



01161

8

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS

**ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA
COMPARACIÓN DE LA RIGIDEZ Y RESISTENCIA EN
SU PLANO DE SISTEMAS DE PISO COMPUESTOS**

PRESENTADA POR

ING. BERNARDO GÓMEZ GONZÁLEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

(ESTRUCTURAS)

DIRIGIDA POR

M. EN I. JESÚS IGLESIAS JIMÉNEZ

Ciudad Universitaria, Agosto de 2001

295480



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.

Agradezco:

A mis padres y hermanos por haberme dado una familia en donde crecer y por la paciencia que han tenido en los momentos difíciles.

A Jesús por su ejemplo e impulso en mis días de estudiante y ahora en mi vida profesional, por darme la oportunidad de madurar y de sobreponerme a mí mismo.

A mis amigos y compañeros Francisco, José Juan, Mario y Manuel, por su entusiasmo y confianza.

A quienes aceptaron leer este trabajo para mejorarlo y enriquecerlo con sus conocimientos y experiencia, M.I. Enrique del Valle, Dr. Oscar López, Dr. David Murià y M.I. Octavio García.

A Sylvia por haber llegado.

**Estudio Experimental Para la
Comparación de la Rigidez y
Resistencia en su Plano de Sistemas
de Piso Compuestos**

Bernardo Gómez González

Agosto de 2001

Índice

NOTACIÓN

AGRADECIMIENTO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

- 1.1. Generalidades
- 1.2. Objetivo
- 1.3. Descripción

2. ANTECEDENTES

- 2.1. Rigidez en su plano de sistemas de piso
 - 2.1.1. Modelos analíticos
 - 2.1.2. Normatividad
- 2.2. Resistencia en su plano de sistemas de piso
- 2.3. Comportamiento observado durante los sismos de 1985
- 2.4. Sistemas de piso prefabricados

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

- 3.1. Metodología
- 3.2. Descripción de los especímenes
 - 3.2.1. Losa maciza
 - 3.2.1.1. Características
 - 3.2.1.2. Fabricación
 - 3.2.2. Losacero
 - 3.2.2.1. Características
 - 3.2.2.2. Fabricación
 - 3.2.3. Losa de vigueta-bovedilla
 - 3.2.3.1. Características
 - 3.2.3.2. Fabricación
- 3.3. Procedimiento de ensayo
 - 3.3.1. Mecanismo de carga
 - 3.3.2. Descripción de los ensayos
- 3.4. Presentación de resultados
 - 3.4.1. Comportamiento general
 - 3.4.2. Losa maciza
 - 3.4.2.1. Diafragma #1
 - 3.4.2.2. Diafragma #2
 - 3.4.2.3. Diafragma #3

3.4.3. Losacero

3.4.3.1. Diafragma #1

3.4.3.2. Diafragma #2

3.4.3.3. Diafragma #3

3.4.3.4. Diafragma #4

3.4.3.5. Diafragma #5

3.4.3.6. Diafragma #6

3.4.4. Losa de vigueta-bovedilla

3.4.4.1. Diafragma #1

3.4.4.2. Diafragma #2

3.4.4.3. Diafragma #3

4. MODELOS ANALITICOS

4.1. Evaluación de la rigidez diagonal

4.1.1. Modelo con la Teoría de la Elasticidad

4.1.2. Losa maciza

4.1.3. Losacero

4.1.4. Losa de vigueta-bovedilla

4.2. Evaluación de la rigidez lateral

4.2.1. Relación entre la rigidez lateral y la rigidez diagonal

4.2.2. Analogía del muro

4.2.3. Comparación de los modelos

4.3. Modelo numérico

4.3.1. Descripción del modelo

4.3.2. Resultados

4.4. Evaluación de la resistencia a cortante

4.4.1. Introducción teórica

4.4.1.1. NTC-96

4.4.1.2. ACI 318-95

4.4.2. Losa maciza

4.4.2.1. NTC-96

4.4.2.2. ACI 318-95

4.4.3. Losacero

4.4.3.1. NTC-96

4.4.3.2. ACI 318-95

4.4.4. Losa de vigueta-bovedilla

4.4.4.1. NTC-96

4.4.4.2. ACI 318-95

5. RECOMENDACIONES PARA DISEÑO

5.1. Modelo para la evaluación de la rigidez

5.1.1. Losa maciza

5.1.2. Losacero

5.1.3. Losa de vigueta-bovedilla

5.2. Modelo para la evaluación de la resistencia

- 5.2.1. Losa maciza
- 5.2.2. Losacero
- 5.2.3. Losa de vigueta-bovedilla
- 5.3. Recomendaciones finales

REFERENCIAS

- APENDICE A. Cálculo de Rigideces para Losa Maciza
- APENDICE B. Cálculo de Rigideces para Losacero
- APENDICE C. Cálculo de Rigideces para Losa de Vigueta-Bovedilla
- APENDICE D. Cálculo de Resistencias para Losa Maciza
- APENDICE E. Cálculo de Resistencias para Losacero
- APENDICE F. Cálculo de Resistencias para Losa de Vigueta-Bovedilla

Notación

A	área de la sección transversal del tablero
α	constante para calcular el módulo de elasticidad del concreto, ángulo entre la bisectriz y las caras de la cuña
αc	coeficiente para tomar en cuenta la relación de forma de los tableros
A_{vh}	área de refuerzo horizontal (en el plano) comprendida en una distancia s_h
A_{vv}	área de refuerzo vertical (en el plano) comprendida en una distancia s_v
$\beta_{losa\ maciza}$	factor de corrección para la rigidez en el plano en losa maciza
$\beta_{losacero}$	factor de corrección para la rigidez en el plano en losacero
$\beta_{vigüeta-bovedilla}$	factor de corrección para la rigidez en el plano en losa de vigüeta y bovedilla
$f'c$	$\left(1.05 - \frac{f * c}{1250}\right) f * c \leq 0.85 f * c$
F	carga que se aplica al diafragma
d	peralte efectivo de la sección transversal del tablero = 0.8L
D	distancia desde el vértice de la cuña a un punto sobre la diagonal en el que ya no existe deformación radial
Δ	deformación diagonal del tablero
ϵ_r	deformación unitaria radial en cuña
ϵ_θ	deformación unitaria angular en cuña
E	módulo de elasticidad del concreto
$f * c$	resistencia nominal del concreto a compresión
f c	resistencia especificada del concreto a compresión
FR	factor de resistencia
f_y	esfuerzo de fluencia del acero
$\gamma_{r\theta}$	deformación unitaria angular en cuña
G	módulo de rigidez del concreto
h	ancho del tablero
H	altura total del muro
h_w	altura del tablero
k	factor de forma de la sección transversal del tablero, constante para satisfacer las condiciones de equilibrio para la cuña
$k_{experimental}$	rigidez diagonal experimental en el plano del tablero

k_{diagonal}	rigidez diagonal en el plano del tablero obtenida a partir de la Teoría de la Elasticidad o por el Método de Elementos Finitos
k_{lateral}	rigidez lateral en el plano del tablero, obtenida a partir de la Teoría de la Elasticidad o de la analogía del muro
$k_{\text{lateral cortante}}$	rigidez lateral considerando únicamente deformaciones por cortante con la analogía del muro
$k_{\text{Losa maciza}}$	rigidez lateral en el plano para losas macizas
k_{Losacero}	rigidez lateral en el plano para losacero
$k_{\text{teórica}}$	rigidez diagonal teórica en el plano del tablero
$k_{\text{Vigueta-bovedilla}}$	rigidez lateral en el plano para losas de vigueta-bovedilla
L	altura del tablero, longitud horizontal del muro
l_w	longitud del tablero
μ	módulo de Poisson del concreto
P	fuerza aplicada en el vértice de una cuña de espesor unitario
ρ_h	cuantía de acero horizontal (en el plano)
ρ_n	cuantía nominal de acero
ρ_v	cuantía de acero vertical (en el plano)
r	coordenada radial del punto para el cual se calculan las deformaciones
σ_r	esfuerzo radial en cuña
σ_θ	esfuerzo angular en cuña
s_h	separación del refuerzo horizontal (en el plano)
s_v	separación del refuerzo vertical (en el plano)
$\tau_{r\theta}$	esfuerzo cortante en cuña
θ	coordenada angular del punto para el cual se calculan las deformaciones
t	espesor total de losa maciza, espesor del tablero, espesor del firme para vigueta-bovedilla
t_1	espesor del relleno por encima de la cumbre de los módulos metálicos para losacero
t_2	espesor del relleno por encima del valle de los módulos metálicos para losacero
u	desplazamiento en la cuña
v	desplazamiento en la cuña
$V_{\text{agrietamiento}}$	fuerza cortante de agrietamiento experimental en el plano del tablero
V_{CR}	fuerza cortante resistente debido al concreto en el plano del tablero
V_n	fuerza cortante resistente nominal en el plano del tablero
$V_{\text{Resistente}}$	fuerza cortante resistente total en el plano del tablero
V_u	fuerza cortante actuante en el plano del tablero

Introducción y Objetivo

1.1. GENERALIDADES

En el diseño sísmico de estructuras se hacen diversas suposiciones simplificadoras que facilitan la solución del problema. Una de estas suposiciones consiste en considerar a los sistemas de piso como diafragmas rígidos. Un diafragma rígido es aquel que puede distribuir las fuerzas horizontales a los elementos verticales de manera proporcional a las rigideces relativas entre estos últimos; en este caso, el diafragma se comporta como una viga continua y su deflexión será despreciable en comparación con la de los elementos verticales. Por otro lado, se considera como flexible a un diafragma si la distribución de las fuerzas horizontales entre los elementos verticales es independiente de sus rigideces relativas; si esto es así, el diafragma se comporta como una serie de vigas simplemente apoyadas cuyo claro es aquella distancia que se encuentra entre los elementos verticales y sus deflexiones ya no pueden ser consideradas como despreciables. La primera consideración se toma como verdadera en la mayoría de los casos, mientras que en aquellas configuraciones estructurales muy irregulares, en las que la relación de lado largo a lado corto es mayor que tres o en las que existen huecos interiores, se pone mayor atención a la rigidez real de los sistemas de piso. En estos casos se procede a realizar el análisis estructural mediante un modelo tridimensional en el que se representan las losas como paneles con cierta rigidez a cortante en su plano establecida a partir de la Teoría de la Elasticidad.

La importancia de este aspecto del diseño sísmico en México estriba en la gran cantidad de construcciones hechas utilizando algún sistema de piso compuesto, tales como el sistema de vigueta-bovedilla o el sistema losacero. En el primer caso el sistema de piso se forma a través de elementos de concreto prefabricados, sobre los cuales se cuela *in situ* un firme de concreto reforzado con malla electrosoldada. En el segundo caso el sistema consiste en módulos de acero sobre los cuales se cuela también *in situ* un firme de concreto reforzado con malla electrosoldada. En ambos casos el espesor del firme varía de acuerdo al claro que se necesita salvar, sin embargo, la falta de estudios dirigidos a la evaluación de su rigidez en el plano no permite establecer cómo es el comportamiento de ellos como diafragmas. No obstante, en la práctica nacional se ha supuesto que este tipo de sistemas pueden funcionar como diafragmas rígidos si cuentan con un espesor mínimo, para el cual sólo hay propuestas empíricas que varían según el caso, y que por lo regular, su origen se encuentra

en los requerimientos impuestos por las cargas perpendiculares al plano de los elementos.

Por otra parte, la revisión del comportamiento como diafragma no sólo implica atender a la rigidez del sistema de piso, sino que también es necesario que la resistencia a cortante garantice su integridad. A la fecha, se utilizan las recomendaciones de muros para evaluar dicha resistencia, y se simplifica el análisis considerando únicamente las fuerzas horizontales que actúan en el plano.

1.2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es el evaluar experimentalmente la rigidez y resistencia en su plano de sistemas de piso compuestos fabricados con vigueta-bovedilla o losacero, mediante el ensaye de especímenes a escala natural representativos de cada uno de ellos, y comparar con los resultados obtenidos de especímenes de losa maciza, a fin de poder establecer recomendaciones para el diseño de estos elementos estructurales.

1.3. DESCRIPCIÓN

A lo largo de este documento se presentan el trabajo experimental realizado en el laboratorio de estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Unidad Azcapotzalco, y los cálculos realizados para la obtención de los parámetros que permitieron cumplir con el objetivo antes mencionado.

En el capítulo 2 se hace un resumen del estado del arte respecto a la rigidez y resistencia en su plano de los sistemas de piso estudiados, así como de la experiencia adquirida en el comportamiento de tales sistemas durante los sismos de septiembre de 1985 ocurridos en la ciudad de México. A partir de las referencias utilizadas se establecen algunos lineamientos, tanto para la parte experimental, como para la analítica, que se desarrollan en los siguientes capítulos.

En el capítulo 3 se encuentra toda la información acerca del trabajo experimental, tal como es el procedimiento de fabricación de los especímenes, la metodología de ensaye empleada, la descripción de los ensayos y los resultados obtenidos.

En el capítulo 4 se expone la teoría necesaria para la evaluación de la rigidez y resistencia en su plano de los especímenes teniendo como sustento los resultados experimentales. Para ello se hace uso de la teoría básica de la elasticidad y de las especificaciones contenidas en los reglamentos.

Una vez que se han calibrado las expresiones antes mencionadas, es posible sugerir adecuaciones a las normas con grados de aproximación aceptables.

Tales adecuaciones se presentan en el capítulo 5, junto con sugerencias prácticas, tanto para la evaluación de la rigidez, como para la determinación de la resistencia de diafragmas construidos con los sistemas estudiados en este trabajo.

Antecedentes

A pesar de la importancia que para el diseño sísmico de estructuras tiene el comportamiento como diafragma rígido de los sistemas de piso, la investigación que se ha hecho al respecto es muy poca comparada con la realizada para el comportamiento de otros elementos estructurales, como es el caso de los marcos o de los muros estructurales, para los cuales se han logrado avances importantes tanto en su análisis como en su diseño, mismos que se ven reflejados en los códigos de diseño modernos. Por lo que se refiere al comportamiento como diafragma de los sistemas de piso, apenas y se han dado algunas recomendaciones prácticas para su consideración, mismas que surgen a partir del estudio de los muros estructurales o de suposiciones teóricas que no han sido respaldadas con estudios experimentales.

En este capítulo, se tratarán algunas de las consideraciones que se han hecho para el análisis y diseño de los sistemas de piso desde su concepción como diafragmas, en cuanto a que puedan ser considerados rígidos o no, según su interacción con el resto de la estructura. Para este fin, se ha revisado la literatura que permite establecer el estado del arte respecto a este tema, además, con el fin de establecer el comportamiento que tuvieron los edificios estructurados con losa maciza de concreto reforzado y aquellos estructurados con losa de vigueta-bovedilla, se ha revisado la experiencia de los edificios dañados durante los sismos de 1985 en la ciudad de México.

2.1. RIGIDEZ EN SU PLANO DE SISTEMAS DE PISO

2.1.1. Modelos analíticos

En la literatura sobre este tema se considera que para estimar el comportamiento como diafragma de sistemas de piso rígidos es conveniente idealizarlos como vigas horizontales, cuyos apoyos son los elementos verticales resistentes, las cuales se someten a una carga uniformemente distribuida que representa a las fuerzas inducidas por un sismo. La diferencia existente entre los diferentes autores es que algunos consideran la contribución de los elementos de borde que rodean a la losa para resistir en conjunto con ésta a las fuerzas inducidas por el sismo, como consecuencia, idealizan a la losa como una viga I en la que la losa trabaja como el alma que resiste a los esfuerzos cortantes, mientras que los elementos de borde resisten a los esfuerzos de flexión²; para otros autores no es necesario considerar a los elementos de borde y toman en cuenta únicamente la contribución de la losa^{1,3} (Figura 2.1).

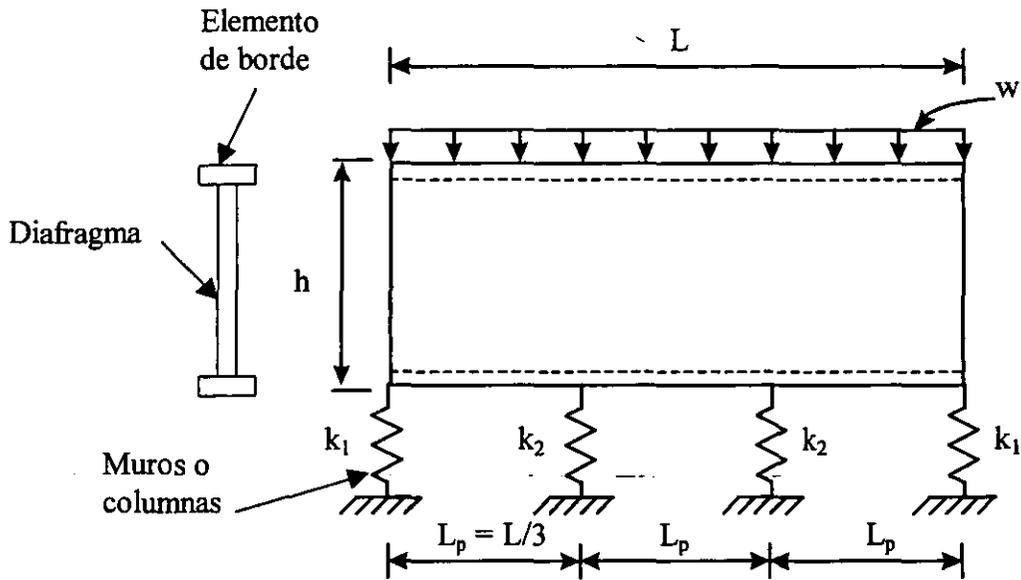


FIGURA 2.1.
Modelo analítico de un sistema de piso.

Por otro lado, las definiciones que se dan para diafragmas rígidos y flexibles se caracterizan, en general, por establecer parámetros cualitativos y no cuantitativos; algunos trabajos⁴ hacen sólo referencia a la necesidad de calcular la rigidez en su plano de los sistemas de piso con métodos elásticos, aunque sin especificar claramente cuáles; y los menos¹ proponen alguna expresión matemática para este fin, sin embargo, aún estas recomendaciones carecen de sustento experimental.

En algunos casos también se dan recomendaciones respecto de la deflexión máxima permitida en un diafragma, como la que se muestra a continuación³:

La deflexión en su plano de un diafragma, determinada por medio de un análisis ingenieril, no debe exceder la deflexión admisible de los elementos de soporte. Dicha deflexión será aquella que permita a los elementos de soporte mantener su integridad estructural como elementos individuales y que a su vez les permita continuar soportando las cargas prescritas sobre la estructura sin poner en peligro a los ocupantes del edificio.

Algunos autores relacionan a esta deflexión máxima con la flexibilidad del diafragma, un ejemplo de ello es la siguiente definición⁴:

Un diafragma flexible es aquel en el que la máxima deformación lateral es mayor a dos veces el promedio de las deformaciones de entrepiso en el nivel en estudio.

2.1.2. Normatividad

Los reglamentos de construcciones tales como el RCDF-95⁶, UBC-94⁷ o ACI 318-95⁸, así como algunos autores⁵, consideran a la rigidez de los sistemas de piso a través de recomendaciones de espesores mínimos que garanticen su comportamiento rígido, principalmente para losas macizas y firmes colados *in situ* sobre elementos de concreto prefabricados o sobre sistemas metálicos. Estos espesores mínimos pueden ir desde 3 cm hasta 6.4 cm como se muestra en la tabla 2.1.

Referencia	Espesor Mínimo [cm]	Tipo de Elemento
Mendoza ⁵	3.00	Firmes colados <i>in situ</i>
RCDF-95 ⁶	3.00 6.00	Losas macizas y firmes colados <i>in situ</i> Firmes colados <i>in situ</i> para claros mayores a 6.0 m
UBC-94 ⁷	5.10 6.40	Losas macizas Firmes colados <i>in situ</i>
ACI 318-95 ⁸	5.10	Losas macizas y firmes colados <i>in situ</i>

TABLA 2.1.

Espesores mínimos recomendados para firmes y losas de sistemas de piso.

2.2. RESISTENCIA EN SU PLANO DE SISTEMAS DE PISO

Los puntos tratados en la literatura pueden dividirse en dos partes principales: la que se refiere a la forma de evaluar a las fuerzas que deben ser resistidas por los diafragmas, y la que se enfoca al aspecto de dimensionamiento propiamente dicho.

Por lo que se refiere al análisis de los diafragmas, métodos como el propuesto por Kong⁴ establecen una distribución de fuerzas sísmicas entre la losa y sus elementos de borde, lo que permite llegar a un diseño del sistema de piso en su conjunto. De forma similar al caso de la rigidez, también aquí se recurre a idealizar los sistemas de piso como vigas horizontales con apoyos en los elementos verticales (Figura 2.2). Como punto importante para el desarrollo de este trabajo, se hace notar que, según indica la figura 2.2, los tableros de losa quedan sometidos a una carga diagonal de compresión.

