplar la presencia de distintos estratos de suelo, y nos da como resultado valores de amortiguamiento del suelo y las rigideces asociadas a 6 grados de libertad correspondientes al sistema suelo-estructura (tres de translación y tres de rotación). El cálculo por el método de Novak de los efectos ISE fue realizado en la Universidad Técnica de Milán, como parte del proyecto de colaboración con el Instituto de Ingeniería⁹. En el Instituto de Ingeniería se decidió adoptar las rigideces asociadas a efectos ISE obtenidas mediante este método, para usarse en los modelos matemáticos, por ser las que mejor se ajustan a las formas modales medidas en las pruebas de vibración ambiental⁸. De la misma manera, en este estudio se adoptaron estos valores para hacer el análisis de la estructura, y se comparan también las frecuencias obtenidas con las de los dos criterios mencionados anteriormente.

Las rigideces asociadas a los efectos ISE, según el criterio de Novak, utilizadas para los modelos de base flexible, son las siguientes:

Dirección L.

$$K_d = 183.5 \times 10^3 \text{ t/m}$$

$$K_c = 50.3 \times 10^6 \text{ t·m/rad.}$$

Dirección T.

$$K_d = 189 \times 10^3 \text{ t/m}$$

$$K_c = 22.2 \times 10^6 \text{ t·m/rad.}$$

Rotación.

$$K_r = 36.8 \times 10^6 \text{ t·m/rad.}$$

Los modelos en los que se considera la base flexible, con rigideces asociadas a los efectos ISE calculadas con el criterio de Novak, son:

- Modelos J3bn y J4bn que corresponden al comportamiento original de la estructura, ya sea con o sin el aporte de los muros exteriores a la rigidez, con módulos de elasticidad para bajos niveles de esfuerzo y las secciones brutas de los elementos estructurales.

- Modelos J3btacan y J4btacan correspondientes a las propiedades dinámicas de la estructura, con las secciones agrietadas de los

7

elementos estructurales y los módulos de elasticidad para bajos niveles de esfuerzo.

- Modelos J3an y J4an que corresponden a la estructura con las secciones brutas de los elementos estructurales y los módulos de elasticidad para bajos niveles de esfuerzo.

- Modelos J3atacan y J4atacan correspondientes a la respuesta de la estructura con secciones agrietadas y módulos de elasticidad para altos niveles de esfuerzo.

Los modelos de base flexible, con las rigideces asociadas a los efectos ISE obtenidas del método de Novak, presentan frecuencias un poco mayores que los modelos a los que se les asignaron las rigideces del RCDF-87. La diferencia es pequeña, sobre todo si se comparan las magnitudes de las rigideces asociadas a los efectos ISE en uno y otro caso. Pero aun así, la diferencia que mantienen con los modelos que consideran la base empotrada son mucho mayores (Tabla 4.3.1).

Tabla 4.3.1. Frecuencias de los tres primeros modos de cada componente en modelos de base flexible con el criterio de Novak y modelos de base empotrada.

Modelo	Modo	L	T	R	Modelo	L	T	R
J3an	1	0.50	0.45	0.52	J3a	0.54	0.50	0.52
	2	1.63	1.52	1.42		1.82	1.56	1.46
	3	3.32	2.77	2.39		3.68	2.89	2.47
J3atacan	1	0.38	0.34	0.41	J3ataca	0.42	0.39	0.38
	2	1.30	1.24	1.10		1.56	1.27	1.12
	3	2.71	2.35	1.86		3.35	2.45	1.92
J3bn	1	0.57	0.52	0.60	J3b	0.63	0.58	0.60
	2	1.90	1.76	1.63		2.10	1.81	1.69
	3	3.70	3.17	2.74		4.25	3.36	2.86
J3btacan	1	0.44	0.42	0.47	J3btaca	0.49	0.46	0.44
	2	1.52	1.44	1.27		1.81	1.48	1.30
	3	3.11	2.71	2.15		3.87	2.86	2.23
J4an	1	0.67	0.46	0.72	J4a	0.77	0.51	0.74
	2	2.24	1.50	2.06		2.48	1.55	2.14
	3	3.63	2.71	3.26		4.57	2.87	3.54
J4atacan	1	0.61	0.37	0.63	J4ataca	0.70	0.40	0.64
	2	2.11	1.24	1.84		2.31	1.26	1.89
	3	3.47	2.33	2.96		4.34	2.43	3.15
J4bn	1	0.75	0.52	0.84	J4b	0.91	0.59	0.87
	2	2.52	1.72	2.37		2.90	1.80	2.51
	3	4.05	3.09	3.66		5.35	3.34	4.16
J4btacan	1	0.70	0.43	0.73	J4btaca	0.82	0.47	0.75
	2	2.39	1.43	2.14		2.71	1.48	2.23
	3	3.87	2.67	3.37		5.09	2.84	3.72

L- longitudinal, T- transversal, R- torsión

J3: Modelos sin muros de mampostería exteriores
J4: Modelos con muros de mampostería exteriores
a : Altos niveles de esfuerzo
b : Bajos niveles de esfuerzo
ta: trabes agrietadas
ca: columnas agrietadas
n : base flexible con rigideces asociadas según Novak

Tabla 4.3.2. Factores de dirección de los tres primeros modos para los modelos de base flexible según Novak y los modelos de base empotrada.

Modelo	L	T	R	Modelo	L	T	R
J3an	5	91	4	J3a	0	76	24
	58	0	42		17	18	65
	38	9	54		83	6	11
J3atacan	1	67	32	J3ataca	1	23	76
	32	17	51		25	61	14
	67	16	17		74	16	9
J3bn	6	90	4	J3b	0	73	26
	71	1	28		17	20	63
	23	9	68		83	7	10
J3btacan	4	73	23	J3btaca	0	23	77
	36	8	56		30	57	14
	60	19	21		70	21	9
J4an	0	99	0	J4a	0	100	0
	98	0	2		1	0	98
	2	1	98		99	0	1
J4atacan	0	99	0	J4ataca	0	100	0
	63	1	37		0	0	99
	37	0	63		100	0	0
J4bn	1	99	0	J4b	0	100	0
	98	1	1		1	0	99
	1	1	98		99	0	1
J4btacan	0	99	0	J4btaca	0	100	0
	96	0	4		0	0	100
	4	1	96		100	0	0

L- longitudinal, T- transversal, R- torsión

J3: Modelos sin muros de mampostería exteriores

J4: Modelos con muros de mampostería exteriores

a : Altos niveles de esfuerzo

b : Bajos niveles de esfuerzo

ta: trabes agrietadas

ca: columnas agrietadas

n : base flexible con rigideces asociadas según Novak

Al introducir los efectos de interacción, los factores de dirección se modifican en forma consistente. El acoplamiento entre las direcciones T y R se reduce notablemente en los modelos con efectos ISE, salvo en J3atacan. El acoplamiento entre los componentes T y L disminuye; y sobre todo, aparece un fuerte acoplamiento entre los componentes L y R, principalmente en los modelos en donde se consideran las secciones agrietadas. Este acoplamiento ha sido identificado en las pruebas de vibración ambiental y no había sido reproducido en los modelos matemáticos hasta que se tomaron en cuenta los efectos ISE.

4.4 Comentarios

Las frecuencias fundamentales obtenidas con el criterio de interacción del RCDF-87 varían con respecto a las frecuencias de los modelos de base empotrada entre un 7% y un 30% (Tabla 4.4.1); las diferencias más grandes se presentan en aquellos modelos en donde las frecuencias de oscilación son mayores (J4b, J4a, J4btaca).

Tabla 4.4.1. Cocientes de frecuencias fundamentales entre los modelos: base empotrada / base flexible-rigideces RCDF-87 (BE/BF) y base flexible-rigideces RCDF-87 / criterio RCDF-87 (BF/ RCDF-87).

Modelo	(BE/BF)		(BF/ RCDF-87)	
	L	T	L	T
J4a	1.23	1.16	1.03	1.07
J4ataca	1.19	1.09	1.02	1.06
J4b	1.31	1.20	1.04	1.10
J4btaca	1.25	1.12	1.03	1.08
J3a	1.12	1.15	1.02	1.07
J3ataca	1.04	1.12	1.05	1.03
J3b	1.14	1.19	1.04	1.10
J3btaca	1.05	1.14	1.06	1.05

Este cambio en las frecuencias fundamentales de oscilación al introducir los efectos ISE es importante para el análisis del edificio Jal, ya que la variación en las frecuencias modifica la respuesta sísmica. Por ejemplo, en el caso del modelo J4b en la dirección longitudinal, el cambio en la frecuencia fundamental de 0.91 Hz a 0.69 Hz para los modelos según RCDF-87 y de 0.91 a 0.75 Hz según Novak, acerca a la estructura al periodo dominante del suelo. El no tomar en cuenta los efectos ISE puede llevar a un error importante en la estimación de las fuerzas sísmicas actuantes sobre el edificio.

Se encontró que las frecuencias obtenidas de los modelos que incorporan los efectos ISE con ambos criterios de base flexible, son bastante similares a las obtenidas por el método simplificado del reglamento, variando en el peor de los casos en un 10%. Hay que notar que el criterio del RCDF-87 arroja, para todos los casos, frecuencias menores que las observadas en los modelos de base flexible.

Además, esta comparación muestra que, aún cuando la diferencia en los resultados entre criterios distintos para integrar los efectos ISE al análisis no es tan importante, el pasar por alto los efectos de interacción sí puede introducir errores importantes en los modelos. Como era de esperarse, las frecuencias de los modelos de base flexible con rigideces asociadas a efectos ISE calculadas con el criterio del RCDF-87 son menores para todos los casos a las obtenidas con las rigideces de Novak.

Al considerar la participación de los efectos ISE cambian las formas modales así como las frecuencias. En las Figuras 4.4.1 y 4.4.2 se muestra una comparación entre las formas modales de los modelos J4b y J3ataca, con base rígida, contra sus equivalentes J4bn y J3atacan, con base flexible.

El acoplamiento entre los componentes de vibración cambió al introducir los efectos ISE. En los modelos de base flexible disminuye el acoplamiento entre los componentes T y R, mientras crece el acoplamiento entre L y R. La interacción entre la rotación y el desplazamiento en la dirección longitudinal ha sido identificado en pruebas de vibración ambiental⁸.

En las Figuras 4.4.3, 4.4.4 y 4.4.5 se muestran los tres primeros modos de los componentes L, T y R, respectivamente. Estas formas modales corresponden al modelo J4atacan, en donde se considera la base flexible, con las rigideces del criterio de Novak.

Dirección L y dirección T

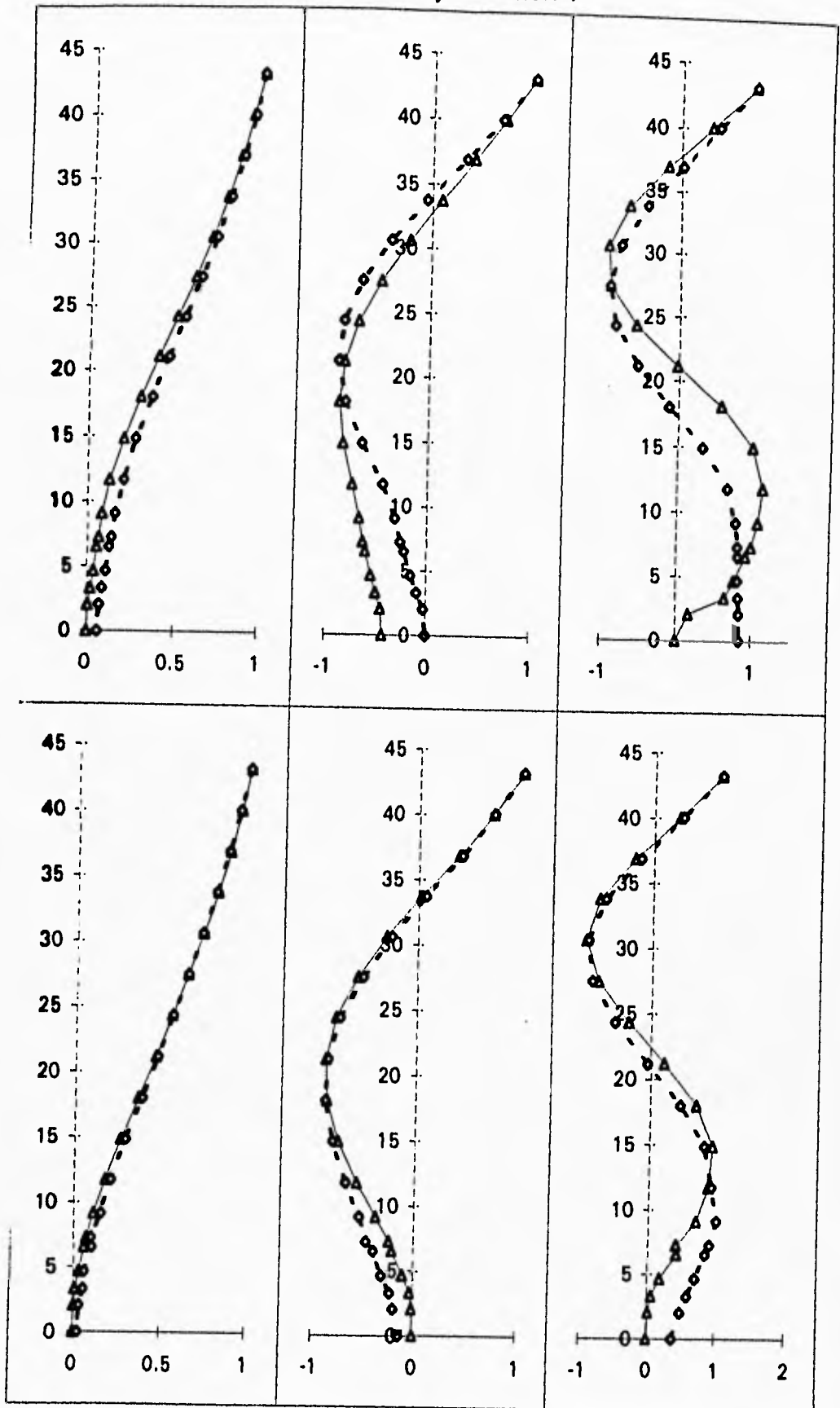


Figura 4.4.1 Formas modales de los modelos J4b y J4bn.