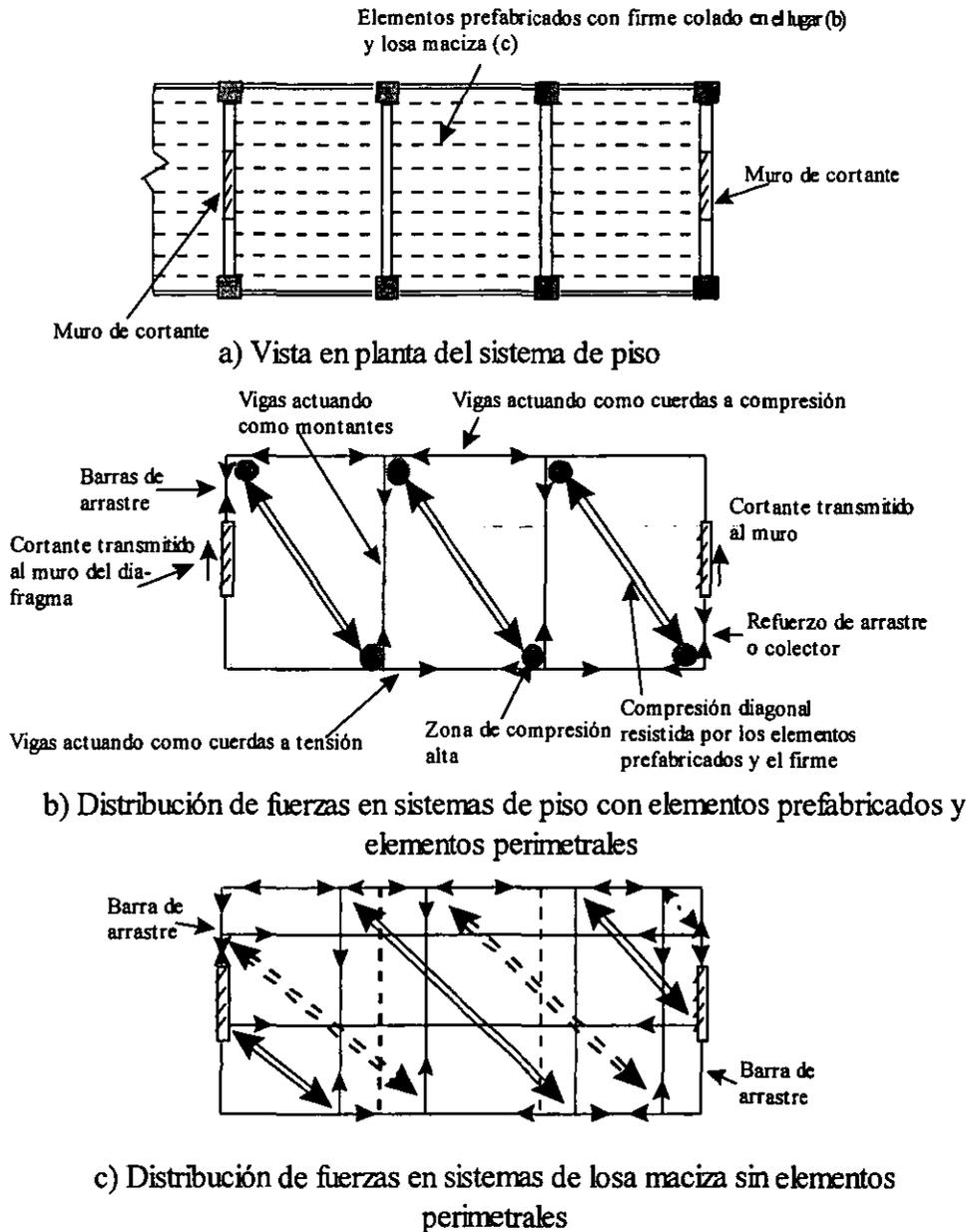


FIGURA 2.2.
Método de análisis en su plano de sistemas de piso.

En cuanto al aspecto de dimensionamiento, se observa en la mayoría de las referencias la sugerencia de tener diafragmas con espesores mínimos que varían entre 3.00 y 6.40 cm, esto, sin embargo, como se mencionó en el inciso anterior, es una disposición encaminada principalmente a definir la rigidez del diafragma. Por otro lado, en general se establece que en el caso de sistemas de piso construidos con elementos prefabricados de concreto, la función del diafragma la deberá desarrollar el firme de compresión colado sobre ellos y será éste el que deberá resistir las fuerzas cortantes inducidas a los pisos. Para la evaluación de la resistencia a cortante de los diafragmas, en este punto se

comparte la idea de tratarlos como si fueran muros sometidos a cargas en su plano^{6,8}.

2.3. COMPORTAMIENTO OBSERVADO DURANTE LOS SISMOS DE 1985

Después de los sismos de 1985, que afectaron tan seriamente a la ciudad de México, cerca de 2000 edificios de concreto resultaron dañados. Algunos de estos inmuebles estaban estructurados con sistemas de piso compuestos, como los fabricados con vigueta-bovedilla, y fue posible observar problemas en su comportamiento como diafragmas después del sismo⁹.

Las principales observaciones, en edificios estructurados a base de marcos de concreto reforzado y sistema de piso de vigueta-bovedilla, fueron la presencia de grietas en los tableros de losa. En general, el patrón de agrietamiento siguió la orientación de las viguetas en las zonas adyacentes a las trabes perimetrales a causa de la debilidad de la conexión entre el firme y la estructura principal (Figura 2.3).



FIGURA 2.3.
Grieta perimetral en losa de vigueta-bovedilla.

También se reportaron edificios, estructurados a base de marcos de concreto reforzado y losa maciza, con daños en el sistema de piso, aunque en todos los casos se debieron a la presencia de agrietamiento por carga vertical. En ningún caso la falla fue por cortante. Por último, no se reportaron daños en edificios con sistema de piso del tipo losacero, esto se puede deber principalmente a que esta clase de sistema se utiliza en inmuebles de acero, cuyo número es escaso en la ciudad.

2.4. SISTEMAS DE PISO PREFABRICADOS

Un aspecto para resaltar de lo antes expuesto es que, en los sistemas de piso compuestos, tales como los construidos con vigueta-bovedilla o losacero, la rigidez y resistencia en su plano dependen básicamente del espesor del firme colado sobre los elementos prefabricados o los moldes metálicos. Esto representa una desventaja desde el punto de vista estructural ya que, en estos casos, los espesores utilizados en la práctica son pequeños respecto de los espesores de las losas macizas o reticulares, sin embargo, no hay estudios experimentales que permitan establecer la efectividad como diafragma rígido de los sistemas de piso compuestos en relación con los sistemas tradicionales.

Por otro lado, en los edificios revisados después de los sismos de 1985, sólo se encontraron daños en sistemas de piso prefabricados, principalmente construidos con vigueta-bovedilla. Esto, si bien establece un punto de partida para entender el comportamiento de este tipo de sistemas, no permite establecer normas prácticas para su utilización. Asimismo, debe reconocerse el uso cada vez mayor de estos sistemas en la práctica nacional debido principalmente a la facilidad constructiva y a la economía que esto representa.

Todo lo anterior, evidencia la necesidad de tener más estudios experimentales y teóricos que permitan entender mejor el comportamiento de sistemas de piso prefabricados como diafragmas rígidos, por esta razón, este trabajo se enfoca al estudio de dos de los sistemas de piso compuestos con mayor aceptación en México: vigueta-bovedilla y losacero.

Estudio Experimental

De acuerdo con el objetivo planteado en este trabajo, se construyeron varios especímenes a escala natural de sistemas de piso compuestos fabricados con los sistemas de vigueta-bovedilla y losacero, ya que son los sistemas más ampliamente utilizados en la práctica profesional.

Para el sistema vigueta-bovedilla se fabricaron tres especímenes, mientras que para el sistema losacero fue necesario fabricar seis especímenes. Asimismo, se fabricaron también tres especímenes de losa maciza como punto de comparación y referencia. Las características de todos los especímenes se describen más adelante.

3.1. METODOLOGÍA

El procedimiento de ensayo utilizado consiste en someter a cada espécimen a cargas en sus esquinas opuestas a fin de inducir un estado de esfuerzos de corte que conduzca a una falla por tensión diagonal (Figura 3.1). La medición del desplazamiento de una de las esquinas en las que se aplica la carga respecto a la otra permite evaluar la rigidez en el plano de cada espécimen, asimismo, al registrar la carga en la que se presenta el agrietamiento, a lo largo de la diagonal cargada, es posible corroborar o, en su caso, calibrar las expresiones de diseño utilizadas en la práctica para evaluar la resistencia a cortante.

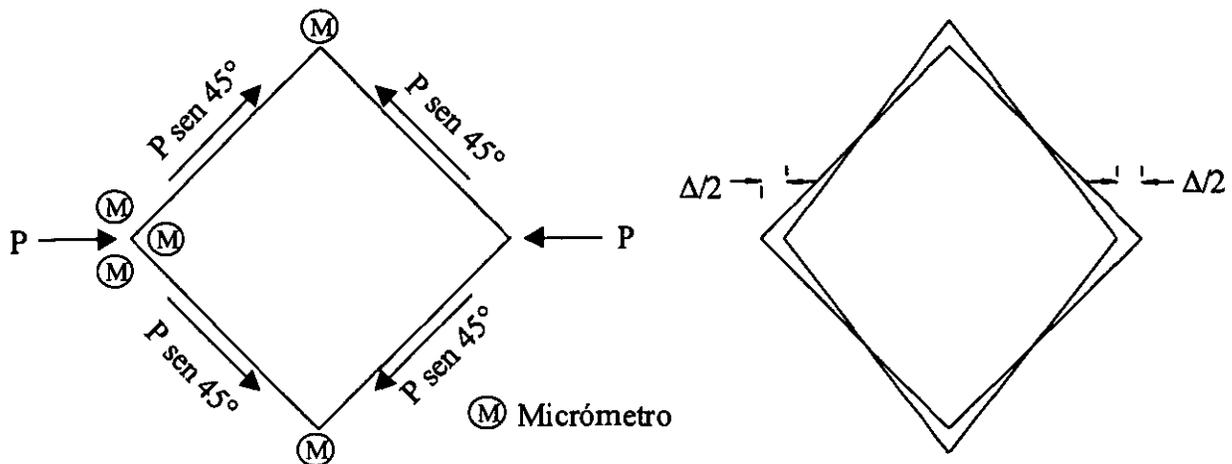


FIGURA 3.1.
Metodología de ensayo.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

A continuación se describen las características y el proceso de fabricación de cada uno de los especímenes construidos. En todos los casos la construcción se hizo de acuerdo a la práctica común o a las especificaciones del fabricante.

3.2.1. Losa maciza

3.2.1.1. Características

Se construyeron tres especímenes de 270 X 270 cm y un espesor de 10 cm (Figura 3.2). Todos ellos se diseñaron con base al RCDF y se construyeron empleando concreto de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$. El primero de ellos se armó con varillas del No. 3 @ 25 cm en ambas direcciones y los dos restantes con varillas del No. 3 @ 35 cm en ambas direcciones. La diferencia de armado entre ellos se debió a la variación de la carga vertical para la cual fueron diseñados; para el primero se consideró una carga viva representativa de edificios de oficinas (250 kg/m^2), mientras que para los dos últimos se consideró más conveniente utilizar la carga viva representativa de casas habitación (170 kg/m^2), con la cual se llegó a la conclusión de que bastaba con proporcionar el armado mínimo a los elementos.

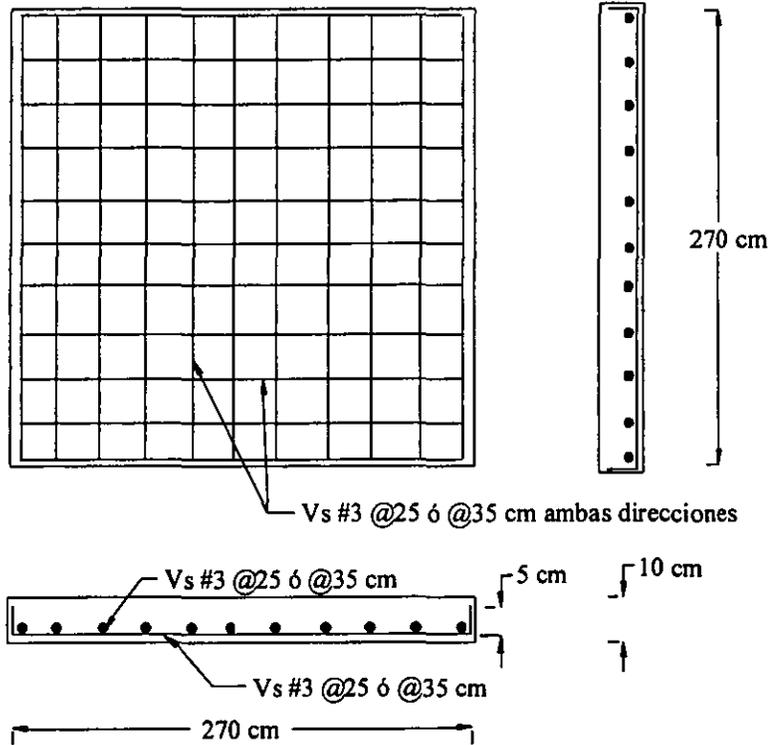


FIGURA 3.2.
Croquis de armado de losa maciza.

En todos los elementos se colocó un refuerzo adicional en las esquinas donde se aplicó la carga para evitar la falla local del elemento por aplastamiento en dicha zona. El refuerzo consistió en colocar tramos de 50X50 cm de malla electrosoldada de 6-6/10X10 como un segundo lecho sobre el refuerzo antes descrito (Figuras 3.3 y 3.4).

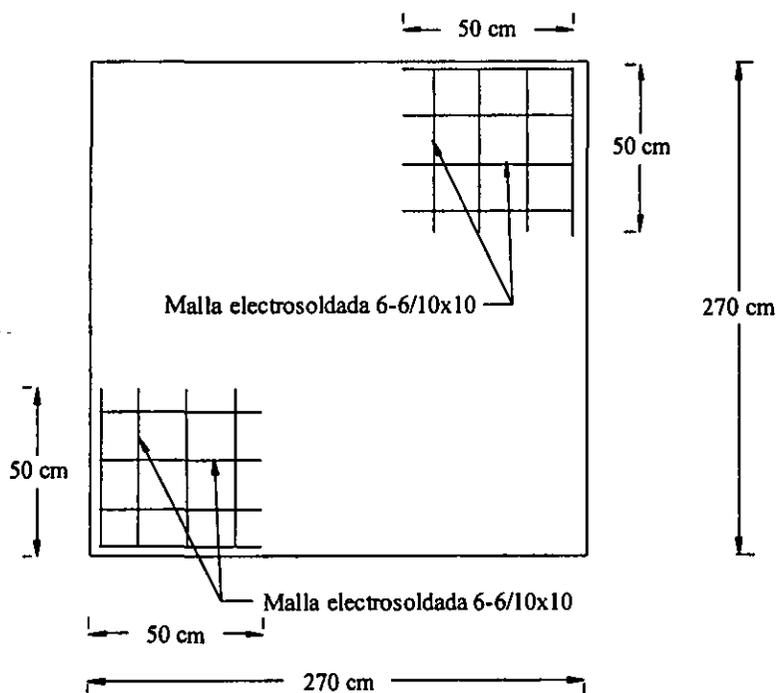


FIGURA 3.3.
Refuerzo adicional en las esquinas de carga.

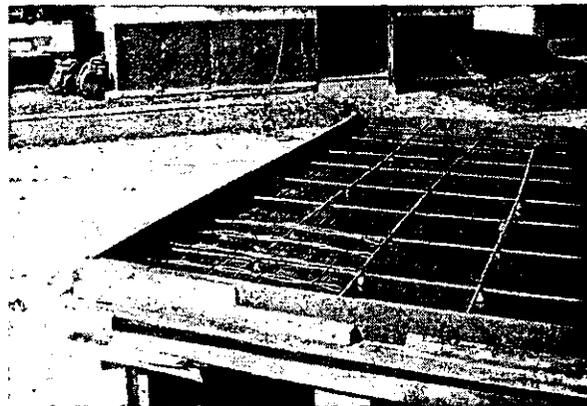
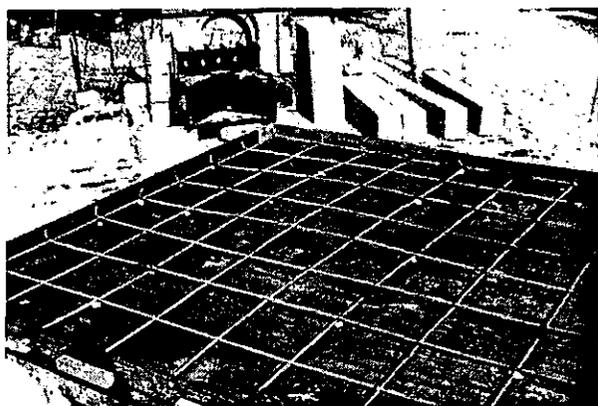


FIGURA 3.4.
Armado de losa maciza.

3.2.1.2. Fabricación

El curado del primer espécimen se hizo utilizando vapor, para poder ensayarlo sin tener que esperar los 28 días establecidos para el curado normal. Este procedimiento ya había sido utilizado anteriormente en el laboratorio de la UAM

para la fabricación de elementos presforzados, sin embargo, en esta ocasión se presentaron problemas con el sistema generador de vapor que evitaron que se obtuvieran los resultados esperados en cuanto a la adquisición de resistencia del concreto, por esta razón, para los especímenes dos y tres se utilizó aditivo acelerante para disminuir el tiempo de espera para su ensayo.

Durante el colado del primer espécimen (Figura 3.5) se observó que la cimbra presentaba deformaciones al centro del claro que aumentaban hasta en tres centímetros el espesor de la losa en esta zona, por lo que, para los especímenes dos y tres, se reforzó la cimbra para evitar este problema, sin embargo, en el espécimen tres se volvió a presentar dicha deformación. Por esta razón, el espesor de los especímenes uno y tres resultó mayor en el centro que en la periferia.

Para cada espécimen se obtuvieron tres cilindros de control, los cuales se sometieron al mismo tipo de curado y se ensayaron para comprobar que el concreto ya hubiera adquirido la resistencia necesaria antes de proceder al ensayo del elemento.

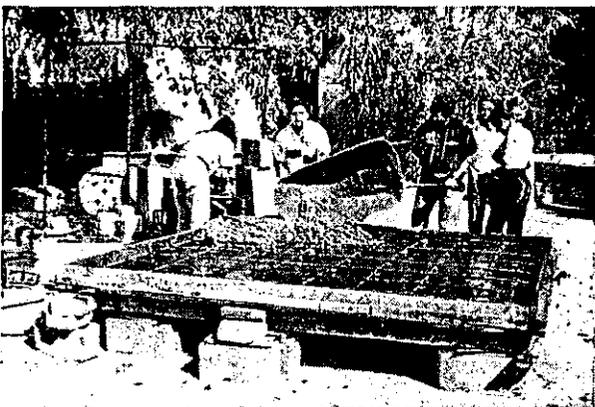


FIGURA 3.5.
Colado de losa maciza.

3.2.2. Losacero

3.2.2.1. Características

Cada espécimen se construyó con tres láminas calibre 22 de 91.44 cm de ancho y un firme de concreto de $f_c=250 \text{ kg/cm}^2$, armado con malla electrosoldada de 6-6/10X10, con 5 cm de espesor sobre las costillas de la lámina (Figuras 3.6 y 3.7). Tanto las láminas como el firme fueron del tipo comúnmente utilizados en la práctica en construcciones metálicas para claros de 2.70 m y una sobrecarga admisible de 510 kg/m^2 . No se hizo ningún tipo de conexión entre las láminas, ni se colocaron conectores entre éstas y el firme de concreto, ya que de acuerdo con el fabricante las muescas que tienen son suficientes para mantenerlas unidas al firme y no se requiere ningún tipo de

anclaje mecánico. En los elementos cuatro, cinco y seis se colocó un refuerzo adicional en las esquinas (Figura 3.3), para evitar fallas locales, ya que en dos de los ensayos de los primeros tres especímenes se presentaron fallas de ese tipo.

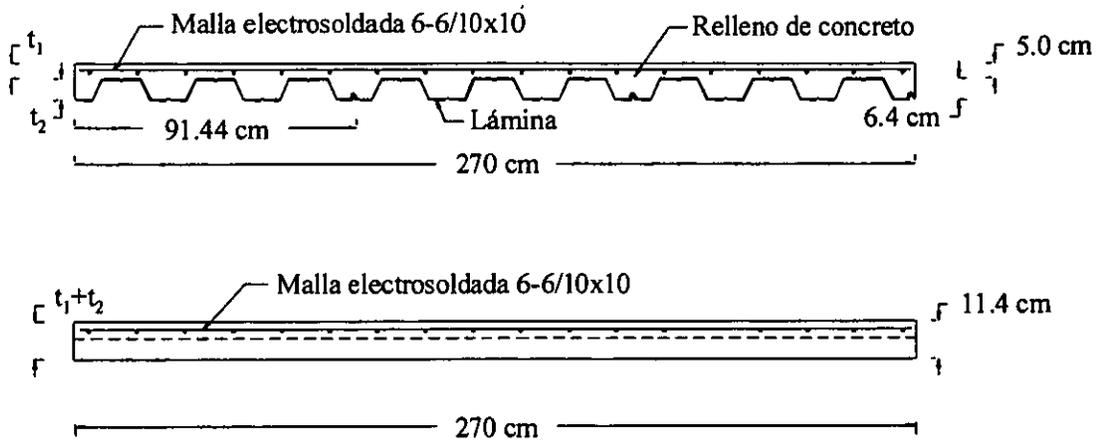


FIGURA 3.6.
Croquis de armado de losa tipo losacero.