Dirección L y dirección T

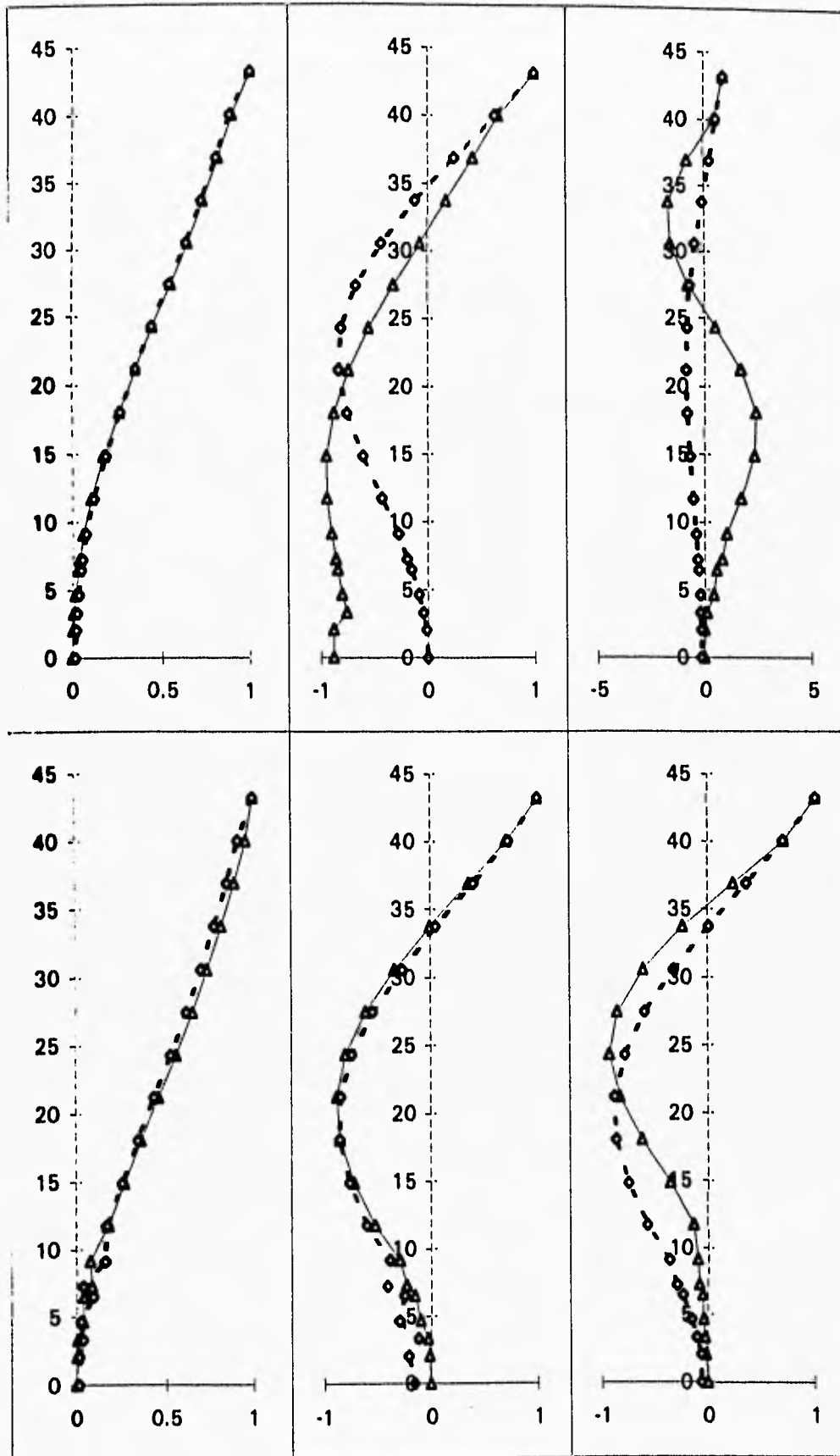


Figura 4.4.2. Formas modales de los modelos J3ataca y J3atacan

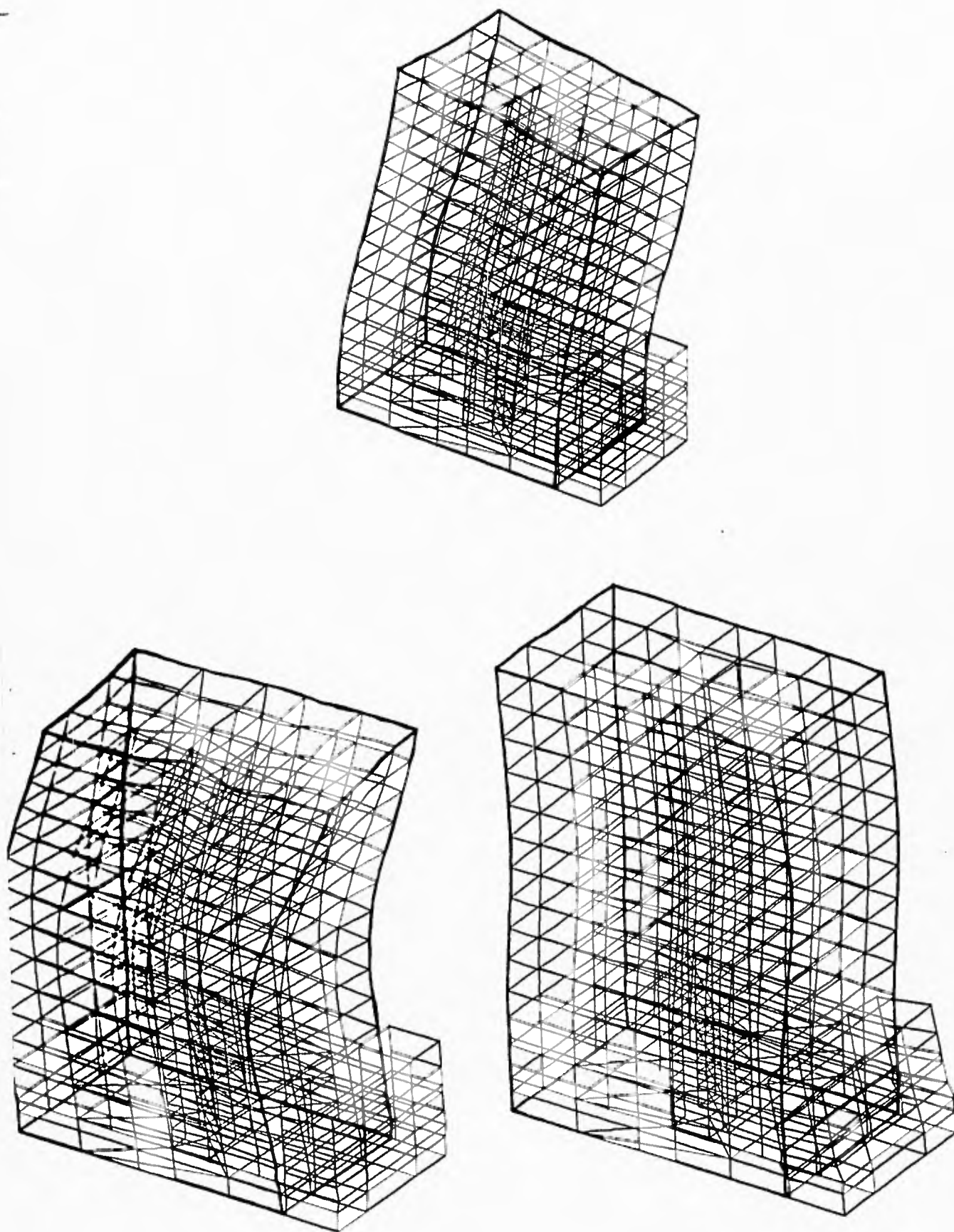


Figura 4.4.3 Deformadas de los tres primeros modos en L.

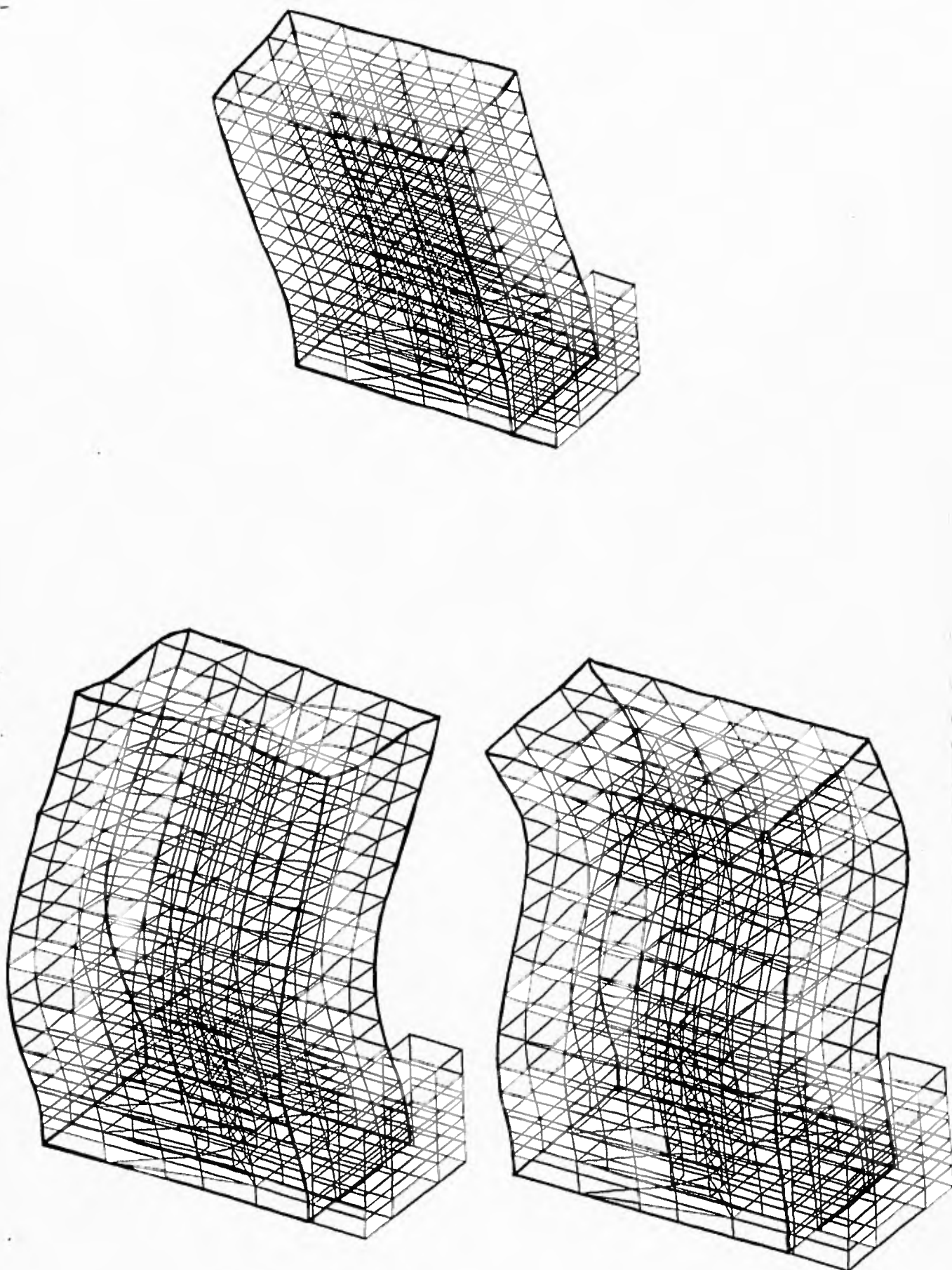


Figura 4.4.4 Deformadas de los tres primeros modos en T.

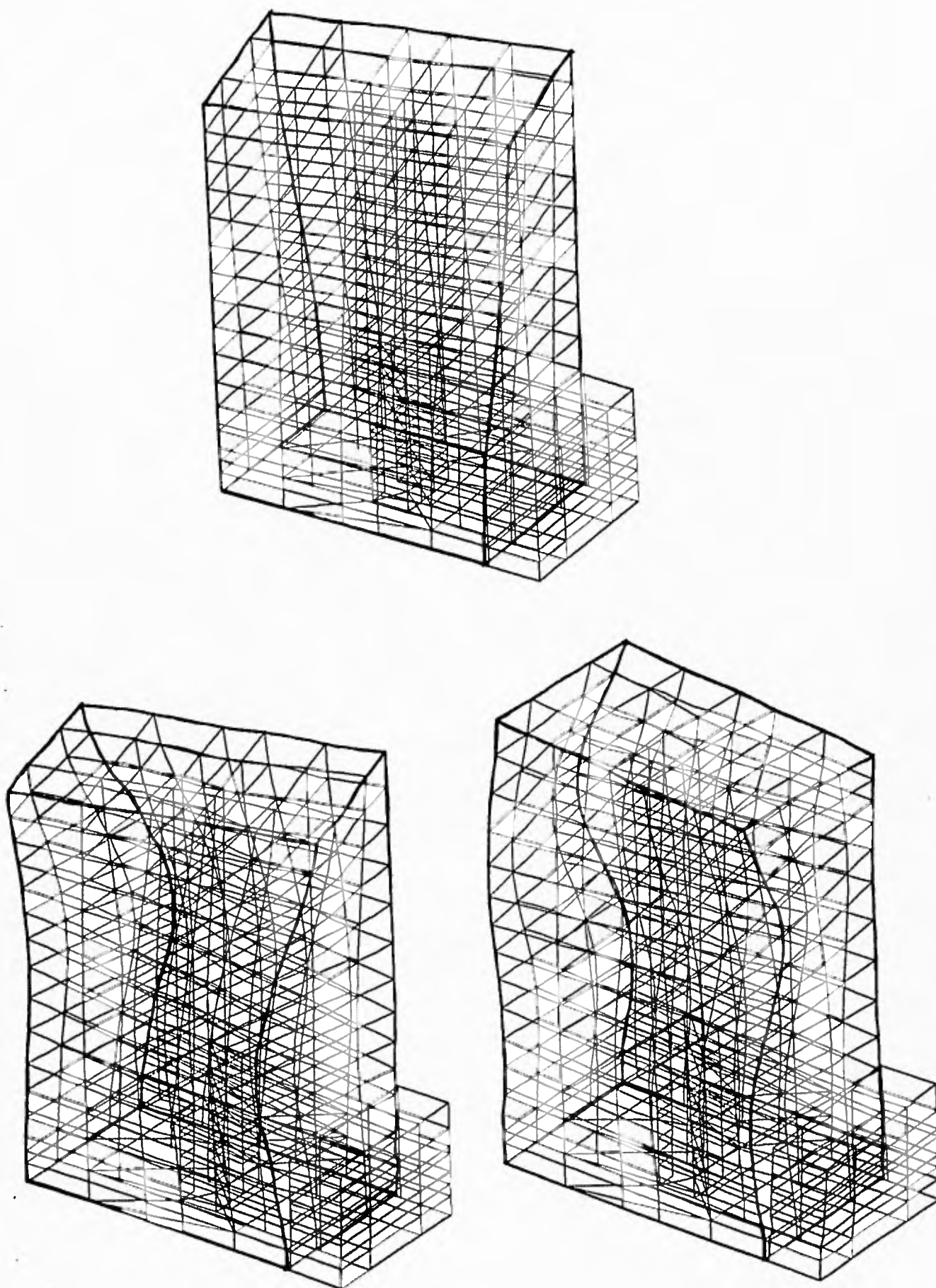


Figura 4.4.5

5 Evaluación del comportamiento de algunos elementos estructurales

5.1 Introducción.

En esta etapa se escogieron tres modelos de la estructura para hacer un análisis ante cargas verticales y cargas sísmicas. Los modelos utilizados incluyen a los efectos ISE según el criterio de Novak. Estos son: J3an, J4an y J3atacan.

Para la aplicación de cargas se hicieron las siguientes consideraciones:

- El factor de carga igual a uno
- Las cargas verticales, vivas y muertas, fueron las mismas que se utilizaron en el cálculo de las masas de losas; más cargas lineales y puntuales para estimar el peso de muros y columnas
- Las cargas sísmicas se obtuvieron con un análisis modal espectral, haciendo uso de un espectro de respuesta calculado a partir del registro sísmico de la estación SCT del 19 de septiembre de 1985 (dirección N-S). Las respuestas asociadas a las frecuencias del sistema suelo estructura para este espectro llegan a ser hasta tres veces superiores a las consideradas en el sismo de análisis definido en el RCDF-77 (Figuras 5.1.1 y 5.1.2) para el rango de frecuencias de los modelos estudiados.

- El espectro se reduce con un factor de ductilidad $Q=4$, para ser consecuentes con el valor utilizado en el análisis de diseño de la estructura
- Las aceleraciones del espectro reducido se aplica en un 100% en las direcciones T y L
- Se aplicó el criterio de combinación cuadrática completa (CCC) de fuerzas sísmicas modales, debido al acoplamiento entre componentes.
- La superposición de elementos mecánicos se obtuvo como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (RCSC).