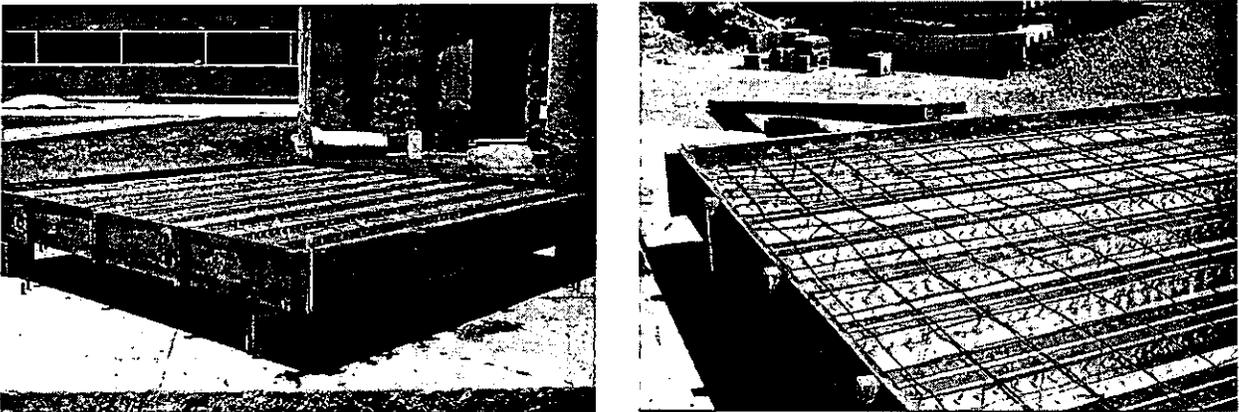


FIGURA 3.7.
Armado de losa tipo losacero.

3.2.2.2. Fabricación

Durante la fabricación de los especímenes se observó que el peso del firme de concreto (Figura 3.8) producía en el borde sin doblez de las láminas una flecha mayor que en el otro borde, lo cual provoca una separación considerable entre los bordes de las láminas contiguas, ya que coinciden un borde sin doblez con uno que si lo tiene (Figura 3.9). Este efecto condujo a que en los dos primeros especímenes, el espesor del firme al centro del diafragma fuera mayor que los 5 cm considerados inicialmente. A partir del tercer diafragma se optó por apuntalar las láminas al centro del claro, con lo cual se eliminó este problema, aunque las especificaciones originales para este claro sólo recomendaban soportar las láminas en la periferia del tablero. Una vez realizado el colado del

firme de los especímenes, se les curó con agua durante 28 días hasta que obtuvieron la resistencia necesaria para proceder a su ensayo. Para cada uno de los especímenes se obtuvieron tres cilindros de control, los cuales se colocaron en el cuarto de curado y sirvieron para corroborar la resistencia del concreto antes de los ensayos.

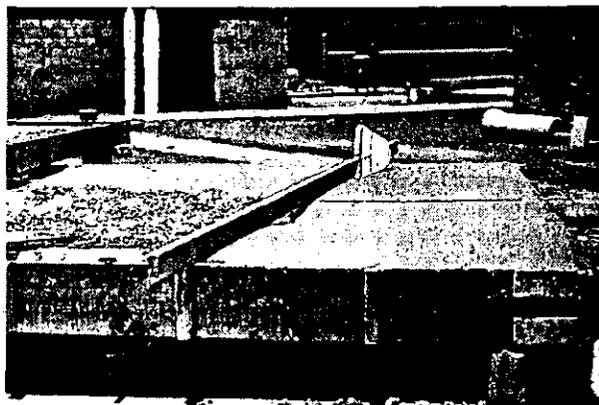


FIGURA 3.8.
Colado de losa tipo losacero.

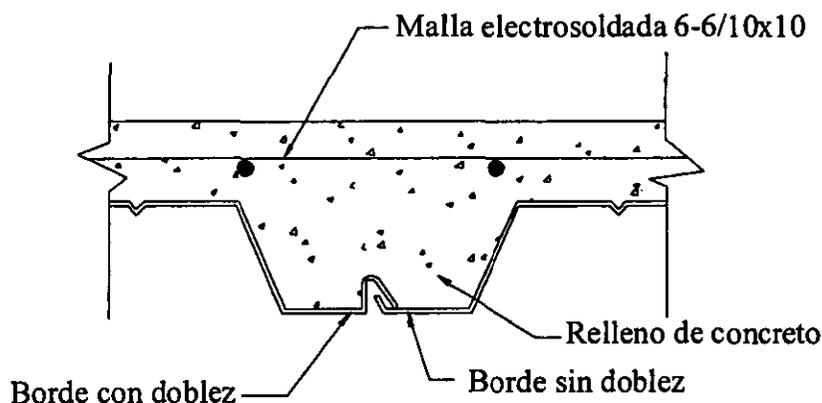


FIGURA 3.9.
Detalle de unión entre láminas contiguas.

3.2.3. Losa de vigueta-bovedilla

3.2.3.1. Características

Cada espécimen se construyó con cuatro viguetas adquiridas comercialmente para claros de 2.90 m y una sobrecarga de 400 kg/m² y bovedillas fabricadas en la UAM. Se colocó una dala perimetral de 12X25 cm y un firme de concreto de 5 cm de espesor sobre la parte superior de las bovedillas, ambos con un $f_c=250$ kg/cm². El armado en el firme consistió en la colocación de malla electrosoldada de 6-6/10X10 (Figuras 3.10 y 3.11). Al igual que en los otros

elementos, se colocó el refuerzo especial en las esquinas de carga para evitar fallas locales en dichas zonas (Figura 3.3).

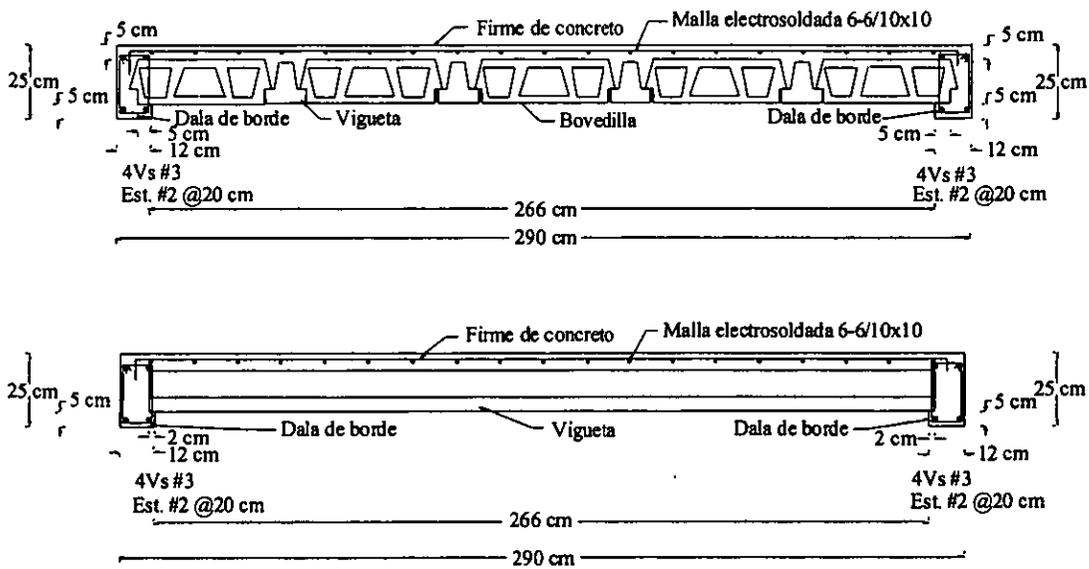


FIGURA 3.10.
Croquis de armado de losa de vigüeta-bovedilla

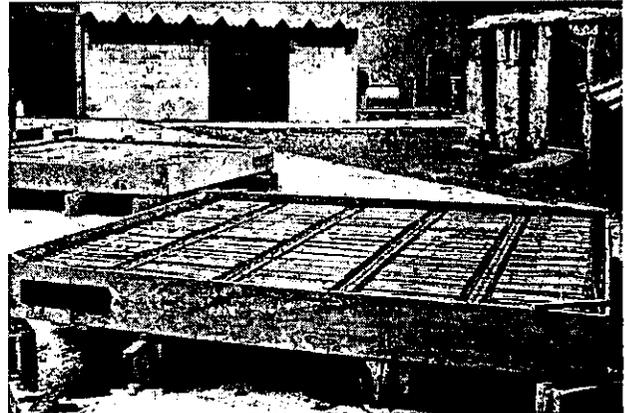
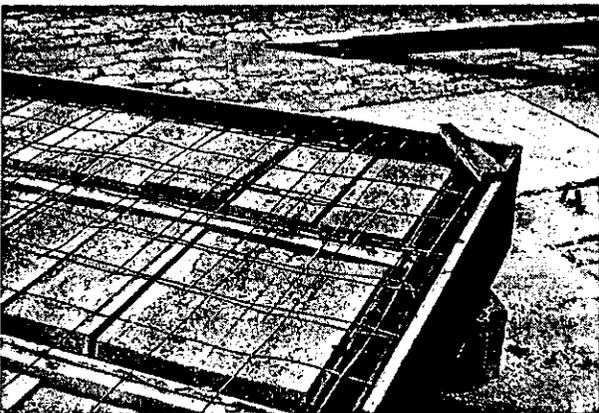


FIGURA 3.11.
Armado de losa de vigüeta-bovedilla.

3.2.3.2. Fabricación

Para la fabricación se procedió de igual forma a lo hecho en la práctica, esto es, se colocó la cimbra necesaria para el posterior acomodo de las vigüetas y bovedillas, y de manera paralela se hizo el armado de la dala perimetral, de tal forma que no interfiriera con la disposición de los elementos prefabricados, por último se colocó la malla electrosoldada. El colado del firme y de la dala perimetral se realizó conjuntamente para que el sistema tuviera continuidad (Figura 3.12). Una vez realizado el colado de los tres especímenes se les curó

con agua durante 28 días hasta que obtuvieron la resistencia necesaria para proceder a su ensayo. Para cada uno de los especímenes se obtuvieron tres cilindros de control, los cuales se colocaron en el cuarto de curado y sirvieron para corroborar la resistencia del concreto previa a los ensayos.



FIGURA 3.12.

Colado de losa de vigueta-bovedilla.

3.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

3.3.1. Mecanismo de carga

El dispositivo de carga que se utilizó consiste en dos apoyos de acero que se colocan en los extremos de cada espécimen, los cuales se acuñan con madera para evitar concentraciones de esfuerzos locales y obtener así una distribución más uniforme de la carga. Un tercer elemento reacciona contra uno de los apoyos mediante la acción de tres gatos hidráulicos de 50 t de capacidad cada uno, e introduce la carga al diafragma a través de la acción de diez varillas del #12 que conectan al elemento de reacción con el apoyo opuesto, tal como se aprecia en las figuras 3.13, 3.14 y 3.15. Se colocaron dos micrómetros de carátula entre el elemento de reacción y el apoyo sobre el que actúan los gatos hidráulicos, la disposición de los micrómetros permitió registrar el acortamiento en la diagonal justo en el extremo de la aplicación de la carga. Adicionalmente, en algunos casos, se colocaron dos micrómetros de carátula en las esquinas libres con la intención de medir el alargamiento en la diagonal perpendicular a la acción de la carga. Por último, también en algunos especímenes, se colocó un micrómetro adicional con el fin de medir el acortamiento a lo largo de la diagonal paralela a la carga a través de una varilla de aluminio sujeta en uno de sus extremos a un punto intermedio del tablero, mientras que el otro extremo se fijaba al micrómetro. En la figura 3.1 se aprecia la disposición general de los micrómetros que se utilizaron, siempre se emplearon al menos los dos micrómetros que se muestran adyacentes a la carga, el resto se utilizó en diferentes combinaciones que buscaban obtener datos adicionales que permitieran establecer un mejor control del experimento.

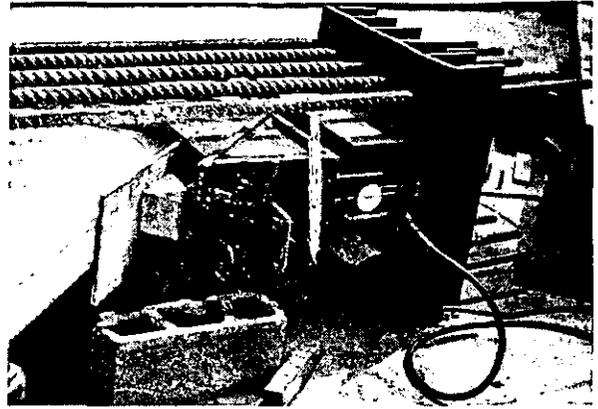
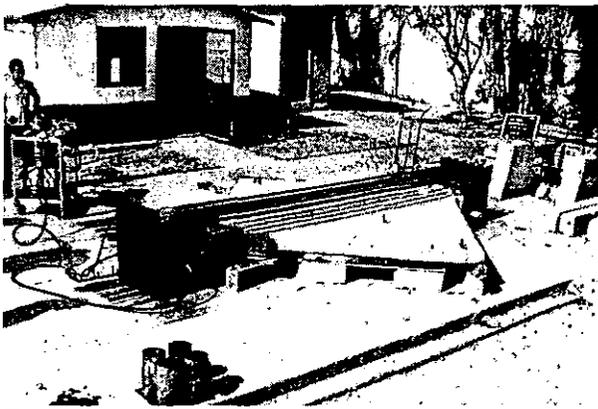


FIGURA 3.13.
Mecanismo de carga.

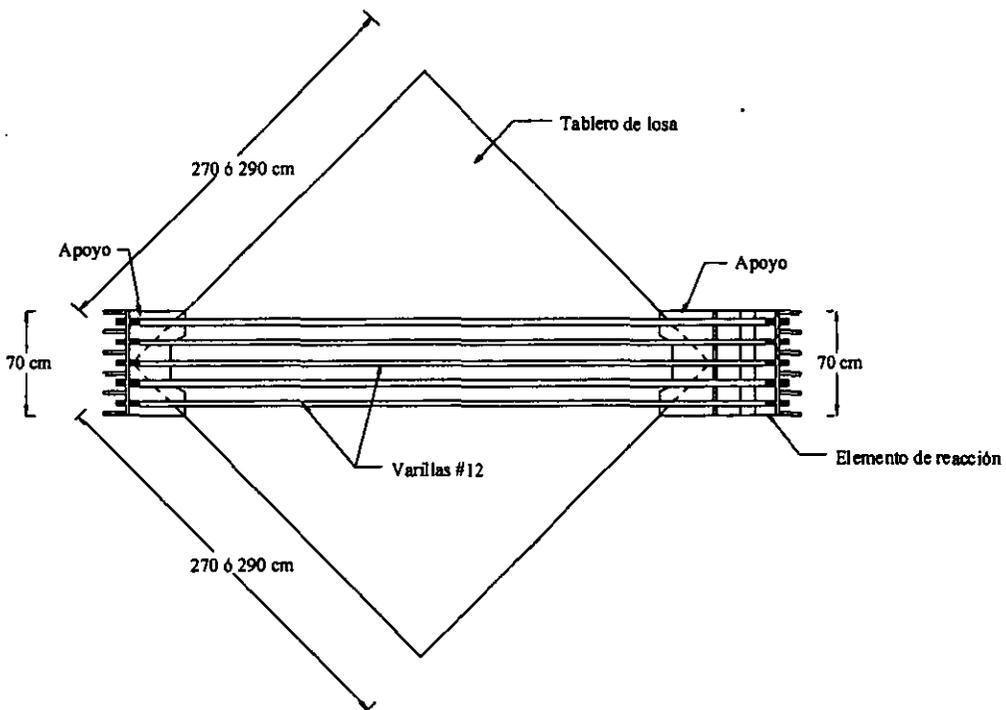


FIGURA 3.14.
Croquis de mecanismo de carga. (Vista en planta).

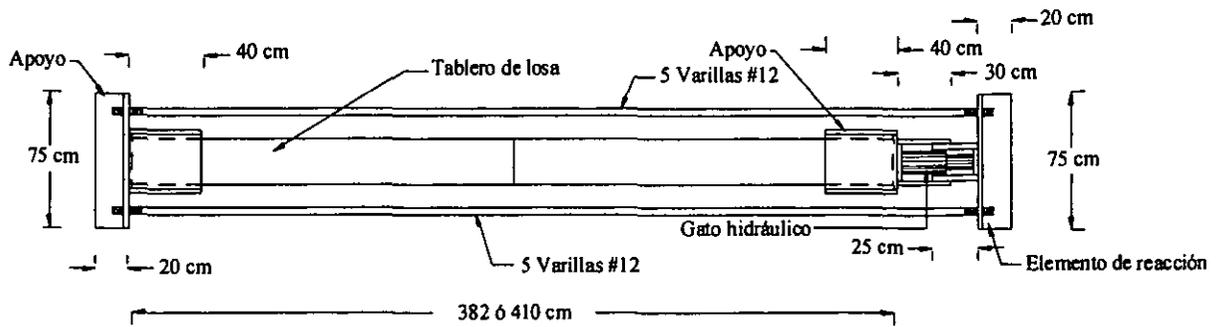


FIGURA 3.15.
Croquis de mecanismo de carga. (Vista lateral).

3.3.2. Descripción de los ensayos

A todos los especímenes se les aplicaron las cargas en incrementos de 5 t, en intervalos de 3 minutos. Las lecturas de las deformaciones indicadas por los micrómetros se tomaron hasta el final de cada incremento, con el fin de que se distribuyeran internamente los esfuerzos en los especímenes.

Conforme avanzaban los ensayos se marcaban las grietas que iban apareciendo en el elemento, tales grietas podían ser debidas a los esfuerzos cortantes o a los esfuerzos de aplastamiento.

Los ensayos terminaban cuando el espécimen agotaba su capacidad de carga, o bien, cuando se alcanzaba el límite de carga del sistema hidráulico. En todos los casos en que se presentó la segunda situación, se logró previamente el agrietamiento de los elementos a lo largo de su diagonal, con lo cual se consideró el ensayo como adecuado.

3.4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.4.1. Comportamiento general

Durante los ensayos de los especímenes se pudieron observar tres condiciones que determinaron la terminación de la prueba. Una de ellas corresponde al agotamiento de la capacidad de carga del sistema hidráulico, mientras que las otras dos representan condiciones de falla de los especímenes. De estas últimas, la primera consiste en el agrietamiento diagonal de los diafragmas, el cual se combinó con el aplastamiento del concreto en los apoyos o con el alabeo de las losas; la segunda consiste únicamente en el aplastamiento del concreto en los apoyos sin que antes se hubiera presentado el agrietamiento diagonal de la losa.

En los tres especímenes de losa maciza se logró el agrietamiento diagonal. En dos de ellos este agrietamiento se combinó con el aplastamiento del concreto en los apoyos sin que éste determinara la capacidad de carga de los elementos. En

todos ellos se presentó una deformación considerable fuera del plano al irse acercando la prueba a su etapa final. La carga de falla varió entre 100 y 105 t.

De los seis especímenes de losacero, tres fallaron por agrietamiento diagonal acompañado del aplastamiento del concreto en alguno de los apoyos, mientras que los otros tres fallaron por aplastamiento del concreto en los apoyos, acompañado por el deslizamiento de las láminas adyacentes a los puntos de aplicación de la carga y el desprendimiento del resto de ellas, y en consecuencia, estos especímenes no fueron tomados en cuenta para la estimación de su carga última ni para el estudio de su rigidez. Cabe subrayar que el hecho de tener mayor número de elementos para este sistema se debió a que en dos de los primeros tres especímenes no se pudo lograr la falla por tensión diagonal y para tener igual número de especímenes de comparación se decidió construir tres especímenes adicionales de los cuales sólo dos presentaron la falla por tensión diagonal. Al igual que en la losa maciza, al llegar a la etapa final de la prueba se presentaron deformaciones fuera del plano en todos los tableros. La carga de falla varió entre las 50 y 80 t; las resistencias más altas se alcanzaron en los especímenes cuya falla se produjo por agrietamiento diagonal.

Por lo que respecta a los especímenes de vigueta-bovedilla, los tres fallaron por agrietamiento diagonal acompañado del alabeo fuera de su plano. En ningún caso se presentó aplastamiento del concreto en los apoyos, debido seguramente a la presencia de la dala perimetral. La carga de agrietamiento varió entre las 70 y 80 t, y la carga de alabeo entre las 75 y 85 t. El alabeo se podría explicar por la formación de una especie de "mecanismo" entre las viguetas y la dala perimetral, el cual se pudo haber originado a partir de la deformación fuera del plano del marco perimetral bajo la acción de la carga, mismo que no pudo ser restringido totalmente por los elementos prefabricados y el firme de concreto.