En la práctica común un análisis completo consiste en aplicar 100% y 30% del espectro en dos direcciones ortogonales y hacer una serie de análisis variando el ángulo

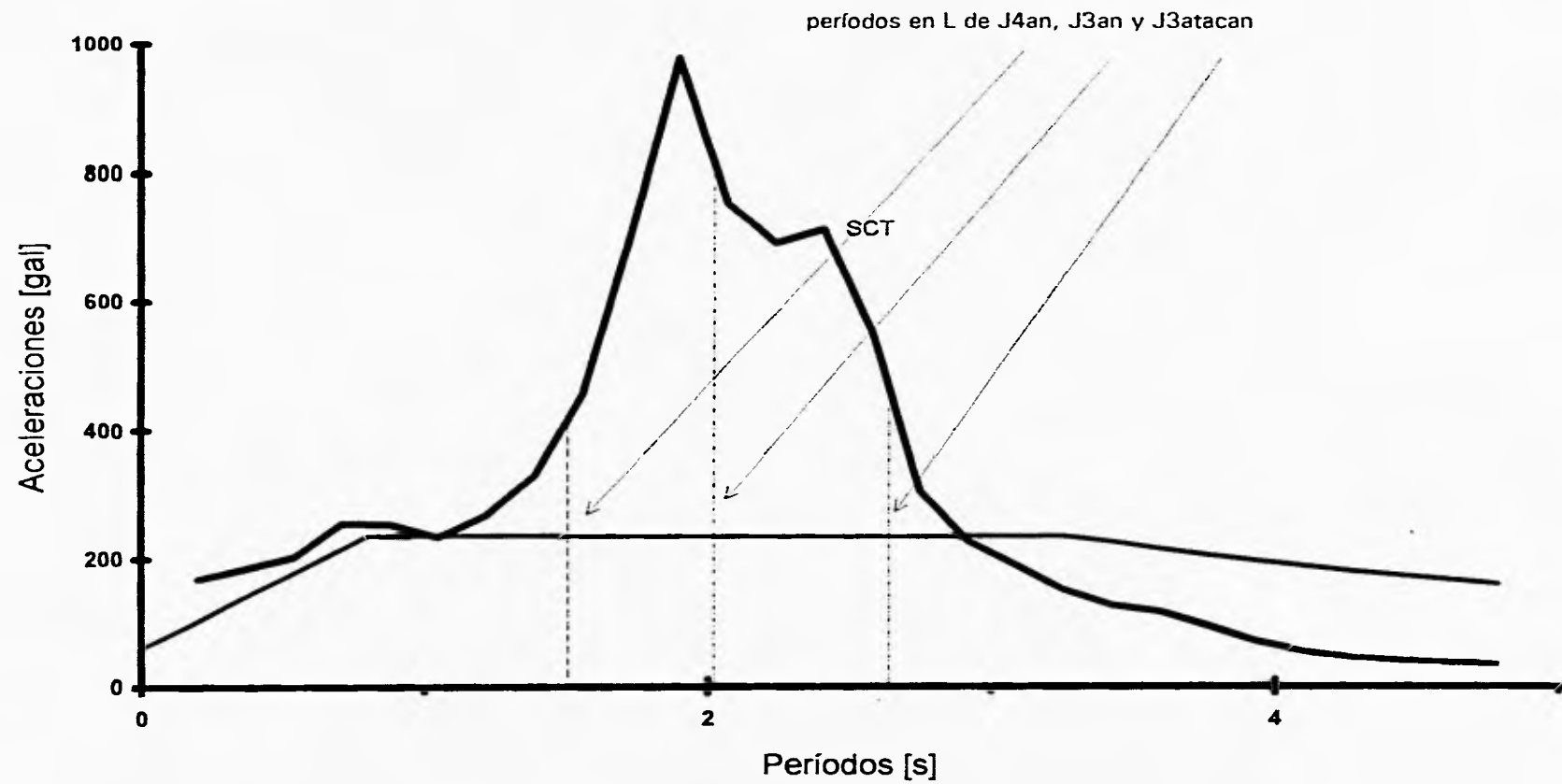


Figura 5.1.1. Espectro de respuesta del terremoto del 19 de sep. de 1985 en SCT y espectro de diseño del RCDF-77, con períodos del modo fundamental en L de los modelos analizados.

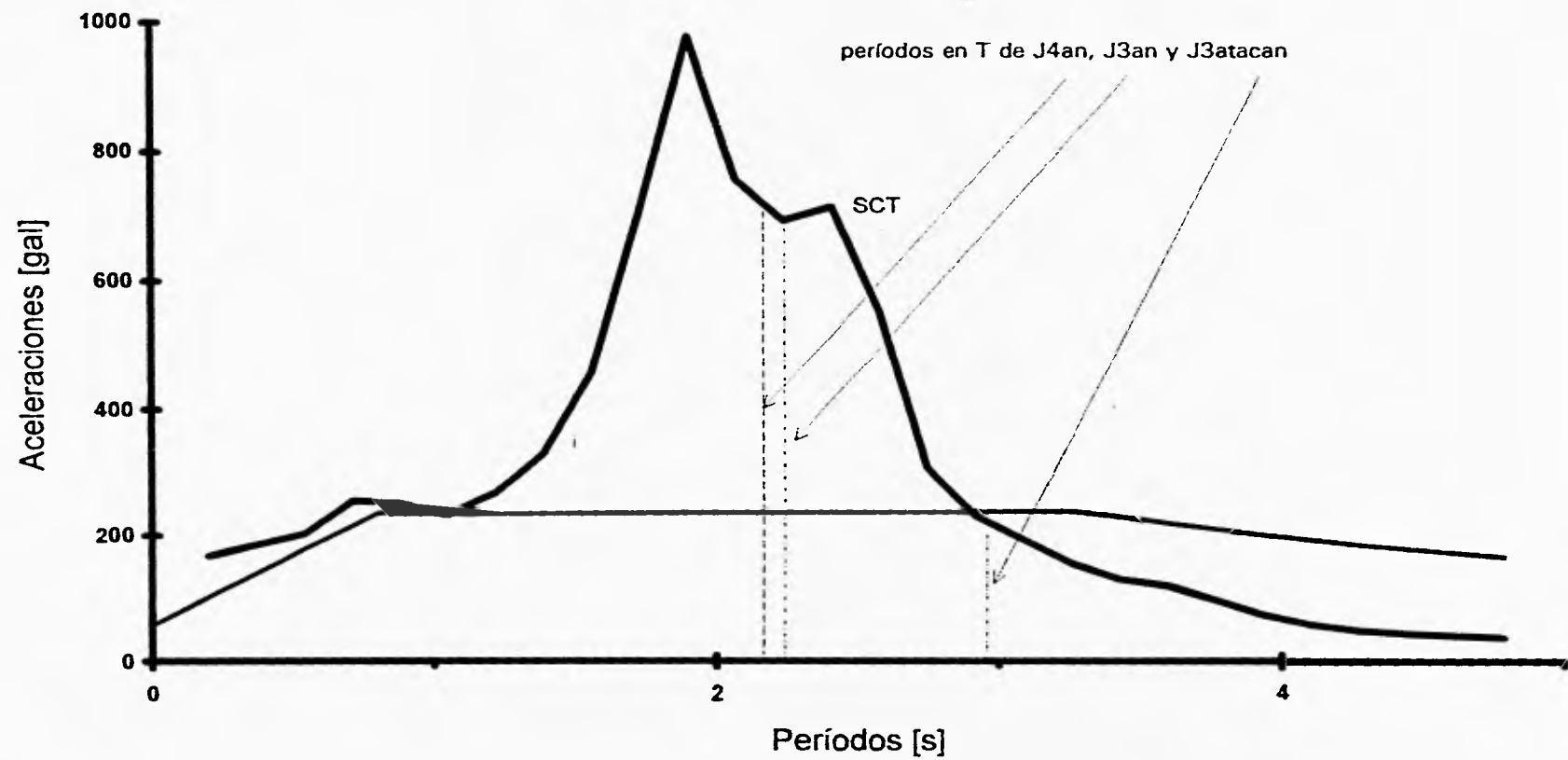


Figura 5.1.2. Espectro de respuesta del terremoto del 19 de sep. de 1985 en SCT y espectro de diseño del RCDF-77, con períodos del modo fundamental en T de los modelos analizados.

5.2 Modelo J4an

A continuación en la Tabla 5.2.1 se muestran los cortantes basales en cada una de las direcciones, el cortante basal total, y la relación entre los cortantes basales y el peso total de la estructura. Estos valores se obtienen del espectro sin reducir por el factor de ductilidad.

Tabla 5.2.1 Cortante basal en el modelo J4an

Dirección	Cortante basal [t]	Cortante basal/W total
L	2576	0.26
T	4716	0.47
$(L^2+T^2)^{1/2}$	5374	0.54

La diferencia en los cortantes basales que se observan en ambas direcciones es consecuencia de sus frecuencias fundamentales. La presencia de los muros externos de mampostería en la dirección L aleja a la frecuencia fundamental de la estructura en esta dirección de la frecuencia natural de oscilación del suelo, reduciendo las fuerzas sísmicas. Debido a esto, el principal objeto de revisión serán los muros de mampostería, ya que su participación es la única diferencia que tiene con el modelo que le sigue en rigidez, el J3an, que es exactamente igual pero sin la participación de los muros perimetrales.

Utilizando los valores del módulo de elasticidad y módulo de cortante, así como las fórmulas que proporciona el RCDF-87, se calcularon las distorsiones alcanzadas en la condición de resistencia última en muros de mampostería confinada, para las distintas

geometrías de los muros exteriores. Con estas distorsiones máximas calculadas, respaldados por resultados obtenidos en diversos estudios sobre muros de mampostería confinada, se definió una distorsión envolvente a partir de la cual los muros de mampostería dejan de participar dentro de la rigidez de la estructura¹⁰. Esta distorsión se fijó en un 0.21 %; este valor representa el doble de la distorsión en donde comienza el comportamiento inelástico de los muros. Descartar a partir de esta distorsión la participación de los muros se justifica ya que su contribución en rigidez y resistencia es despreciable, según lo muestran pruebas experimentales¹⁰.

Los valores de las distorsiones de entrepiso provocadas por las fuerzas del espectro reducido se enlistan en la tabla 5.2.2.

Tabla 5.2.2 Distorsiones del modelo J4an

Nivel	L [%]	T [%]
Azotea	0.20	0.56
Nivel-13	0.22	0.62
Nivel-12	0.25	0.77
Nivel-11	0.26	0.83
Nivel-10	0.28	0.92
Nivel-9	0.30	0.98
Nivel-8	0.30	0.98
Nivel-7	0.30	1.01
Nivel-6	0.29	1.02
Nivel-5	0.26	0.92
Nivel-4	0.25	0.79
Nivel-E1	0.23	0.82
Nivel-E4	0.23	0.53
Nivel-E2	0.22	0.70
Nivel-E5	0.19	0.43
Nivel-E3	0.07	0.25
Nivel-E6	0.04	0.12

Como podemos ver, salvo en los dos primeros niveles de sótano en la dirección L, las distorsiones de entrepiso sobrepasaron el límite fijado para incluir la participación de la mampostería. Con estos datos es fácil deducir, sin tener que revisar las resistencias de los muros uno a uno, que los muros de mampostería en prácticamente todos los niveles sobrepasaron su resistencia última, o dicho de otra forma, alcanzaron un nivel de daño tal que puede despreciarse su participación en la resistencia de cargas laterales a partir de éste. Este hecho es consecuente con los daños reportados en una inspección del edificio realizada en 1985².

Para esta revisión se hace uso de las distorsiones correspondientes al espectro reducido debido a que el cálculo de la distorsión máxima de los muros se hace a partir del cortante último resistente, que debe compararse con las fuerzas inducidas por el espectro reducido por el factor Q .

Una vez descartada la participación de los muros de mampostería a la rigidez y resistencia del modelo, sus condiciones son exactamente las consideradas por J3an.

5.3 Modelo J3an

A continuación en la Tabla 5.3.1 se muestran los cortantes basales en cada una de las direcciones, el cortante basal total, y la relación entre los cortantes basales y el peso total de la estructura. Estos valores se obtienen del espectro sin reducir por el factor de ductilidad.

Tabla 5.3.1 Cortantes basales en el modelo J3an

Dirección	Cortante basal [t]	Cortante basal/W total
L	4624	0.47
T	5436	0.55
$(L^2+T^2)^{1/2}$	7136	0.72

Los valores de cortante basal sobre el peso total de la estructura nos muestran lo grandes que son las fuerzas sísmicas generadas por el espectro. Estos valores son consecuentes con la proximidad entre las frecuencias de los modos fundamentales y la frecuencia natural de oscilación del suelo.

A diferencia del modelo J4an, los cortantes basales en las direcciones L y T son muy cercanos entre sí, alcanzando el cortante en la dirección L el 47% del peso total de la estructura, contra el 26 % para el caso del modelo que incluye la participación de los muros de mampostería.

Una vez más se menciona que el análisis al que se someten estos modelos es más severo que el análisis de diseño. Estimando rápidamente los coeficientes sísmicos que se obtienen del espectro de

diseño del RCDF-77, correspondientes a la respuesta de los modos fundamentales y comparando estos con los coeficientes sísmicos utilizados en este análisis (Figuras 5.1.1 y 5.1.2), obtenemos una relación de 3.25:1 para la dirección L y de 2.7:1 para la dirección T. Esto se debe a la relación de las magnitudes del espectro de diseño y el espectro de SCT del 19 de septiembre de 1985, para las frecuencias de los modos fundamentales.

5.4 J3atacan

A continuación en la Tabla 5.4.1 se muestran los cortantes basales en cada una de las direcciones, el cortante basal total, y la relación entre los cortantes basales y el peso total de la estructura. Estos valores se obtienen del espectro sin reducir por el factor de ductilidad.

Tabla 5.4.1 Cortantes basales en el modelo J3atacan

Dirección	Cortante basal [t]	Cortante basal/W total
L	3652	0.37
T	2580	0.26
$(L^2+T^2)^{1/2}$	4471	0.45

Este modelo es más flexible que los dos anteriores y sus frecuencias fundamentales se alejan de la frecuencia dominante del terreno. Esto ocurre principalmente en la dirección transversal, en donde el cortante basal se reduce a una cuarta parte del peso total de la estructura.

En forma general, debido a que el cortante mayor ocurre en la dirección longitudinal de la estructura, las fuerzas sobre los elementos estructurales se reducen notablemente con respecto a las que se presentan en los dos modelos anteriores.

En este caso, las magnitudes de las respuestas en el espectro de diseño y el espectro de SCT, correspondientes a las frecuencias fundamentales de la estructura, son más parecidas. Para la dirección L esta relación es de aproximadamente 1.3:1 y en la dirección T de

0.86:1. Este último valor nos indica que en el espectro de SCT, la respuesta en la dirección transversal es menor a la respuesta de diseño.

5.5 Revisión de fuerzas sobre los elementos

5.5.1 Revisión de columnas

En la Tabla 5.5.1 se muestra la comparación entre las resistencias a cortante (Vúltimo, y Vcr: cortante resistente de la sección de concreto) calculadas según el RCDF-77 y los cortantes actuantes obtenidos con el programa ETABS.

Tabla 5.5.1 Revisión de columnas por cortante

Dirección mayor					Dirección menor				
Columna		Vcr	Vúltimo	Vactuante	Columna		Vcr	Vúltimo	Vactuante
8	nivel-10	J4an	25.92	42.13	8	nivel-10	J4an	25.54	37.52
		J3an	24.64	40.85			J3an	24.28	36.26
		J3atacan	26.15	42.36			J3atacan	25.76	37.74
	nivel-7	J4an	38.98	77.32		nivel-7	J4an	38.4	65.38
		J3an	37.17	75.51			J3an	36.62	63.60
		J3atacan	40.19	78.53			J3atacan	39.59	66.57
	nivel-E3	J4an	56.96	100.98		nivel-E3	J4an	49.31	81.97
		J3an	55.03	99.05			J3an	47.64	80.30
		J3atacan	61.06	105.08			J3atacan	52.86	85.52
15	nivel-10	J4an	25.76	41.97	15	nivel-10	J4an	25.38	37.36
		J3an	32.55	48.76			J3an	32.07	44.05
		J3atacan	26.6	42.81			J3atacan	26.21	38.19
	nivel-7	J4an	39.62	77.96		nivel-7	J4an	39.03	66.01
		J3an	39.13	77.47			J3an	38.55	65.53
		J3atacan	39.77	78.11			J3atacan	39.18	66.16
	nivel-E3	J4an	56.32	100.34		nivel-E3	J4an	48.75	81.41
		J3an	56.04	100.06			J3an	48.51	81.17
		J3atacan	57.57	101.59			J3atacan	49.79	82.45

* El cortante actuante excede la capacidad de la sección de concreto

** El cortante actuante supera la capacidad última del elemento

Como podemos ver en la Tabla 5.5.1, salvo la columna 8 del nivel 10 en el modelo J3an, todas las columnas resisten las fuerzas cortantes si se toman como válidas las fórmulas de resistencia que proporciona el RCDF-77, y solo en algunos de los casos restantes, el cortante actuante supera a la capacidad resistente de la sección de concreto.