Es importante hacer mención que las deformaciones registradas por los micrómetros en las esquinas libres y por el micrómetro sujeto a la varilla de aluminio, no fueron tomadas en cuenta para el cálculo de la rigidez por no ser confiables, ya que no se logró fijar adecuadamente dichos dispositivos a los puntos correspondientes del tablero en los que se pretendía medir su desplazamiento. En todos los casos, se consideraron como confiables únicamente las deformaciones registradas por los micrómetros colocados en la zona de aplicación de la carga.

A continuación se describen con mayor detalle los resultados y las observaciones para cada uno de los especímenes.

3.4.2. Losa maciza

3.4.2.1. Diafragma #1

El diafragma #1 tuvo un espesor variable, desde 11.9 cm en los bordes hasta 13.8 cm en el centro del claro. El f_c promedio fue de 207.11 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar 105 t.

Con la carga de 80 t aparecieron las primeras grietas incipientes orientadas en la dirección diagonal de los apoyos, mientras que a las 85 t las grietas fueron evidentes. La operación sostenida de los gatos llevó al incremento en el espesor de las grietas diagonales y eventualmente al aplastamiento de uno de los apoyos bajo 105 t, con lo que se consideró que el diafragma había fallado. La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.18.

3.4.2.2. Diafragma #2

El diafragma #2 tuvo un espesor uniforme de 10 cm. El f_c promedio fue de 275.65 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar 105 t.

Con la carga de 70 t aparecieron las primeras grietas orientadas en dirección diagonal de los apoyos. La operación sostenida de los gatos llevó al incremento en el espesor de las grietas diagonales, sin embargo, en esta ocasión no se produjo la falla del espécimen por aplastamiento en ninguno de sus apoyos y el experimento se detuvo en las 105 t para no dañar al sistema hidráulico cuya capacidad máxima admisible de seguridad es de 100 t (Figura 3.16). La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.19.

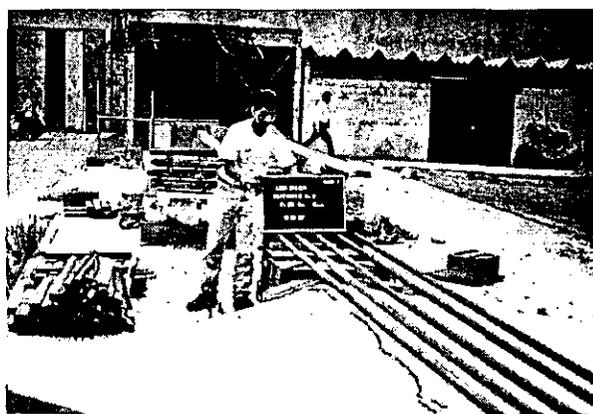


FIGURA 3.16.

Ensayo del diafragma #2 de losa maciza. Presenta agrietamiento diagonal.

3.4.2.3. Diafragma #3

El diafragma #3 tuvo un espesor variable, desde 12 cm en los bordes hasta 13 cm en el centro del claro. El f_c promedio fue de 306.55 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar 100 t.

Las primeras grietas aparecieron en uno de los apoyos ante una carga de 45 t. Bajo la carga de 55 t la falla por aplastamiento en el apoyo parecía inminente, sin embargo, fue hasta las 85 t cuando el aplastamiento en dicha zona fue evidente. No obstante, el espécimen no perdió su capacidad de carga, por lo que se siguió la prueba y, ante la carga de 90 t, aparecieron grietas orientadas en la dirección diagonal de los apoyos. La operación sostenida de los gatos llevó al incremento en el espesor de las grietas diagonales y al aumento en el aplastamiento del apoyo, sin embargo, el diafragma nunca perdió su capacidad de aceptar más carga, y el experimento se detuvo en las 100 t para no forzar demasiado al sistema hidráulico (Figura 3.17). La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.20.

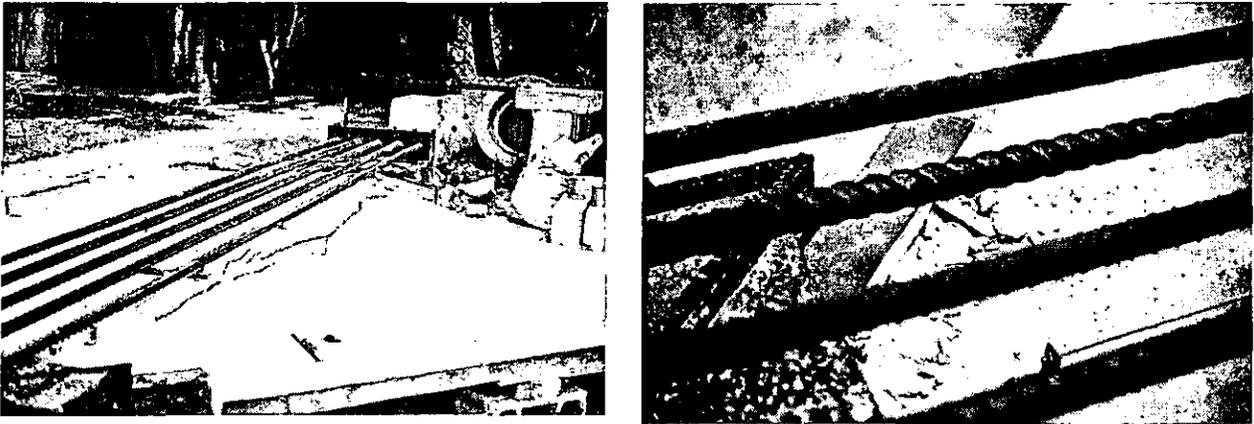


FIGURA 3.17.

Ensayo del diafragma #3 de losa maciza. Presenta agrietamiento diagonal y aplastamiento en el apoyo.

En las figuras 3.18, 3.19 y 3.20 se muestran las curvas carga-deformación para los tres diafragmas tipo losa maciza, en cada una de ellas se dibujan dos curvas con diferente espesor de línea. La línea gruesa representa los puntos medidos durante los ensayos con los micrómetros colocados en los especímenes, mientras que la línea delgada representa los puntos calculados a partir de un ajuste por mínimos cuadrados realizado para cada espécimen. Para tal ajuste se consideraron las deformaciones en la diagonal mayores a 0.75 cm, para los diafragmas #1 y #2, y de 1.00 cm para el diafragma #3, ya que a partir de estos valores se considera que el sistema de medición ya experimentó los reajustes propios de toda medición experimental. Asimismo, para cada diafragma se muestra la pendiente de la recta ajustada, que es de hecho, la rigidez diagonal en el plano de cada espécimen obtenida experimentalmente.

Por otro lado, es conveniente aclarar que, si bien la tendencia mostrada en las curvas pareciera sugerir que conforme aumenta el daño en el espécimen la rigidez también aumenta, lo cual es contrario a lo que se esperaría de un elemento de concreto reforzado, en realidad, lo que se observa es que el sistema de carga experimentó ajustes significativos antes de transmitir adecuadamente la carga al elemento. Adicionalmente, si se observa el comportamiento de los elementos después de la primera grieta diagonal, ésta no parece afectar significativamente la rigidez de los mismos, esto puede deberse a que, para estas condiciones de carga, el agrietamiento en la diagonal no conlleva a una pérdida de rigidez evidente como la que se tiene cuando se presenta el agrietamiento en los apoyos, de hecho, la explicación a la baja rigidez obtenida para el diafragma #3, a pesar de tener espesores mayores a los dos anteriores, se puede dar si se considera que éste fue el único que presentó dicho aplastamiento en la zona de la aplicación de la carga.

No obstante, a partir de los resultados obtenidos de los ensayos realizados, no es posible establecer con claridad cómo es el mecanismo a través del cual la rigidez en los tableros con falla en los apoyos se ve afectada por esta condición. Probablemente, la concentración de esfuerzos en dicha zona acelere una degradación de la rigidez localmente, ocasionando que no se observe el comportamiento del resto del tablero por la instrumentación utilizada.

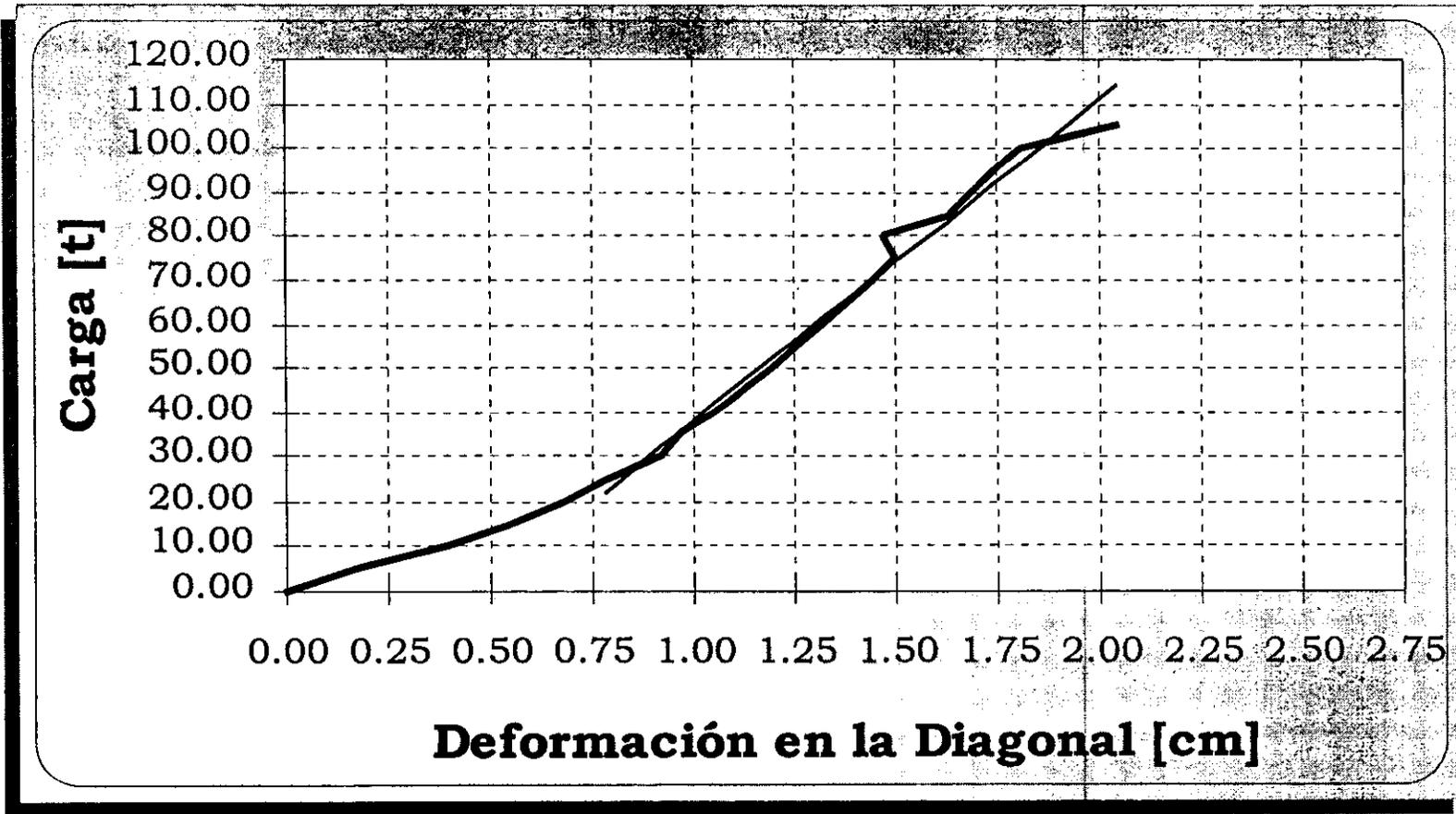
En la tabla 3.1 se muestra un resumen de las condiciones de falla de cada elemento.

Diafragma	Espesor en los Bordes [cm]	Espesor en el Centro del Claro [cm]	Carga de la 1ª Grieta Diagonal [t]	Carga de Falla [t]	Rigidez Diagonal [t/cm]	Modo de Falla
1	11.90	13.80	85.00	105.00	72.43	Agrietamiento Diagonal
2	10.00	10.00	70.00	105.00	70.65	Agrietamiento Diagonal
3	12.00	13.00	90.00	100.00	49.76	Aplastamiento en los Apoyos y Agrietamiento Diagonal

TABLA 3.1.

Condiciones de falla en las losas macizas.

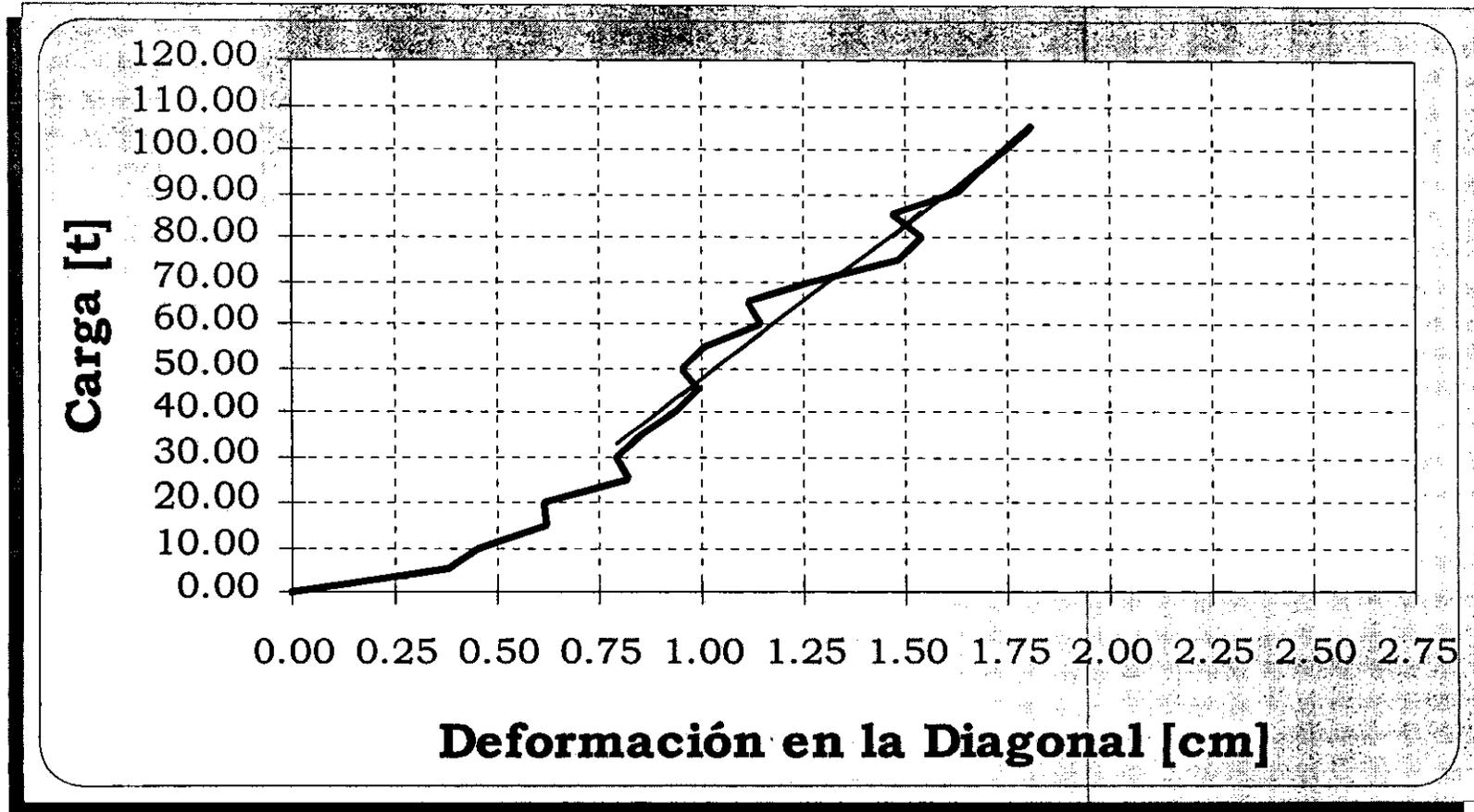
Diafragma #1 - Losa Maciza



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 72.43 t/cm

Figura 3.18.
Curva carga-deformación del diafragma #1 de losa maciza

Diafragma #2 - Losa Maciza

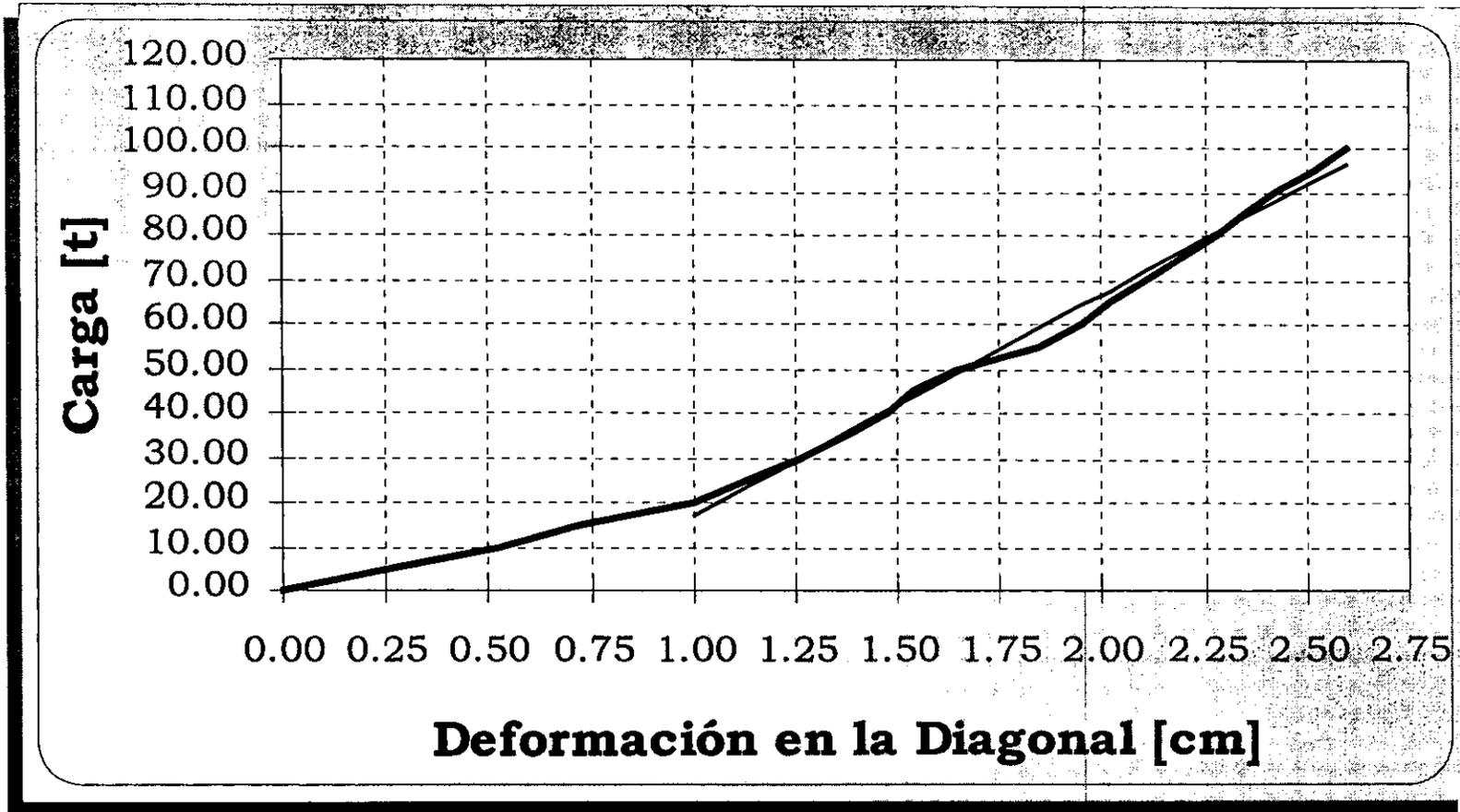


- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 70.65 t/cm

Figura 3.19.

Curva carga-deformación del diafragma #2 de losa maciza

Diafragma #3 - Losa Maciza



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 49.76 t/cm

Figura 3.20.
Curva carga-deformación del diafragma #3 de losa maciza

3.4.3. Losacero

3.4.3.1. Diafragma #1

El diafragma #1 tuvo un espesor variable del firme de concreto, desde 5 cm en los bordes hasta 8 cm en el centro del claro. El f'_c promedio fue de 256 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar 30 t, tras lo cual los incrementos fueron de 2.5 t hasta alcanzar la falla del espécimen.

Las primeras grietas aparecieron en las esquinas libres, ante una carga de 30 t. Posteriormente, aparecieron nuevas grietas en la zona de los apoyos, hasta alcanzarse finalmente la falla por aplastamiento en una de las esquinas con 52.5 t. El aplastamiento del apoyo se presentó acompañado del deslizamiento de la lámina adyacente al mismo, así como del desprendimiento del resto de las láminas (Figura 3.21). La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.23.