Los mayores índices de fuerzas actuantes sobre fuerzas resistentes, se concentran en los niveles superiores de los dos modelos más rígidos J4an y J3an.

Por otra parte, el acero de los estribos excede el límite elástico máximo establecido para el acero de refuerzo transversal. En las normas técnicas complementarias para estructuras de concreto del RCDF-77 se establece que el límite elástico del acero de refuerzo transversal no deberá exceder los 4200 kg/cm². En los planos estructurales del edificio se especifica un límite elástico del acero de refuerzo: $f_y=6000 \text{ kg/cm}^2$.

Por otra parte, en el RCDF-77 la separación máxima entre estribos para refuerzo por cortante en columnas está pobremente acotada, cuando los cortantes actuantes no superan el cortante resistente del concreto (V_{cr}), y esto lleva, en el caso del edificio Jal, a tener separaciones entre estribos de columnas que varían en su mayoría entre $0.5 d$ y d , donde d es el peralte efectivo de la sección de concreto.

La gran separación existente entre estribos se justifica al calcular la separación máxima del acero transversal, con el valor de su límite elástico ($f_y=6000 \text{ kg/cm}^2$). Esta deficiencia del RCDF-77 en el detallado del acero de refuerzo permite la aparición de un plano de falla por corte

en la columna, entre dos estribos consecutivos, donde la única resistencia a la falla es la aportada por el concreto. En las Normas Técnicas Complementarias para estructuras de concreto del RCDF-87 se especifica, a diferencia de la versión anterior, que la separación máxima entre estribos de trabes y columnas será de **0.5d**.

Consistentemente con el dictamen, encontramos que los lugares en donde los cortantes actuantes superan a los cortantes resistentes por el concreto (V_{cr}), se concentran en los pisos superiores al Nivel-6, y en el caso de los modelos más rígidos (J4an y J3an). Lo anterior sugiere que los elementos estructurales, al degradarse la rigidez inicial, se encuentran ante solicitaciones menores que aquellas que se presentan en los modelos J4an y J3an.

Como se menciona en la descripción del modelo en el capítulo 2, el acero de refuerzo longitudinal se concentra en paquetes de varillas en las esquinas de la sección; esta condición generalmente implica una falta de adherencia que suele impedir que la sección funcione como un elemento continuo¹².

5.5.2 Revisión de trabes

En la Tabla 5.5.2 se muestran las fuerzas actuantes (V y M) y las fuerzas resistentes de una trabe central (Vúltimo y Mu), calculadas a partir de las fórmulas de resistencia que proporciona el RCDF-77.

Tabla 5.5.2 Momentos y cortantes resistentes y actuantes al centro y a tres cuartas partes del claro.

	Modelo	Vcr	Vúltimo	V (l/2)	V (3/4 l)		Mu (l/2)	M (l/2)	Mu (3/4 l)	M (3/4 l)
Nivel-10	J3an	20.68	32.08	20.18	26.38	*	16.17	7.77	68.41	38.81
	J3atacan			10.18	16.38			5.11		17.71
Nivel-7	J3an	20.68	32.08	26.48	32.64	*	16.5	7.83	68.75	47.44
	J3atacan			11.53	17.7			4.89		19.07
Nivel-5	J3an	22.66	34	22.62	28.8	*	16.62	8.78	69.02	41.65
	J3atacan		34	8.2	14.38			5.25		14.1

* El cortante actuante excede la capacidad del concreto

Se revisan trabes únicamente en los modelos que no toman en cuenta la participación de los muros de mampostería, ya que éstos reducen en forma importante la distorsión y en de esta forma, las fuerzas actuantes sobre las trabes.

En la tabla se puede apreciar que los cortantes actuantes únicamente superan a los cortantes resistentes de la sección de concreto en el caso del modelo más rígido, el modelo J3an.

Al igual que en el caso de las columnas, la mayoría de las secciones son suficientes para resistir las fuerzas actuantes; pero el acero no cumple con la disposición del reglamento sobre el valor máximo del límite elástico. En las notas para losa reticular se especifica

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

una separación entre estribos de 40 cm, y un acero de refuerzo con límite elástico de 6000 kg/cm². De la misma forma que sucede en el caso de las columnas, el acero transversal tiene un límite de fluencia de 6000 kg/cm².

6 Comentarios finales

6.1 Modelado matemático

Para modelar una estructura de losas planas en un programa de análisis como el ETABS o cualquier otro programa que analice marcos tridimensionales, es necesario tomar en cuenta la rigidez fuera de su plano de la losa, definiendo trabes equivalentes entre las columnas para formar marcos. El problema al definir estos elementos es ponderar correctamente la porción equivalente de la losa que tenga la misma rigidez, principalmente a la flexión, que la que se presenta en la estructura. En los modelos realizados, se calculó el ancho equivalente en función del peralte de la losa y la dimensión de la columna en la dirección perpendicular al eje de la trabe, con la fórmula propuesta por el RCDF-87. El modelado de las trabes equivalentes se complica aún más si consideramos la presencia de los capiteles y la existencia forzosa de una zona de transición entre el capitel y el ancho equivalente de losa reticular.

Por otra parte, en el proceso de armado y desarmado de los distintos modelos, pudo observarse que ante leves variaciones en las propiedades de las trabes equivalentes (menos de 5 % de variación en momentos de inercia y alargando levemente las porciones de capitel), las propiedades dinámicas globales de la estructura son prácticamente iguales; por lo que se advierte que para fines de análisis es poco relevante.

La importancia de los componentes de torsión identificados en la estructura, se debe a excentricidades de las rigideces, provocadas por

la leve asimetría en planta de la disposición de los elementos estructurales, y, en menor grado, a la existencia de masas excéntricas en los niveles de estacionamiento y azotea. Desde los primeros modelos de la estructura se obtuvieron frecuencias consistentes con las medidas en pruebas de vibración ambiental, y en los modelos donde no se considera la participación de los muros de mampostería, se observó un leve acoplamiento entre los componentes de desplazamiento y el de torsión; este acoplamiento concuerda con los resultados obtenidos en las pruebas mencionadas.

Al cambiar la versión del programa utilizado, el único factor relevante que afectó la conversión fue la introducción de los elementos piso para modelar las rampas. Estos elementos aumentaron levemente las frecuencias de vibración y provocaron un gran acoplamiento entre los componentes de traslación y el de rotación. Se demostró que este fuerte acoplamiento es consecuencia de la disposición de las rampas de estacionamiento, aunada a la infinita rigidez en su plano que asigna el programa a los elementos piso. En consecuencia, se recomienda que este tipo de elemento sea utilizado a conciencia, evaluando la pertinencia de considerar un plano tan rígido para modelar un elemento estructural real.

En el análisis de sensibilidad se encontró que las variables más relevantes son, en orden de importancia:

1. La participación de los muros de mampostería exteriores,
2. Los módulos de elasticidad de materiales para altos y bajos niveles de esfuerzo, y
3. La sección agrietada en trabes.

La sección agrietada en columnas resultó ser poco relevante debido a los altos valores del momento de inercia obtenidos para la sección agrietada; estos valores son consecuencia de la disposición en paquetes de varillas del acero de refuerzo longitudinal, por lo que, es razonable suponer que la sección agrietada en columnas fue subestimada.

La sección agrietada en trabes equivalentes se aplicó únicamente a los tramos centrales por disponerse de una sola constante para afectar al momento de inercia de la trabe. Esta consideración parece razonable después de haber comprobado en la inspección de la estructura, que los capiteles no presentan agrietamiento.

Al aplicar el criterio del RCDF-87 para calcular las rigideces asociadas a los efectos ISE se obtienen valores en general menores a los obtenidos con el método de Novak, y en el caso de los desplazamientos horizontales, llegan a representar únicamente el 37% de estos, por lo tanto, los modelos de base flexible con las rigideces

asociadas a los efectos ISE calculadas con el método de Novak presentan frecuencias mayores.