FIGURA 3.21.

Ensayo del diafragma #1 de losacero. Presenta aplastamiento en el apoyo y corrimiento de las láminas.

3.4.3.2. Diafragma #2

El diafragma #2 tuvo un espesor variable del firme de concreto, desde 5 cm en los bordes hasta 8 cm en el centro del claro. El f_c promedio fue de 266 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar la falla del espécimen.

Las primeras grietas aparecieron en uno de los apoyos ante una carga de 25 t. Posteriormente, aparecieron nuevas grietas en el mismo apoyo y en el opuesto. Finalmente, se presentó la falla por aplastamiento en una de las esquinas ante 50 t. El aplastamiento del apoyo se presentó acompañado del deslizamiento de la lámina adyacente al mismo, así como del desprendimiento del resto de las láminas. La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.24.

3.4.3.3. Diafragma #3

El diafragma #3 tuvo un espesor uniforme del firme de concreto de 5 cm, gracias al apuntalamiento que se hizo durante la construcción. En este espécimen se presentaron grietas de contracción paralelas a la geometría de la malla de refuerzo. El f_c promedio fue de 249 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar la falla del diafragma.

Conforme se fue aplicando la carga, se observó un incremento generalizado del espesor de las grietas de contracción, sobre todo en la zona de los apoyos. Ante 40 t aparecieron las primeras grietas orientadas en la dirección diagonal del tablero. Finalmente, al alcanzarse 57 t, se produjo la falla del espécimen al presentarse un fuerte agrietamiento en dicha diagonal acompañado de la pérdida de la capacidad de carga. La operación sostenida de los gatos llevó al incremento del espesor de las grietas diagonales y, eventualmente, al aplastamiento de uno de los apoyos (Figura 3.22). La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.25.

La falla prematura de los dos primeros especímenes por aplastamiento de sus apoyos condujo a que se incrementara la superficie de contacto entre la losa y el elemento de apoyo incrementando la longitud del cabezal. Adicionalmente, en la construcción de los diafragmas 3, 5 y 6 se colocó refuerzo en las esquinas en donde se aplicaba la carga. Se considera que estas modificaciones, junto con el espesor uniforme del colado, son la causa de que en este diafragma y en los dos siguientes sí se consiguiera la falla por tensión diagonal.

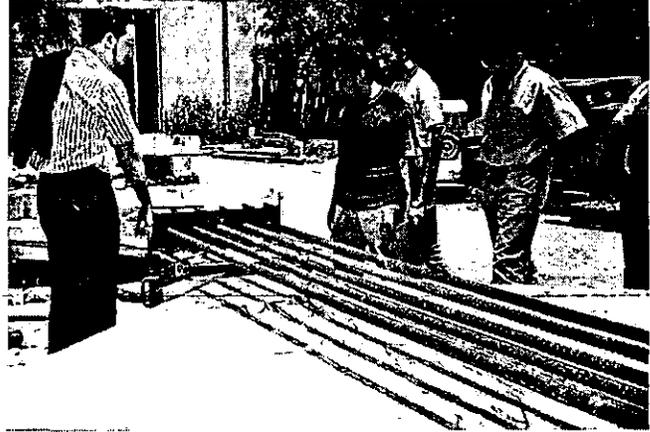
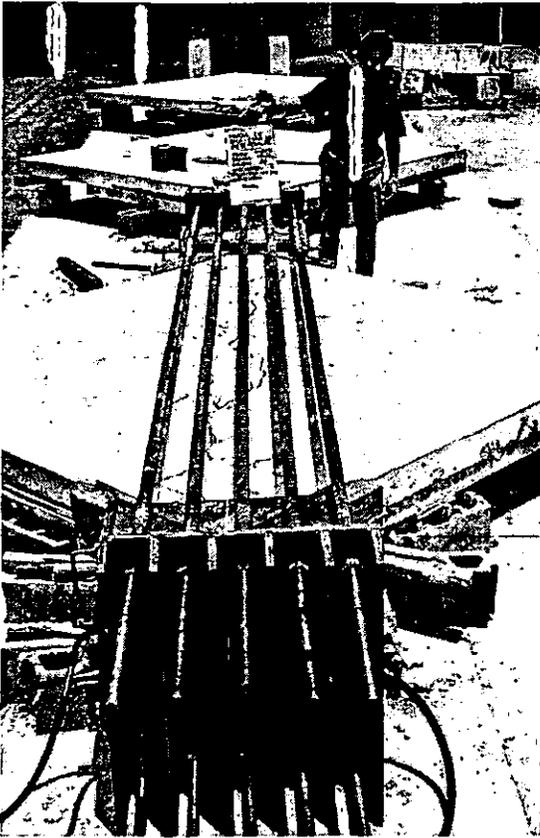


FIGURA 3.22.

Ensayo del diafragma #3 de losacero. Presenta agrietamiento diagonal y aplastamiento en el apoyo.

3.4.3.4. Diafragma #4

El diafragma #4 tuvo un espesor variable del firme de concreto, desde 5 cm en los bordes hasta 6 cm en el centro del claro. El f'_c promedio fue de 256 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar la falla del espécimen.

Bajo una carga de 55 t se apreció una ligera separación de la lámina cerca de uno de los apoyos. Ante una carga de 60 t aparecieron las primeras grietas orientadas en la dirección de la diagonal entre los apoyos. Finalmente, al alcanzarse las 75 t se produjo la falla del espécimen al presentarse un fuerte agrietamiento en dicha diagonal acompañado de la pérdida de la capacidad de carga. La operación sostenida de los gatos llevó al incremento del espesor de las grietas diagonales y eventualmente al aplastamiento de uno de los apoyos. La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.26.

3.4.3.5. Diafragma #5

El diafragma #5 tuvo un espesor variable del firme de concreto, desde 5 cm en los bordes hasta 7 cm en el centro del claro. El f'_c promedio fue de 261 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar la falla del espécimen.

Bajo una carga de 60 t se despegó la lámina cerca del apoyo en donde actuaba el gato. Ante una carga de 80 t se produjo la falla del espécimen al presentarse un fuerte agrietamiento en la dirección de la diagonal de los apoyos acompañado de la pérdida de la capacidad de carga. Como en los dos casos anteriores, la operación sostenida de los gatos llevó al incremento del espesor de las grietas diagonales y al aplastamiento de uno de los apoyos. La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.27.

3.4.3.6. Diafragma #6

El diafragma #6 tuvo un espesor variable del firme de concreto, desde 5 cm en los bordes hasta 7 cm en el centro del claro. El f_c promedio fue de 273 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar la falla del espécimen.

Las primeras grietas aparecieron en uno de los apoyos ante una carga de 30 t. Posteriormente aparecieron nuevas grietas en el mismo apoyo hasta que se alcanzó la falla por aplastamiento bajo una carga de 65 t. El aplastamiento en el apoyo se presentó acompañado del deslizamiento de la lámina adyacente al mismo, así como del desprendimiento del resto de las láminas. La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.28.

En las figuras 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28 se muestran las curvas carga-deformación para los seis diafragmas tipo losacero. Al igual que para las losas macizas, en cada una de ellas se dibujan la curva de mediciones experimentales con línea gruesa y la recta ajustada con línea delgada. También en este caso, debido a los reacomodos del sistema de carga, se consideraron las deformaciones mayores a 0.75 cm para llevar a cabo el ajuste por mínimos cuadrados. En el caso del diafragma #3, el ajuste se hizo para las deformaciones entre 0.75 cm y 1.75 cm, ya que después de esta deformación se observó un comportamiento plástico. Asimismo, para cada diafragma se muestra la pendiente de la recta ajustada.

De igual manera a lo observado en los especímenes de losa maciza, la tendencia inicial de las curvas muestra, en mayor o menor grado, el ajuste que sufrió el sistema de carga antes de comenzar a transmitir adecuadamente la carga a los elementos. Por otro lado, también para este sistema de piso se observa que la presencia del agrietamiento en la zona de apoyos va acompañado de una baja rigidez de los elementos. Sin embargo, el comportamiento del diafragma #6 no concuerda con esta observación.

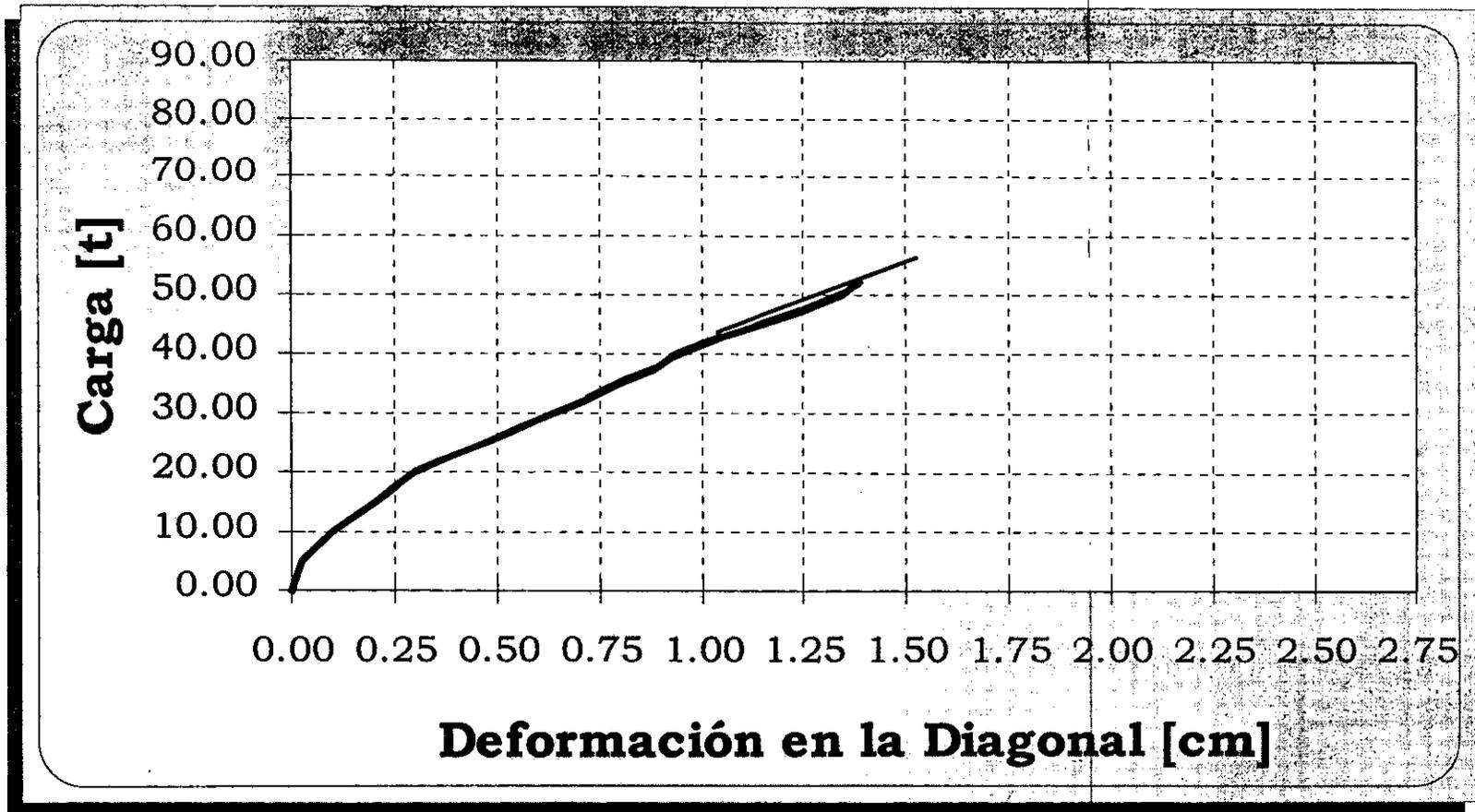
En la tabla 3.2 se muestra un resumen de las condiciones de falla de cada elemento.

Diafragma	Espesor en los Bordes [cm]	Espesor en el Centro del Claro [cm]	Carga de la 1 ^a Grieta [t]	Carga de Falla [t]	Rigidez Diagonal [t/cm]	Modo de Falla
1	5.00	8.00	30.00	52.50	28.26	Aplastamiento en los Apoyos
2	5.00	8.00	25.00	50.00	29.66	Aplastamiento en los Apoyos
3	5.00	5.00	40.00	57.00	34.81	Agrietamiento Diagonal
4	5.00	6.00	60.00	75.00	48.27	Agrietamiento Diagonal
5	5.00	7.00	80.00	80.00	44.08	Agrietamiento Diagonal
6	5.00	7.00	30.00	65.00	41.47	Aplastamiento en los Apoyos

TABLA 3.2.

Condiciones de falla de losacero.

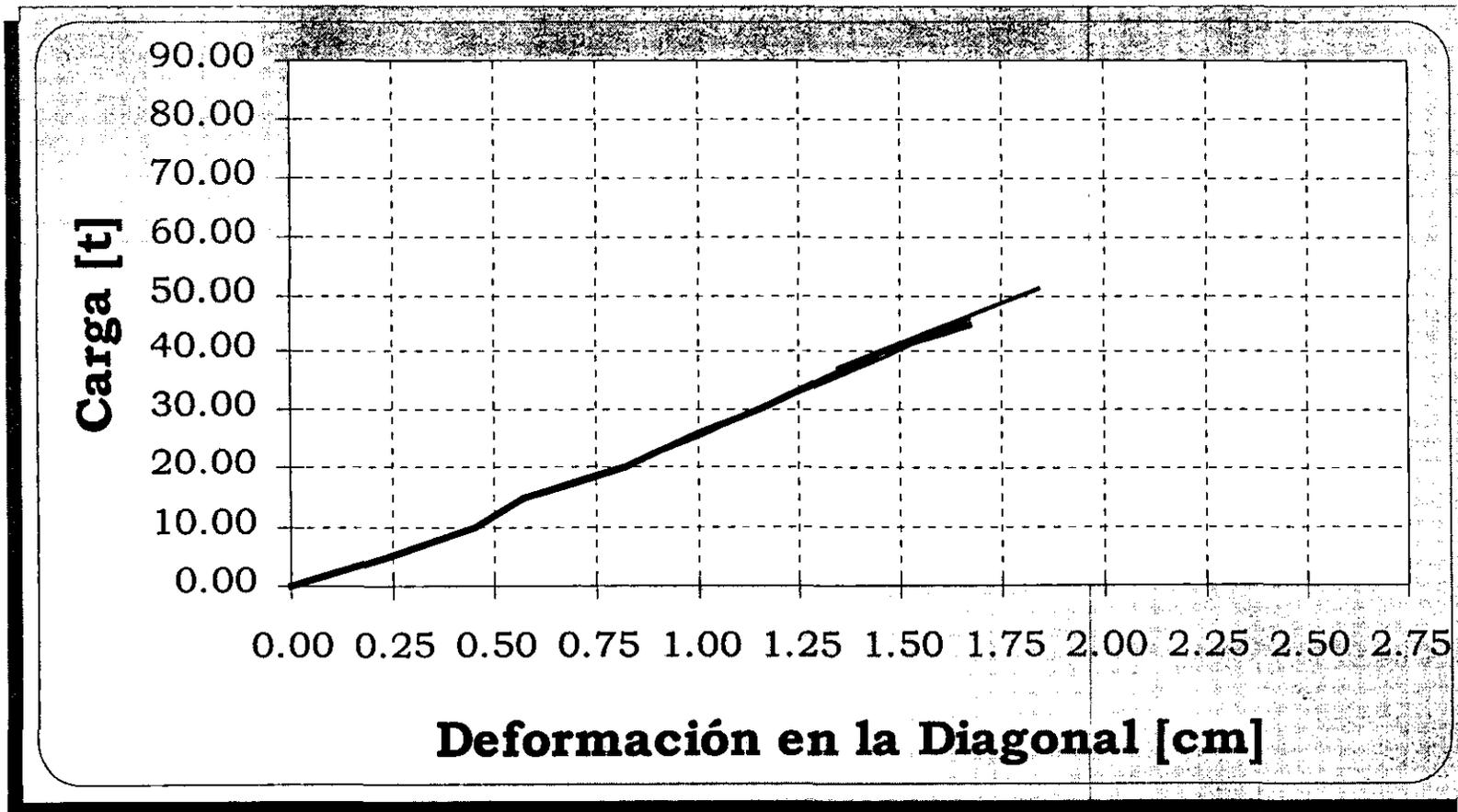
Diafragma #1 - Losacero



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 28.26 t/cm

Figura 3.23.
Curva carga-deformación del diafragma #1 de losacero

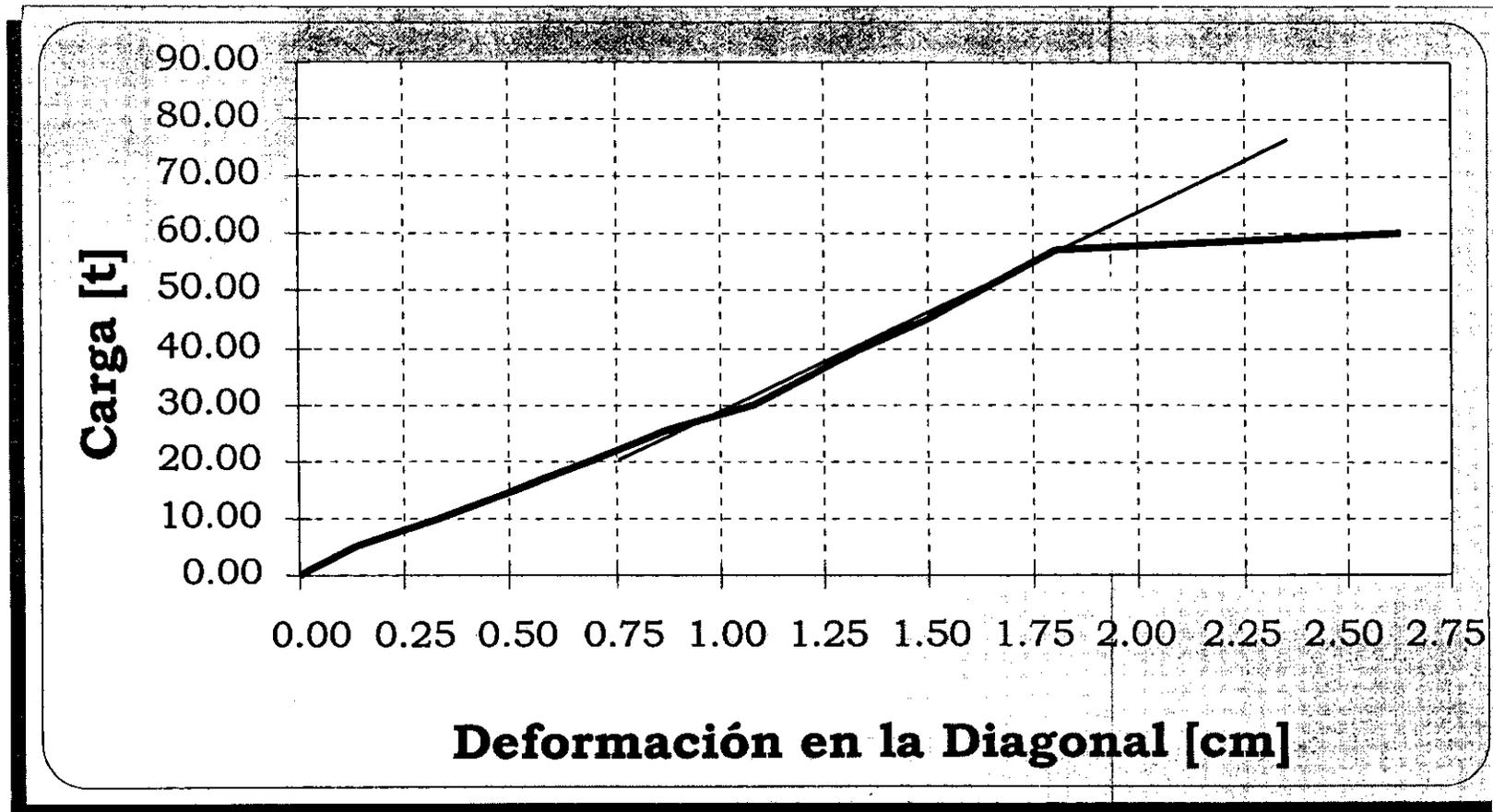
Diafragma #2 - Losacero



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 29.66 t/cm

Figura 3.24.
Curva carga-deformación del diafragma #2 de losacero

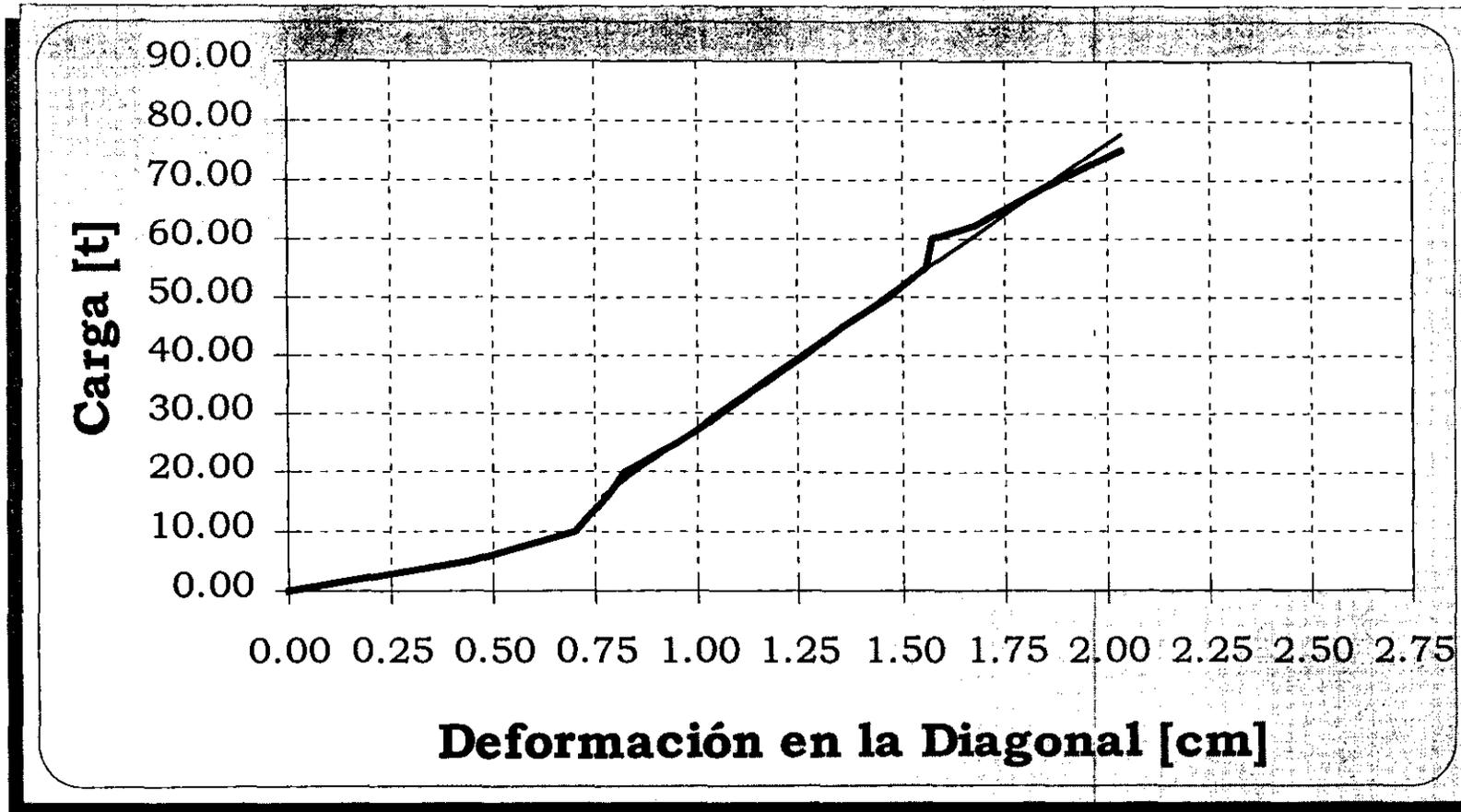
Diafragma #3 - Losacero



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 34.81 t/cm

Figura 3.25.
Curva carga-deformación del diafragma #3 de losacero

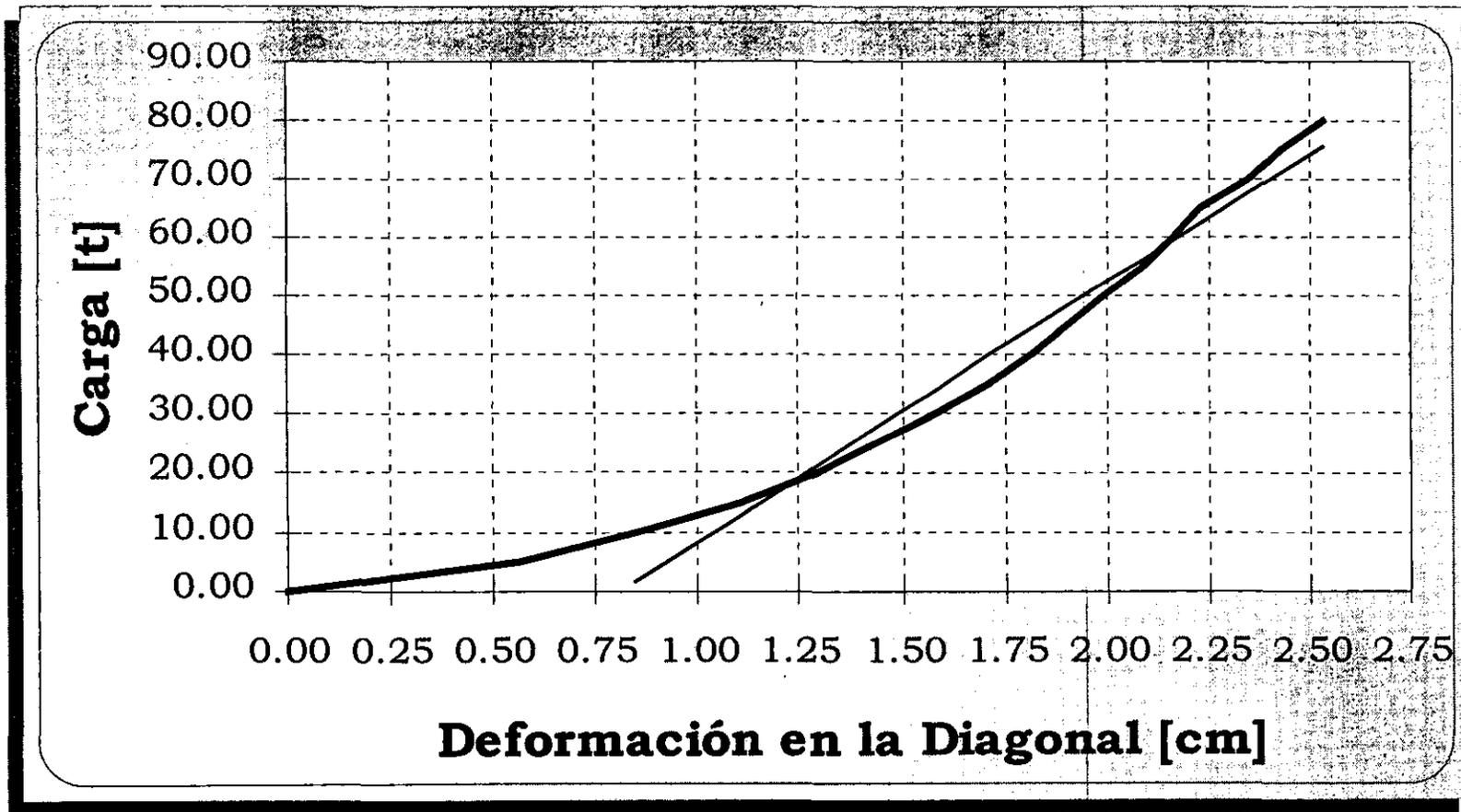
Diafragma #4 - Losacero



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 48.27 t/cm

Figura 3.26.
Curva carga-deformación del diafragma #4 de losacero

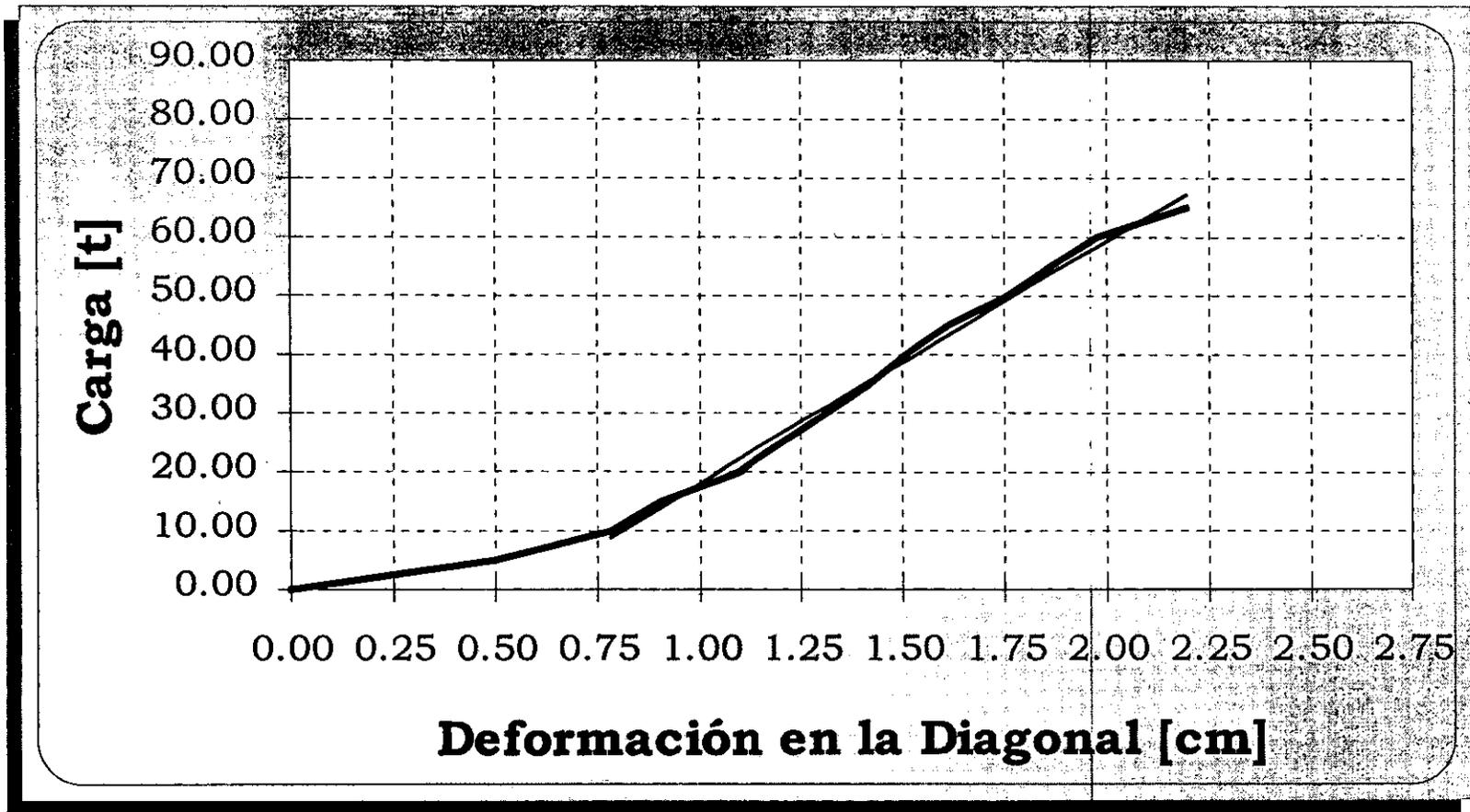
Diafragma #5 - Losacero



- Carga-Deformación
- - - Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 44.08 t/cm

Figura 3.27.
Curva carga-deformación del diafragma #5 de losacero

Diafragma #6 - Losacero



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 41.47 t/cm

Figura 3.28.
Curva carga-deformación del diafragma #6 de losacero

3.4.4. Losa de vigueta-bovedilla

3.4.4.1. Diafragma #1

El diafragma #1 tuvo un espesor constante de 5 cm tanto en los bordes como al centro del claro. El f_c promedio fue de 288.04 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar 80 t.

Ante 80 t aparecieron las primeras grietas orientadas en la dirección diagonal entre los apoyos. La operación sostenida de los gatos llevó al alabeo de la losa, con lo que se consideró que el diafragma había fallado. La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.31.

3.4.4.2. Diafragma #2

El diafragma #2 tuvo un espesor constante de 5 cm tanto en los bordes como al centro del claro. El f_c promedio fue de 308.51 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar 80 t.

Ante 70 t aparecieron las primeras grietas incipientes, orientadas en la dirección diagonal de los apoyos, a las 75 t las grietas fueron evidentes. La operación sostenida de los gatos produjo el alabeo de la losa a una carga de 80 t, con lo que se consideró que el diafragma había fallado. La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.32.

3.4.4.3. Diafragma #3

El diafragma #3 tuvo un espesor constante de 5 cm tanto en los bordes como en el centro del claro. El f_c promedio fue de 291.40 kg/cm². La carga se aplicó en incrementos de 5 t hasta alcanzar 75 t.

Ante 60 t aparecieron las primeras grietas incipientes orientadas en la dirección diagonal entre los apoyos, y a las 70 t las grietas fueron evidentes (Figura 3.29). Aunado a esto, la operación sostenida de los gatos produjo el alabeo de la losa ante una carga de 75 t (Figura 3.30), con lo cual se consideró que el diafragma había fallado. La curva carga-deformación correspondiente se muestra en la figura 3.33.

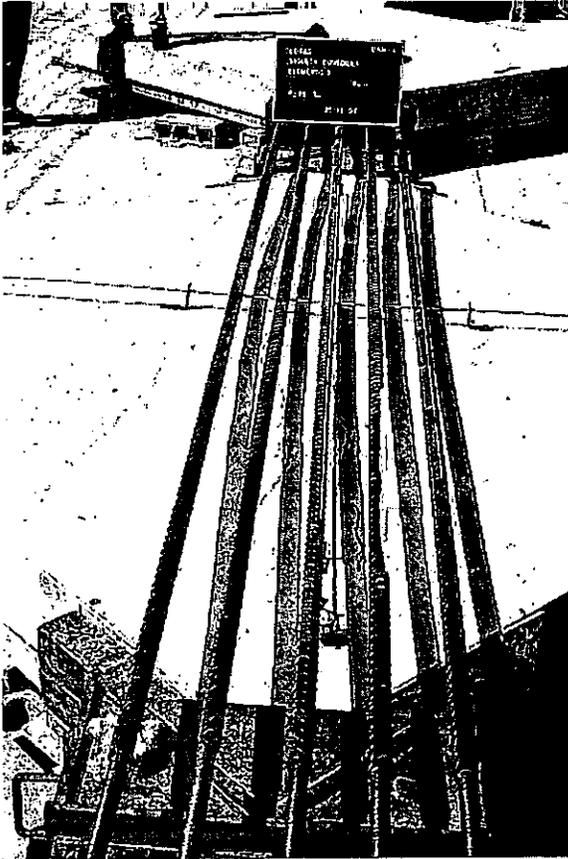


FIGURA 3.29.
Ensayo del diafragma #3 de vigueta-bovedilla.



FIGURA 3.30.
Alabeo de la losa. Diafragma #3.

En las figuras 3.31, 3.32 y 3.33 se muestran las curvas carga-deformación para los tres diafragmas construidos con vigueta-bovedilla. Al igual que para los dos sistemas anteriores, en cada una de ellas se dibujan la curva de mediciones experimentales con línea gruesa y la recta ajustada con línea delgada. En este caso, para el ajuste por mínimos cuadrados se consideraron las deformaciones en la diagonal mayores a 0.20 cm, ya que el reacomodo del mecanismo de carga fue menor a lo presentado en los casos anteriores. Esto se debió a que dicho mecanismo se ajustó mejor a las dimensiones de los tableros aquí utilizados. Al igual que en los sistemas de piso anteriores, para cada diafragma se muestra la pendiente de la recta ajustada.

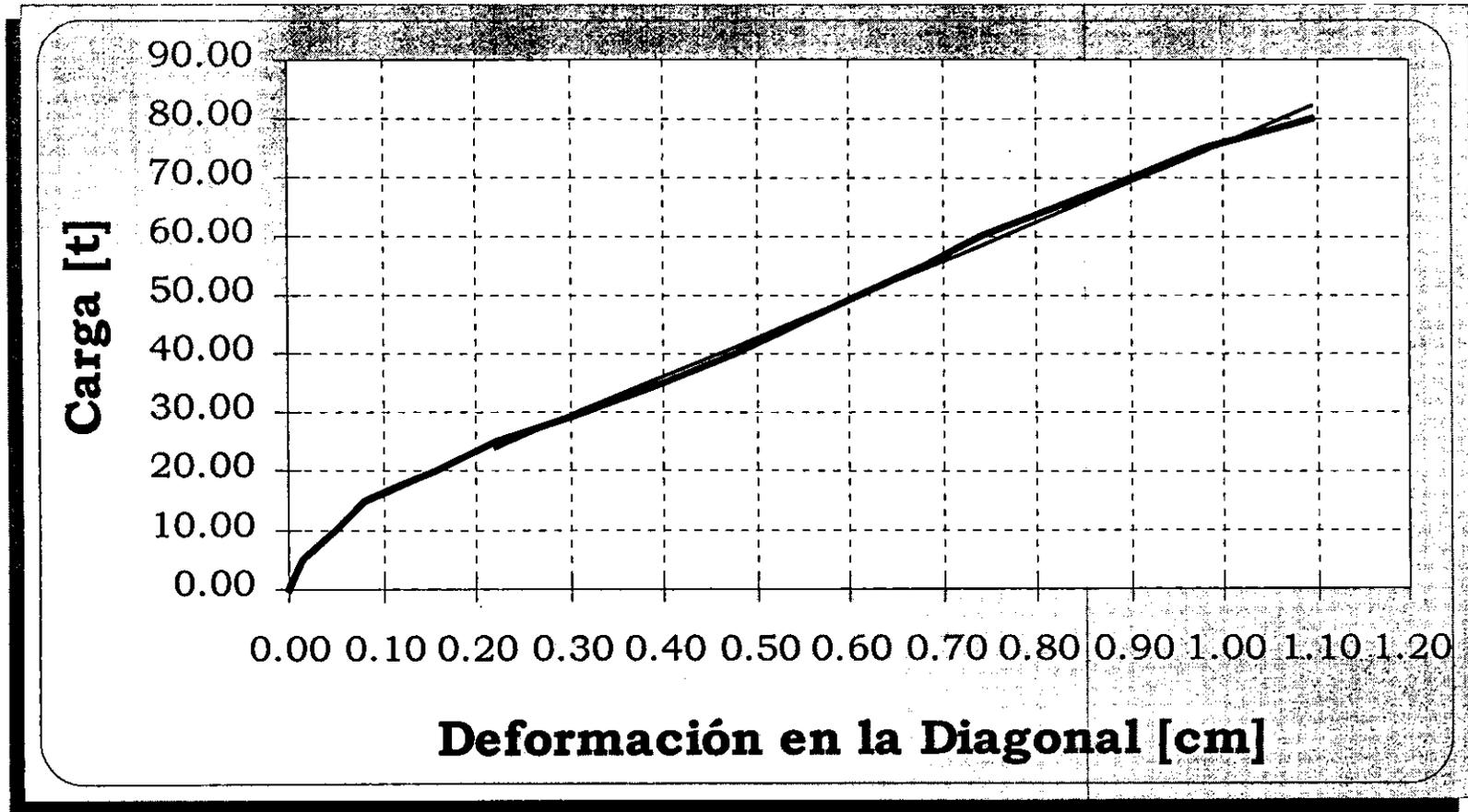
Ahora bien, en este caso la tendencia inicial de las curvas no muestra las irregularidades que en los casos anteriores, esto se puede deber a dos razones principales: la primera de ellas es la presencia de la dala perimetral en los tableros, mientras que la segunda es el mejor ajuste del mecanismo de carga a las dimensiones de los tableros. Estas dos condiciones pudieron haber contribuido a un mejor comportamiento de los especímenes durante el ensayo. Por otro lado, como se mencionó al inicio de este inciso, la presencia de la dala perimetral también contribuyó a que no se presentara el agrietamiento en los apoyos con la subsiguiente ganancia de rigidez.

En la tabla 3.3 se muestra un resumen de las condiciones de falla de cada elemento.

Diafragma	Espesor en los Bordes [cm]	Espesor en el Centro del Claro [cm]	Carga de la 1ª Grieta Diagonal [t]	Carga de Falla [t]	Rigidez Diagonal [t/cm]	Modo de Falla
1	5.00	5.00	80.00	80.00	66.39	Agrietamiento Diagonal
2	5.00	5.00	70.00	75.00	64.83	Agrietamiento Diagonal
3	5.00	5.00	60.00	70.00	52.61	Agrietamiento Diagonal

TABLA 3.3.
Condiciones de falla de losas de vigueta-bovedilla.