Por otra parte, al comparar las frecuencias de los modelos de base flexible que utilizan las rigideces asociadas a efectos ISE calculadas con el reglamento, contra las frecuencias fundamentales modificadas por efectos de interacción según el RCDF-87, observamos que son prácticamente iguales. No obstante las diferencias entre las distintas formas de considerar la participación de los efectos ISE, la concordancia entre las frecuencias calculadas con los tres métodos distintos es bastante buena, y la variación máxima entre los tres criterios (que se presenta en el modelo más rígido en la dirección L) es de 11%; mientras que la máxima variación entre frecuencias del mismo modelo con base empotrada y base flexible es de 32 %.

Al introducir los efectos ISE en los modelos de base empotrada las condiciones de acoplamiento entre los componentes modales de la estructura cambian. El acoplamiento existente entre los componentes T y R, en los modelos de base empotrada, es sustituido por un acoplamiento entre los componentes L y R; esta condición es consistente con las propiedades dinámicas de la estructura identificadas en pruebas de vibración ambiental.

Estos dos últimos párrafos nos ilustran la importancia que tiene el tomar en cuenta los efectos ISE para modelar las propiedades dinámicas de la estructura.

6.2 Comportamiento de la estructura

A continuación se emiten algunos de los comentarios que surgen del proceso de análisis y la revisión de la estructura:

El análisis al que se somete la estructura en este estudio es más severo que el análisis de diseño; aún cuando se respetó el factor de comportamiento sísmico original, el espectro aplicado es mucho mayor al espectro de diseño.

En cuanto al daño estimado con base en el análisis, puede decirse que se logró una concordancia satisfactoria con el dictamen del daño de la estructura tras el sismo de septiembre de 1985.

Por una parte, se identifica el daño a los muros perimetrales en el modelo J4an a través de las fuertes distorsiones de entrepiso que se presentan en la dirección L, a pesar de la participación de los muros de mampostería exteriores. Además, las fuerzas incidentes sobre las trabes equivalentes, calculadas en el análisis del modelo J3an, no superan a las resistencias últimas de los tramos considerados.

En el caso de las columnas es un poco más difícil identificar el daño ocurrido. En la revisión que se llevó a cabo de algunas columnas centrales del modelo J3an, se observa en forma persistente que los cortantes resistentes de la sección de concreto son superados por los cortantes actuantes; sin embargo, únicamente en la columna 8 del nivel 10 el cortante actuante supera al cortante último de la columna, y en su mayoría, las fuerzas actuantes representan cerca del 70% de las resistentes.

Se debe tener en cuenta que en el dictamen se indica que casi todas las columnas centrales ubicadas por encima del nivel 6

presentaron agrietamiento por cortante, así que, aunque los cortantes en las columnas no alcanzaron la magnitud del cortante último, sí alcanzan valores superiores al cortante resistente de la sección de concreto (V_{cr}).

Cabe mencionar tras este último punto que el detallado del acero de refuerzo tanto transversal como longitudinal, si bien no viola las disposiciones del reglamento emitido en 1977, sí presenta ciertas deficiencias que han sido corregidas en el reglamento actual.

Atendiendo a las características dinámicas de los tres modelos, a la estructuración del edificio Jal y a las solicitaciones estructurales calculadas en el análisis, se puede delinear una historia de comportamiento de la estructura durante el sismo del 19 de septiembre de 1985.

Se puede considerar que J4an modela el comportamiento de la estructura en condiciones originales ante un sismo. De este primer modelo de la estructura se concluyó, sin hacer una revisión más profunda, que al aplicar el espectro de SCT a la estructura esta alcanza niveles de distorsión suficientes para que los muros de mampostería exteriores se dañen de tal forma que dejen de participar en su rigidez y resistencia; quedando entonces en condiciones cercanas a las modeladas por J3an.

J3an es el modelo que se encuentra en las peores condiciones ante el sismo por ser sus tres frecuencias fundamentales muy cercanas a 0.5 Hz, valor que corresponde a la frecuencia natural de oscilación del suelo y por lo tanto al pico del espectro de respuesta.

Finalmente, al agrietarse la estructura y disminuir su rigidez, las frecuencias fundamentales se alejan de la frecuencia dominante del

terreno quedando en condiciones parecidas a las modeladas por J3atacan. La respuesta de este modelo ante el espectro de SCT es mucho menor a las de J4an y J3an, presentando solicitaciones muy por debajo de las resistencias de los elementos estructurales.

Por otra parte, es bastante probable que las frecuencias de oscilación de la estructura durante y después del sismo de 1985 hayan sido aun menores a las estimadas por este modelo, y en consecuencia, también la respuesta debe haber sido menor.

Después de comparar las frecuencias calculadas para el modelo J3atacan contra las frecuencias del edificio reestructurado medidas durante la ocurrencia de un sismo de magnitud moderada, es evidente que se está sobrestimando la rigidez de la estructura". Mientras la frecuencia calculada para el primer modo en la dirección T del modelo menos rígido, J3atacan, es de 0.36 Hz, tenemos que la frecuencia medida en la misma dirección de la estructura reforzada es de únicamente 0.25 Hz. Este hecho merece que se haga una reflexión sobre los factores posiblemente relevantes que fueron omitidos en el análisis para que sean considerados en trabajos posteriores.

En primer lugar, es necesario idear algún criterio para calcular las secciones agrietadas reales de la estructura para la disposición del acero de refuerzo longitudinal. Un método sencillo para llevar a cabo este cálculo, sería considerar un factor de efectividad del módulo de elasticidad del acero longitudinal, en función del nivel de adherencia que este desarrolle dada su disposición en paquetes de varillas.

Otra simplificación importante cuya solución práctica parece ser más compleja, es la consideración de una base infinitamente rígida a la cual se asocian las propiedades de interacción para tomar en cuenta

los efectos ISE. Es necesario incluir dentro de los modelos la posibilidad de que, tanto las columnas como los muros que llegan al nivel inferior, puedan girar en la base y no se encuentren perfectamente empotrados por la losa de cimentación, que al ser infinitamente rígida proporciona este tipo de apoyo; es necesario que se tome en cuenta la capacidad de deformación de la losa a pesar de que esto implica un problema práctico difícil de resolver.

Por último, se puede concluir que las características dinámicas originales de la estructura, más la rápida pérdida de rigidez durante el sismo, fueron de los factores determinantes que impidieron que esta sufriera daños más severos. La modificación de las características dinámicas de la estructura ocurrida durante los sismos de 1985, redujo fuertemente la respuesta de la estructura, por lo que las fuerzas incidentes resultaron menores que las resistencias reales de los elementos estructurales; lo cual evitó el colapso parcial o total de la estructura.

7 Referencias

1. Habibullah A., "ETABS, Three dimensional Analyses of Building Systems", Versión 5.4, 1992, CSI.
2. Meli R., Murià-Vila d., Quaas R., y Faccioli E., Paolucci R., "Study of site effects and building response in Mexico City during earthquakes, Final Report", diciembre de 1994, European Commision.
3. Habibullah A., "ETABS, Three dimensional Analyses of Building Systems", Versión 6.0, 1994, CSI.
4. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción para el D.F., 1987.
5. Bazán e., Meli R., "Manual de diseño sísmico de edificios", 1987, Limusa, México.
6. Rosenbleuth E., Resendiz Nuñez D., "Disposiciones reglamentarias de 1987 para tener en cuenta la interacción suelo-estructura", Series del Instituto de Ingeniería, No 509, enero de 1988.
7. Novak N., "DYNA 2 Users Manual". Febrero de 1988.

8. Murià-Vila D., Moreno S. M., "Determinación de las propiedades dinámicas y los efectos de interacción suelo-estructura de un edificio de 14 niveles", Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 2561, febrero de 1993.
9. Paolucci R., "Soil-Structure interaction effects on an instrumented building in Mexico City", Vol VII, n.3, páginas 33-44.
10. Flores L., "Estudio analítico de estructuras de mampostería confinada", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, agosto de 1995.
11. Murià-Vila D., Gamboa V., Toro A.M., "Respuesta sísmica de un edificio alto de la Ciudad de México", Instituto de Ingeniería, Proyecto 5517, diciembre 1995.
12. Meli R., Rodriguez M., "Seismic Behavior of Waffle-Flat Plate Buildings", Concrete International, julio 1988.
13. Wilson E., Suharwardy I., Habibullah A., "A Clarification of the Orthogonal Effects in a Three-Dimensional Seismic Analysis", Earthquake Spectra, Volume 11, noviembre 1995.