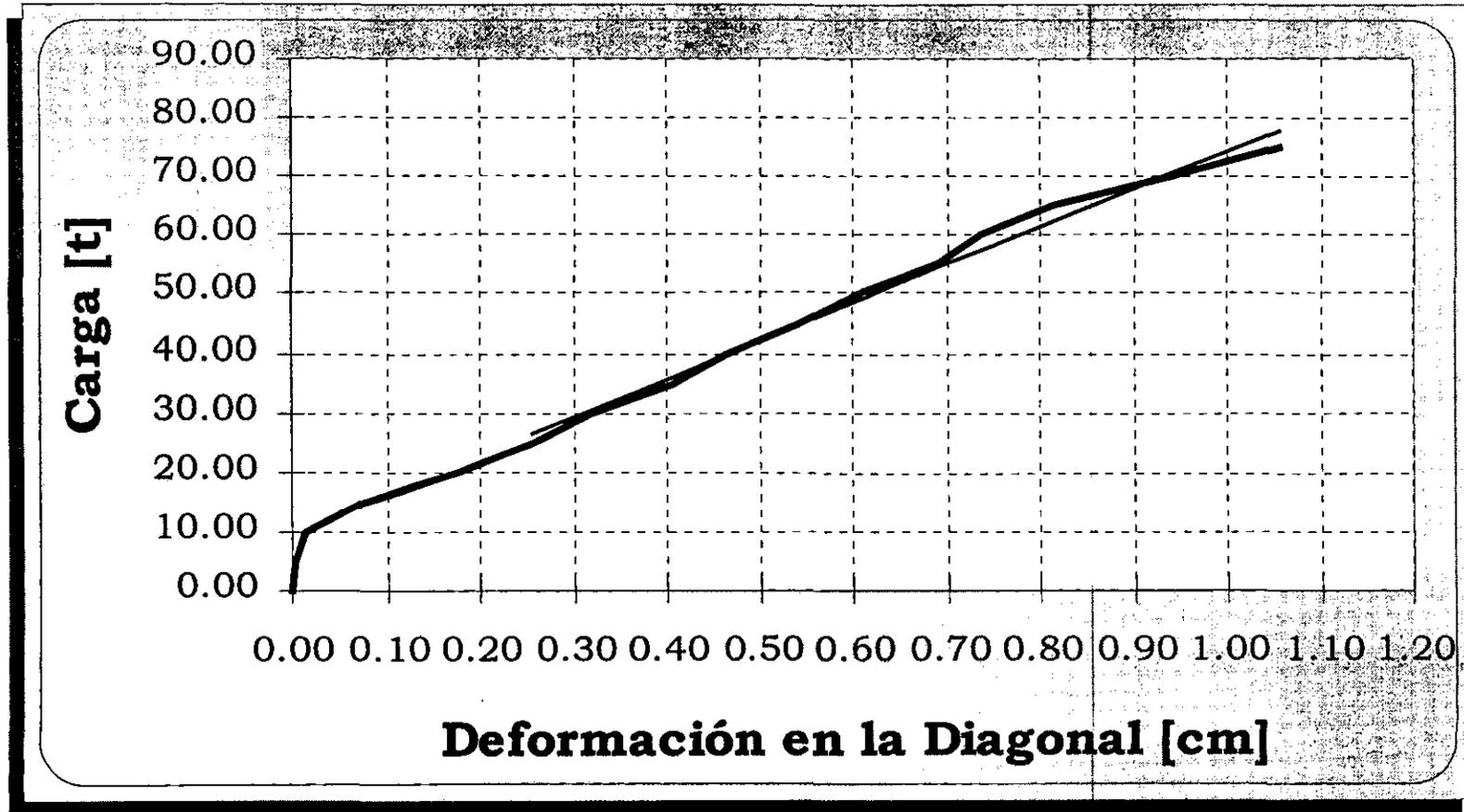
Diafragma #1 - Losa de Vigueta-Bovedilla



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 66.39 t/cm

Figura 3.31.
Curva carga-deformación del diafragma #1 de vigueta-bovedilla

Diafragma #2 - Losa de Vigueta-Bovedilla

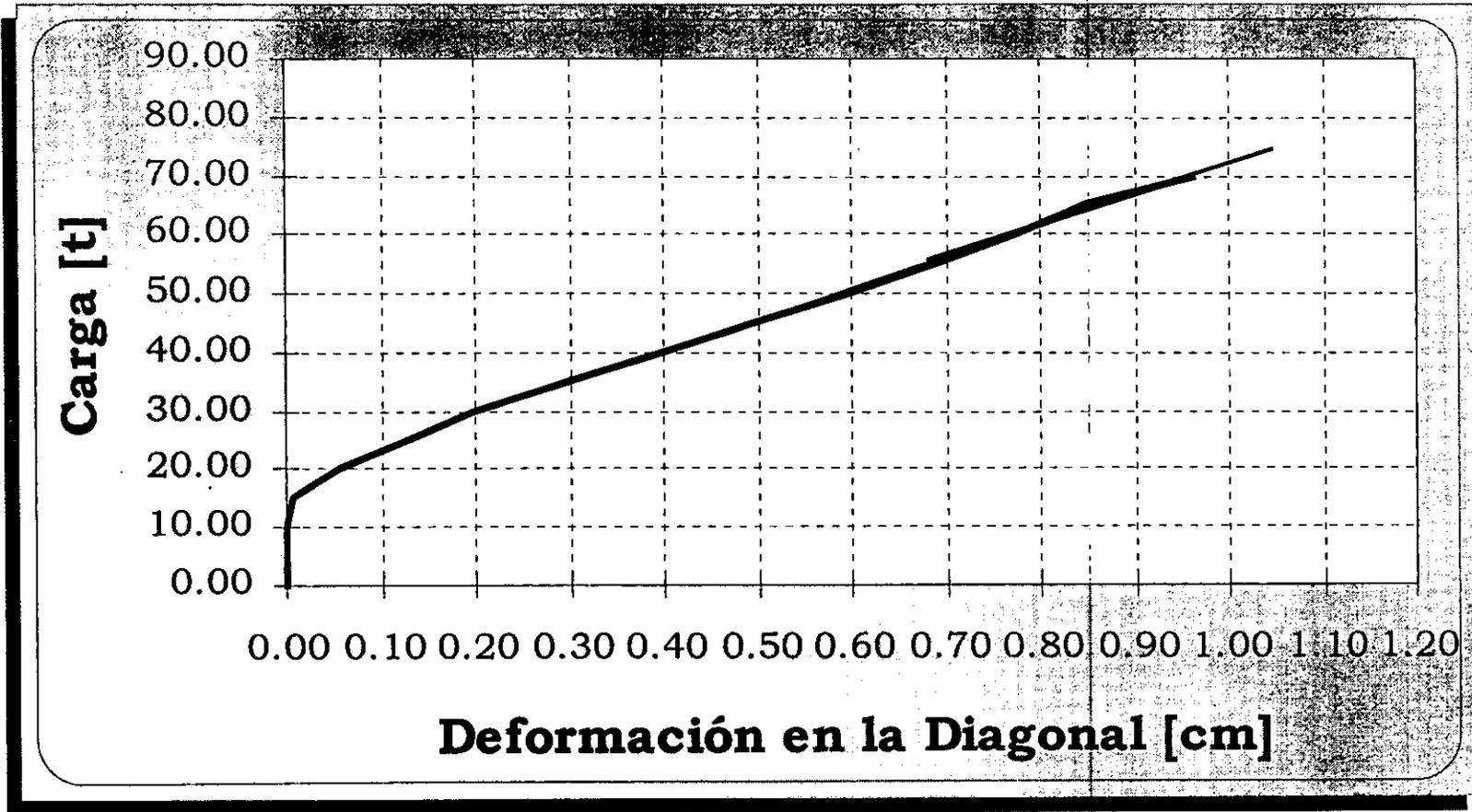


- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 64.83 t/cm

Figura 3.32.

Curva carga-deformación del diafragma #2 de vigueta-bovedilla

Diafragma #3 - Losa de Vigueta-Bovedilla



- Carga-Deformación
- Mínimos Cuadrados. Pendiente (Rigidez) = 52.61 t/cm

Figura 3.33.
Curva carga-deformación del diafragma #3 de vigueta y bovedilla

CAPÍTULO 4

Modelos Analíticos

4.1. EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ DIAGONAL

4.1.1. Modelo con la Teoría de la Elasticidad

El estado de carga al que fueron sometidos los especímenes puede reproducirse matemáticamente utilizando la solución de la Teoría de la Elasticidad¹⁰ al problema de una cuña de espesor unitario a la que se le aplica una carga P por unidad de espesor, en su vértice (Figura 4.1), para simular la mitad de uno de los tableros ensayados.

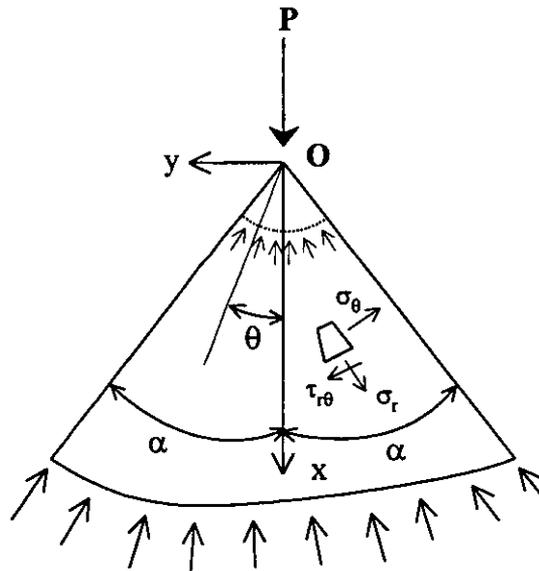


FIGURA 4.1.
Cuña con Carga en su Vértice.

Las condiciones de frontera a lo largo de las caras de la cuña, $\theta = \pm \alpha$, se satisfacen si las componentes de esfuerzos toman los siguientes valores¹⁰:

$$\sigma_r = -\frac{k P \cos \theta}{r}; \quad \sigma_{\theta} = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad (a)$$

La constante k de la primera de las ecuaciones (a) se ajustará para satisfacer las condiciones de equilibrio en el punto O . Para ello, es necesario que la resultante de esfuerzos que actúa sobre una superficie cilíndrica, como la indicada por la línea punteada en la figura 4.1, equilibre la fuerza P . Esto se

logra sumando las componentes en el eje x que actúan sobre cada elemento $r d\theta$ de la superficie: $\sigma_r r d\theta \cos\theta$. Así se obtiene que:

$$P + 2 \int_0^{\alpha} \sigma_r r \cos\theta d\theta = 0$$

Sustituyendo σ_r :

$$P - 2 \int_0^{\alpha} \frac{k P \cos^2\theta}{r} r d\theta = 0$$

$$P - k P \left(\alpha + \frac{1}{2} \operatorname{sen} 2\alpha \right) = 0$$

de donde:

$$k = \frac{1}{\alpha + \frac{1}{2} \operatorname{sen} 2\alpha}$$

Por lo tanto, el esfuerzo radial queda definido por:

$$\sigma_r = - \frac{P \cos\theta}{r \left(\alpha + \frac{1}{2} \operatorname{sen} 2\alpha \right)}$$

Para el caso que nos interesa $\alpha = \pi/4$, entonces:

$$\sigma_r = - \frac{P \cos\theta}{r \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)}; \quad \sigma_\theta = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad (4.1)$$

Una vez que se tienen a las componentes de los esfuerzos, las deformaciones correspondientes pueden obtenerse aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{r \partial \theta}; \quad \gamma_{r\theta} = \frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \quad (b)$$

Asimismo, las deformaciones también están definidas por la ley de Hooke para el estado plano de esfuerzos:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_\theta); \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \mu \sigma_r); \quad \gamma_{r\theta} = \frac{1}{G} \tau_{r\theta} \quad (c)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.1) en (c) e igualándolas con las expresiones (b), se llega a:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= -\frac{P \cos \theta}{\text{Er}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} = \frac{\partial u}{\partial r} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{\mu P \cos \theta}{\text{Er}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} = \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{r \partial \theta} \\ \gamma_{r\theta} &= 0 = \frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Integrando la primera de las ecuaciones (4.2) con respecto de r se tiene que:

$$u = \int -\frac{P \cos \theta}{\text{Er}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} dr = -\frac{P \cos \theta}{\text{E}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \int \frac{dr}{r} = -\frac{P \cos \theta}{\text{E}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r + f(\theta)$$

donde $f(\theta)$ es una función que depende únicamente de θ .

Sustituyendo u en la segunda de las ecuaciones (4.2) e integrándola con respecto de θ se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\mu P \cos \theta}{\text{Er}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} &= \frac{1}{r} \left(-\frac{P \cos \theta}{\text{E}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r + f(\theta) \right) + \frac{\partial v}{r \partial \theta} \\ \frac{\mu P \cos \theta}{\text{Er}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} &= -\frac{P \cos \theta}{\text{Er}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r + \frac{f(\theta)}{r} + \frac{\partial v}{r \partial \theta} \\ v &= \int \left(\frac{\mu P \cos \theta}{\text{E}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} + \frac{P \cos \theta}{\text{E}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r - f(\theta) \right) d\theta \\ v &= \frac{\mu P \sin \theta}{\text{E}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} + \frac{P \sin \theta}{\text{E}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r - \int f(\theta) d\theta + f(r) \end{aligned}$$

donde $f(r)$ es una función que depende únicamente de r .

Sustituyendo u y v en la tercera de las ecuaciones (4.2) se tiene que:

$$\frac{\partial}{r\partial\theta} \left(-\frac{P\cos\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r + f(\theta) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} + \frac{P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r - \int f(\theta) d\theta + f(r) \right) - \frac{1}{r} \left(\frac{\mu P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} + \frac{P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r - \int f(\theta) d\theta + f(r) \right) = 0$$

y como,

$$\frac{\partial}{\partial\theta} \left(-\frac{P\cos\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r + f(\theta) \right) = \frac{P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r + f'(\theta)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} + \frac{P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \ln r - \int f(\theta) d\theta + f(r) \right) = \frac{1}{r} \frac{P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} + f'(r)$$

al final, la tercera de las ecuaciones 4.2, queda de la siguiente forma:

$$\frac{f'(\theta)}{r} + \frac{P\text{sen}\theta}{Er\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} + f'(r) - \frac{\mu P\text{sen}\theta}{Er\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} + \frac{1}{r} \int f(\theta) d\theta - \frac{f(r)}{r} = 0$$

Si se adoptan los siguientes valores,

$$f(\theta) = -\frac{(1-\mu)P}{2E\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\right)} \theta \text{sen}\theta + A\text{sen}\theta + B\cos\theta$$

$$f(r) = Cr$$

donde las constantes A , B y C son constantes de integración que deben ser determinadas a partir de las condiciones de apoyo, entonces la tercera de las ecuaciones 4.2 se reduce a:

$$-\frac{(1-\mu)P}{2E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)}\text{sen}\theta + \frac{P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)} - \frac{\mu P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)} - \frac{(1-\mu)P}{2E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)}\text{sen}\theta = 0$$

a partir de la cual se observa que la igualdad se cumple.

Finalmente, las expresiones para los desplazamientos son:

$$u = -\frac{P\cos\theta}{E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)}\ln r - \frac{(1-\mu)P\theta}{2E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)}\text{sen}\theta + A\text{sen}\theta + B\cos\theta$$

$$v = \frac{\mu P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)} + \frac{P\text{sen}\theta}{E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)}\ln r - \frac{(1-\mu)P\theta}{2E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)}\cos\theta + \frac{(1-\mu)P\text{sen}\theta}{2E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)} + A\cos\theta - B\text{sen}\theta + Cr$$
(d)

Suponiendo que los puntos sobre el eje x (Figura 4.1) no tienen desplazamientos laterales, se tiene que $v=0$ para $\theta=0$. Asimismo, también se cumple que $\partial v/\partial r=0$ para $\theta=0$. Sustituyendo estas condiciones en las ecuaciones (d) se obtiene que $A=C=0$.

Con estos valores para las constantes de integración A y C , el desplazamiento de los puntos sobre el eje x es:

$$(u)_{\theta=0} = -\frac{P}{E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)}\ln r + B$$

Para obtener B se asumirá que un punto a una distancia " D " del origen, que en nuestro caso sería la mitad de la diagonal de un tablero (Figura 4.1), no se mueve en dirección x ; así pues:

$$B = \frac{P}{E\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\right)}\ln D$$

Por lo tanto, las expresiones para calcular los desplazamientos en la cuña finalmente son:

$$\begin{aligned}
 u &= -\frac{P \cos \theta}{E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} \ln r - \frac{(1-\mu) P \theta}{2E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} \operatorname{sen} \theta + \frac{P \cos \theta}{E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} \ln D \\
 v &= \frac{\mu P \operatorname{sen} \theta}{E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} + \frac{P \operatorname{sen} \theta}{E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} \ln r - \frac{(1-\mu) P \theta}{2E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} \cos \theta + \frac{(1-\nu) P \operatorname{sen} \theta}{2E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} - \frac{P \operatorname{sen} \theta}{E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} \ln D
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Que para $\theta = 0$, sobre el eje x , se convierten en:

$$u = -\frac{P}{E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} \ln r + \frac{P}{E \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \right)} \ln D
 \tag{4.4}$$

$$v = 0$$

En el origen, $r=0$, la primera de las ecuaciones anteriores da desplazamientos infinitos. Para evitar esta singularidad, es necesario asumir, como se hizo en un principio, que una porción de material, alrededor del punto de aplicación de la carga, es cortada por una superficie cilíndrica de radio pequeño y que cerca del origen el primer término de la expresión anterior es despreciable.

A partir de estos resultados es posible proponer una ecuación que permita calcular la rigidez teórica en el plano en dirección de la carga aplicada a la cuña ($\theta = 0$) dividiendo la carga total aplicada Pt entre el desplazamiento u . Como el modelo de la cuña simula únicamente a la mitad de un tablero, la rigidez así calculada es el doble de la que se obtendría al simular el tablero completo, por lo tanto, la ecuación que permite evaluar teóricamente a la rigidez diagonal en el plano del tablero es la siguiente:

$$k_{\text{diagonal}} = \frac{Et(\pi + 2)}{8 \ln D}
 \tag{4.5}$$

Si se considera que, para el caso que nos ocupa, D sea la mitad de la longitud de la diagonal de los especímenes ensayados; entonces es posible calcular los valores teóricos de la rigidez diagonal de los tableros y compararlos contra los determinados experimentalmente. En los siguientes incisos se presentan los resultados de esta comparación y se advierte una diferencia notable entre los valores teóricos y los experimentales. La razón de esta discrepancia se puede encontrar en las imprecisiones para determinar las características elásticas de los materiales, así como en la presencia de deformaciones no despreciables que se presentan fuera del plano de los especímenes durante el proceso de carga.

Por lo anterior, en forma adicional se calculó un factor correctivo β para cada tablero ensayado, a fin de proponer, de manera preliminar, un factor correctivo

para cada uno de los tipos de sistema de piso ensayados. Dicho factor β se obtiene del cociente de la rigidez experimental entre la rigidez teórica:

$$\beta = \frac{k_{\text{experimental}}}{k_{\text{teórica}}}$$

Sin embargo, debido a las características presentadas por los tableros en los que la falla se dio por aplastamiento en los apoyos, éstos últimos no se tomarán en cuenta para el cálculo del valor β_{promedio} de cada sistema de piso, ya que como se mencionó en el capítulo 3, la baja rigidez observada en dicho tipo de tableros se deba probablemente a una degradación de rigidez local y no sea representativa de lo ocurrido en el resto del elemento.

4.1.2.- Losa maciza

Para evaluar la rigidez diagonal de este tipo de especímenes se asumió que ésta depende únicamente del concreto, para lo cual se utilizó el espesor promedio del elemento, el f_c promedio de los cilindros testigo y la expresión propuesta por las NTC-96⁶ para concreto clase 2:

$$E = 8000\sqrt{f_c}$$

Por su parte, los valores experimentales corresponden a la pendiente de las rectas ajustadas por mínimos cuadrados a las curvas carga-deformación presentadas en el capítulo 3. En este punto es importante recordar que los valores aquí utilizados para la rigidez experimental consideran las deformaciones en la diagonal mayores a 0.75 cm, para los diafragmas #1 y #2, y de 1.00 cm para el diafragma #3, ya que a partir de estos valores se considera que el sistema de medición ya experimentó los reajustes necesarios para comenzar a transmitir adecuadamente la carga a los especímenes.

En la tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos, para la determinación de los factores correctivos β , mediante los cálculos del apéndice A. En este caso, no se tomará en cuenta el diafragma #3 para el cálculo del valor β_{promedio} por las condiciones en las que se dio su falla.

Diafragma	$k_{\text{experimental}}$ [t/cm]	$k_{\text{teórico}}$ [t/cm]	β
1	72.43	181.05	0.40
2	70.65	162.54	0.43
3	49.76	214.26	0.23
$\beta_{\text{Promedio losa maciza}} =$			0.41

TABLA 4.1.

Factor correctivo β de la ecuación 4.5 para losas macizas.

4.1.3. Losacero

En este caso se consideró que la rigidez diagonal depende únicamente del firme de concreto colado sobre los elementos metálicos. Como espesor promedio se toma la suma del espesor promedio t_1 más el 50% del espesor promedio t_2 del elemento (Figura 3.6). Para este sistema de piso, los valores utilizados para la rigidez experimental consideran las deformaciones en la diagonal mayores a 0.75 cm, con lo cual también se trata de tomar en cuenta los ajustes sufridos por el sistema de carga.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos, para la determinación de los factores correctivos β , mediante los cálculos del apéndice B. De igual manera a lo realizado para el sistema de losa maciza, tampoco en este caso se considerarán los tableros con falla en los apoyos, es decir diafragmas #1, #2 y #6, para el cálculo del valor $\beta_{promedio}$.

Diafragma	$k_{experimental}$ [t/cm]	$k_{teórico}$ [t/cm]	β
1	28.26	151.94	0.19
2	29.66	154.88	0.19
3	34.81	126.68	0.27
4	48.27	136.28	0.35
5	44.08	145.51	0.30
6	41.47	148.82	0.28
$\beta_{Promedio\ losacero} =$			0.31

TABLA 4.2.

Factor correctivo β de la ecuación 4.5 para losacero.

4.1.4. Losa de vigueta-bovedilla

Para el cálculo de la rigidez diagonal de este tipo de especímenes se tomó en cuenta únicamente el firme de concreto colado sobre los elementos prefabricados, despreciando en este caso la contribución de la dala perimetral. En este caso, los valores utilizados de la rigidez experimental consideraron las deformaciones en la diagonal mayores a 0.20 cm, ya que el reacomodo del mecanismo de carga fue menor a lo presentado en los casos anteriores

En la tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos, para la determinación de los factores correctivos β , mediante los cálculos del apéndice C. A diferencia de lo realizado para los dos sistemas anteriores, aquí se tomaron en cuenta todos los tableros, ya que ninguno de ellos presentó la falla por aplastamiento de los apoyos.

Diafragma	$k_{\text{experimental}} \text{ [t/cm]}$	$k_{\text{teórico}} \text{ [t/cm]}$	β
1	66.39	113.11	0.59
2	64.83	117.06	0.55
3	52.61	113.77	0.46
$\beta_{\text{Promedio vigueta-bovedilla}} =$			0.53

TABLA 4.3.

Factor correctivo β de la ecuación 4.5 para losas de vigueta-bovedilla.

4.2. EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ LATERAL

La verificación del comportamiento como diafragma rígido de un tablero, depende de la rigidez lateral del sistema de piso. Por facilidad, en este trabajo se realizaron los ensayos reproduciendo una condición de carga que permite determinar la rigidez diagonal de los tableros, por lo que a continuación se deriva la rigidez lateral (k_{lateral}) a partir de la rigidez diagonal (k_{diagonal}).

4.2.1 Relación entre la Rigidez Lateral y la Rigidez Diagonal

La relación entre k_{lateral} y k_{diagonal} puede obtenerse geoméricamente para un tablero cuadrado cargado diagonalmente, tal como se muestra en la figura 4.2.

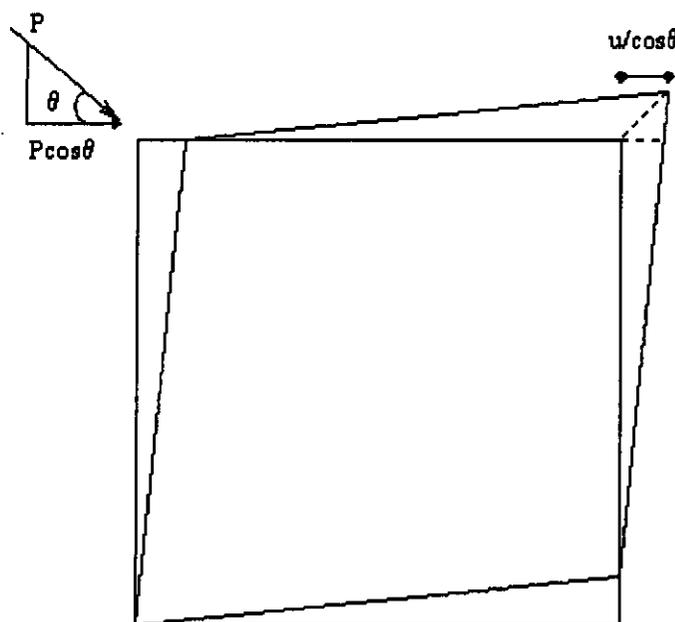


FIGURA 4.2.

Tablero Deformado.

De la figura se observa que, para valores pequeños de la deformación:

$$\begin{aligned}k_{\text{lateral}} &= \frac{P \cos \theta}{\frac{u}{\cos \theta}} \\k_{\text{lateral}} &= \frac{P}{u} \cos^2 \theta \\k_{\text{diagonal}} &= \frac{P}{u}\end{aligned}\tag{e}$$

Por lo tanto:

$$k_{\text{lateral}} = k_{\text{diagonal}} \cos^2 \theta$$

como $\theta = 45^\circ$:

$$k_{\text{lateral}} = \frac{1}{2} k_{\text{diagonal}}\tag{f}$$

Aplicando la teoría de la elasticidad, de acuerdo con la ecuación 4.5 se tiene que:

$$k_{\text{lateral}} = \frac{Et(\pi + 2)}{16 \ln D}\tag{4.6}$$

Como los factores de corrección β representan la relación entre la k_{diagonal} teórica y la experimental, los factores siguen siendo válidos para la relación correspondiente a la k_{lateral} pues en este caso, tanto la teórica como la experimental se verían afectadas por $\cos^2 \theta$.

4.2.2. Analogía del Muro

Otra forma de obtener la k_{lateral} independientemente de la k_{diagonal} , es siguiendo un procedimiento utilizado en la práctica, en el cual se considera al sistema de piso como un muro empotrado en su base al que se le aplica una carga horizontal P_h (Figura 4.3).

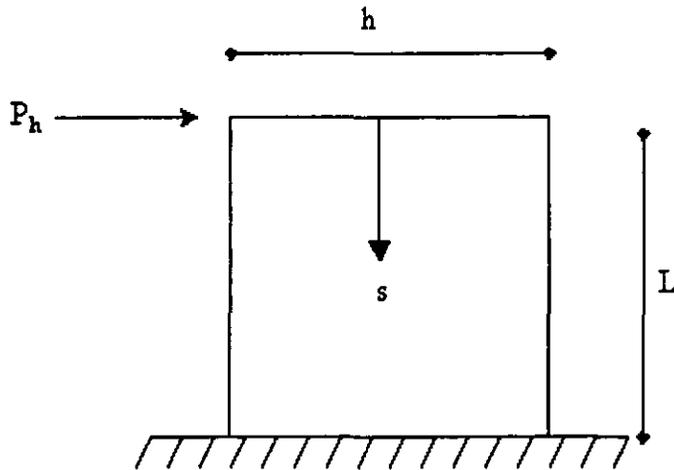


FIGURA 4.3:
Tablero Empotrado con Carga Horizontal en su Vértice.

La ecuación que permite calcular la rigidez del elemento mostrado en la figura 4.3 se obtiene a partir de la teoría básica del análisis estructural. Se parte del hecho de que el trabajo por deformación W del elemento analizado puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación¹¹:

$$W = \int_0^L k \frac{V(s)^2}{2GA} ds + \int_0^L \frac{M(s)^2}{2EI} ds \quad (g)$$

donde A , I y k son respectivamente el área, momento de inercia (respecto de un eje perpendicular al elemento) y el factor de forma de la sección transversal; $V(s)$ y $M(s)$ son la fuerza cortante y el momento flexionante a lo largo del elemento, en este caso $V(s) = P_h$ y $M(s) = P_h s$.

Al sustituir los valores de $V(s)$ y $M(s)$ en la ecuación (g) se obtiene:

$$\begin{aligned} W &= \int_0^L k \frac{P_h^2}{2GA} ds + \int_0^L \frac{P_h^2 s^2}{2EI} ds \\ W &= \frac{kP_h^2}{2GA} \int_0^L ds + \frac{P_h^2}{2EI} \int_0^L s^2 ds \\ W &= \frac{kP_h^2}{2GA} [s]_0^L + \frac{P_h^2}{2EI} \left[\frac{s^3}{3} \right]_0^L \\ W &= \frac{kP_h^2 L}{2GA} + \frac{P_h^2 L^3}{6EI} \end{aligned} \quad (h)$$

Para obtener la deformación del elemento en la dirección de la fuerza se aplica el primer teorema de Castigliano, el cual establece que:

$$\delta = \frac{\partial W}{\partial P_h} \quad (i)$$

para este caso:

$$\delta = \frac{\partial}{\partial P_h} \left(\frac{kP_h^2 L}{2GA} + \frac{P_h^2 L^3}{6EI} \right) \quad (j)$$

$$\delta = \frac{kP_h L}{GA} + \frac{P_h L^3}{3EI}$$

A partir de este punto se puede obtener la rigidez lateral considerando únicamente el primer término de la ecuación (j), con lo cual se estarían despreciando las deformaciones por flexión y se tendría a un elemento, semejante a un muro, trabajando exclusivamente a cortante, de esta forma, una primera aproximación de la rigidez lateral, frecuente en la literatura, sería la siguiente:

$$k_{\text{lateral cortante}} = \frac{GA}{kL} \quad (k)$$

pero, recordando que para el caso en estudio:

$$A = ht \quad h = L \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (l)$$

y que el factor de forma para una sección transversal rectangular es $k=1.2$, la ecuación de la rigidez lateral de un elemento de cortante es:

$$k_{\text{lateral cortante}} = \frac{Et}{2.4(1+\mu)} \quad (4.7)$$

Por otra parte, es posible seguir trabajando con ambos términos de la ecuación (j), en tal caso, dado que el momento de inercia queda definido como:

$$I = \frac{tL^3}{12}$$

Al ser sustituidos estos valores en la ecuación (j) se obtiene que:

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{1.2P_h L}{GLt} + \frac{4P_h L^3}{Et^3} \\ \delta &= \frac{2.4P_h(1+\mu)}{Et} + \frac{4P_h}{Et} \\ \delta &= P_h \left[\frac{2.4(1+\mu)}{Et} + \frac{4}{Et} \right]\end{aligned}\tag{m}$$

De la última ecuación es posible obtener la rigidez lateral de un elemento que considera tanto las deformaciones de cortante como las de flexión, con lo cual, la expresión finalmente queda de la siguiente forma:

$$k_{lateral} = \frac{Et}{2.4(1+\mu)+4}\tag{4.8}$$

4.2.3. Comparación de los Modelos

Como se puede apreciar, en las ecuaciones 4.6, 4.7 y 4.8, en todos los casos la rigidez lateral depende del producto Et , mismo que a su vez depende del espesor del elemento y de las características del material. Esta similitud permite expresar las ecuaciones en términos de Et con el fin de hacer una comparación de los resultados que se obtendrían con cada una de ellas. Sin embargo, antes de proceder a realizar la comparación entre las ecuaciones, es necesario establecer un criterio para homologar los resultados obtenidos con la ecuación 4.6, ya que en este caso la rigidez lateral depende también de la mitad de la longitud de la diagonal D . Para ello, se supone que esta ecuación puede ser aplicada en tableros cuadrados de sistemas de piso para uso habitacional, los cuales pueden variar la dimensión de sus lados entre 2 y 6 metros. De esta forma, los valores que pueden ser asignados a D varían entre 1.41 y 4.24 metros, con lo que, el término constante de la ecuación 4.6 variará entre 0.053 y 0.065. En adelante, para fines de comparación, se tomará el promedio de ambos límites, esto es, 0.059. Por último, para el uso de las ecuaciones 4.7 y 4.8 se adopta un valor teórico para $\mu=0.19$.

De acuerdo con todo lo anterior, es posible realizar la comparación entre los resultados obtenidos con las diferentes ecuaciones entre sí, así como con los resultados experimentales, para los cuales se tomaron los promedios de las rigideces laterales obtenidas a partir de las rigideces diagonales, factorizadas por el producto Et correspondiente. Es necesario comentar, que esta comparación podría no ser del todo válida para los tableros fabricados con vigueta-bovedilla, ya que en este caso no se está tomando en cuenta la contribución de los elementos prefabricados, sin embargo, a falta de un modelo más preciso, se establece esta comparación reconociendo que es limitada. Esta comparación se muestra en la tabla 4.4, en la cual se puede apreciar que el

modelo que más se acerca a los resultados experimentales es el desarrollado utilizando la teoría de la elasticidad.

Modelo	$\frac{k_{lateral}}{Et}$
Teoría de la Elasticidad (Ec. 4.6)	0.059
Cortante (Ec. 4.7)	0.420
Flexión y Cortante (Ec. 4.8)	0.146
Experimental _{Losa Maciza Promedio}	0.025
Experimental _{Losacero Promedio}	0.019
Experimental _{Losa Vigueta-Bovedilla Promedio}	0.032

TABLA 4.4.

Comparación entre modelos teóricos y experimentales.

En la tabla 4.5 se presentan además los factores correctivos β obtenidos con las ecuaciones 4.6, 4.7 y 4.8 y los valores promedio de las rigideces laterales experimentales.

Especímenes	$\beta = \frac{k_{experimental}}{k_{teórica}}$		
	Teoría de la Elasticidad	Cortante	Flexión y Cortante
Losa Maciza	0.423	0.059	0.171
Losacero	0.322	0.045	0.130
Losa Vigueta-Bovedilla	0.542	0.076	0.219

TABLA 4.5.

Factores correctivos β obtenidos con la ecuación 4.6.

Como se puede ver en la tabla 4.5, los valores de corrección β obtenidos con la ecuación 4.6, difieren un poco de los valores promedio de las tablas 4.1 a 4.3, derivados de las rigideces diagonales debido al uso de valores promedio. Además, es evidente que los modelos usados comúnmente en la práctica, a partir de la analogía con un muro empotrado en la base, pueden llegar a presentar diferencias mucho mayores con respecto a lo observado experimentalmente. Asimismo, a partir de estos resultados, que tienen la limitación de estar basados en el estudio de un número reducido de casos, que a su vez tiene la limitante de no reproducir las condiciones de apoyo encontradas en la práctica, se pueden adoptar, preliminarmente, valores de corrección β para poder aplicar los modelos estudiados, particularmente el derivado de la teoría de la elasticidad, para el cálculo de la rigidez de los sistemas de piso y, en consecuencia, para evaluar su comportamiento como diafragmas de tableros libres en su periferia.

4.3. MODELO NUMÉRICO

Una vez revisados los factores correctivos propuestos en el inciso anterior, es obvia la gran diferencia que existe entre la rigidez calculada a partir de los modelos teóricos y la obtenida de los resultados experimentales. Es por ello, que, de manera adicional, se desarrolló un modelo numérico utilizando la teoría de los elementos finitos con el fin de explicar la diferencia observada, misma que presumiblemente se debe a la ocurrencia de deformaciones fuera del plano observados durante los ensayos. A continuación se describe el modelo desarrollado, así como los resultados obtenidos, no obstante, es preciso aclarar que sólo se pretendió reproducir lo ocurrido, de manera cualitativa, con un tablero de losa maciza, en el cual se observó una deformación fuera del plano de aproximadamente 10 cm al terminar el ensayo.

4.3.1. Descripción del Modelo

El modelo se desarrolló utilizando el programa de cómputo denominado mTAB-STRESS¹². Se consideró como punto de partida las características geométricas y de resistencia del diafragma #1 de losa maciza. El tablero se modeló utilizando elementos placas que consideraban esfuerzos en el plano y esfuerzos de flexión, todos los elementos tuvieron las mismas características geométricas y de material. Se consideró un espesor promedio de 12.85 cm y un valor inicial del módulo de elasticidad $E=115.13 \text{ t/cm}^2$ (Figura 4.4).

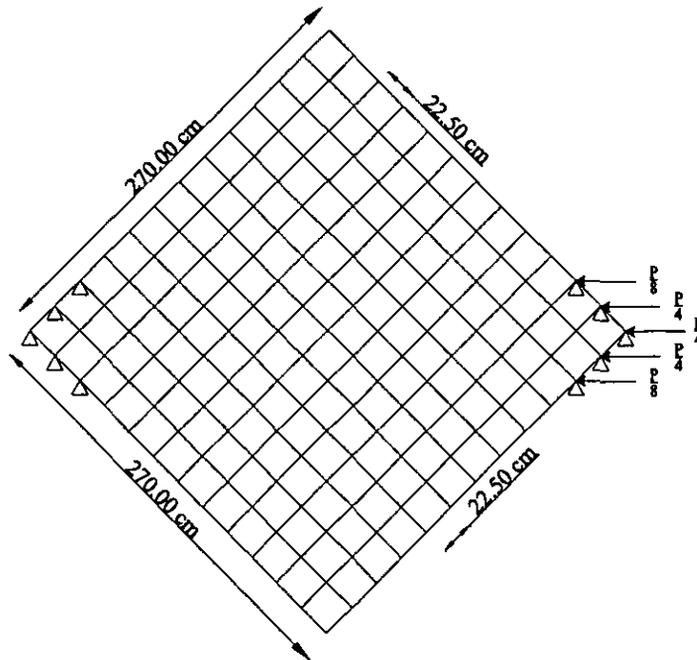


FIGURA 4.4.
Modelo de Elementos Finitos.

Las condiciones de apoyo del tablero fueron una variable importante en el proceso de análisis, en una primera etapa sólo se apoyó al tablero en las dos esquinas de aplicación de la carga, tal y como se realizó durante el ensayo; una segunda etapa consideró al tablero con apoyos simples en las cuatro esquinas, posteriormente, se supuso al tablero simplemente apoyado en todo su perímetro y, por último, se apoyó al tablero en todo su perímetro considerando la restricción al giro.

Para cada condición de apoyo se reprodujo la última parte de la prueba, es decir, se le aplicaron al tablero cargas diagonales que fueron de 80 t a 105 t, obteniendo, para cada nivel de carga, su correspondiente deformación diagonal. Ahora bien, las condiciones iniciales no fueron las de un tablero totalmente plano y sin agrietamiento, de hecho se eligió la carga de 80 t porque precisamente, a ese nivel se observó la aparición de las primeras grietas, así como deformaciones fuera del plano considerables, es por ello que, para iniciar el proceso de carga, se consideró el momento de inercia de la sección agrietada del tablero y una deformación fuera del plano de 5.0 cm. El momento de inercia de la sección agrietada se calculó utilizando la ecuación propuesta por el ACI para un momento máximo de 400 t-cm producido por la carga de 80 t y la flecha de 5.0 cm, sin embargo, como este parámetro no es utilizado directamente en el modelado de las placas, se obtuvo la relación entre el momento de inercia de la sección sin agrietar y el momento de inercia de la sección agrietada, y se afectó el módulo de elasticidad por dicho valor para lograr así la reducción de la rigidez a flexión del tablero. Por otro lado, se utilizó la deformación inicial de 5.0 cm considerando que ésta se produjo por la acción de las cargas perpendiculares al plano del tablero y por defectos constructivos.

En cada nivel de carga se obtuvieron las deformaciones fuera del plano producidas por la carga diagonal, las cuales se sumaban a las anteriores antes de proceder al siguiente nivel de carga.

4.3.2. Resultados

Para cada condición de apoyo se obtuvieron las deformaciones diagonales para las cargas de 80, 90, 100 y 105 t. A partir de dichos datos se obtuvo el ajuste por mínimos cuadrados para cada caso y se tomó como la rigidez del tablero a la pendiente de la recta ajustada. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Condición de Apoyo	$k_{diagonal}$ [t/cm]	Δ_{Final} Perp. al Plano [cm]
Dos Esquinas	80.28	8.83
Cuatro Esquinas	142.89	7.05
Perímetro Simplemente Apoyado	181.11	6.00
Perímetro Restringido al Giro	194.56	5.68

TABLA 4.6.

Resumen de resultados para modelo numérico.

El principal objetivo de este modelo era el de reproducir, de forma aproximada, lo ocurrido con un tablero de losa maciza al ser ensayado en el laboratorio. Como se puede observar en la tabla 4.6, la rigidez obtenida para la condición en la que únicamente las dos esquinas de aplicación de la carga estaban apoyadas se acerca bastante a lo obtenido experimentalmente en este trabajo (Tabla 4.1).

Por otro lado, los valores obtenidos con el modelo de la Teoría de la Elasticidad (Tabla 4.1) son semejantes a los derivados del modelo numérico cuando se considera el apoyo perimetral como se puede observar en la tabla 4.6.

De los resultados del modelo numérico se desprende la importancia de las deformaciones fuera del plano de la losa, asociados a sus condiciones de apoyo, en su comportamiento como diafragma rígido. En la tabla 4.6 se observa que la rigidez del tablero en estudio puede sufrir variaciones de más de 100% al modificar dichas condiciones de apoyo.

4.4. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE

4.4.1. Introducción Teórica

Para evaluar la resistencia a cortante en su plano de los sistemas de piso aquí estudiados se utilizan las disposiciones de las NTC-96⁶ y del ACI 318-95⁸. En ambos casos los tableros ensayados se consideran como muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano. A continuación se hace un breve resumen de las ecuaciones utilizadas en los cálculos para evaluar la resistencia.

4.4.1.1. NTC-96⁶

En el inciso 4.5.2 c) de las NTC-96⁶ se dice que: la fuerza cortante, V_{CR} , que toma el concreto en muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano se determinará con el criterio siguiente:

Si la relación de altura a largo horizontal, H/L , del muro no excede de 1.5, que sería el caso en la mayoría de los tableros típicos de sistemas de piso, se aplicará la expresión:

$$V_{CR} = 0.85F_{Rt}L\sqrt{f'_c}$$

donde :

- f^*c resistencia nominal del concreto a compresión [kg/cm²]
- t espesor del tablero [cm]
- L longitud horizontal del tablero [cm]
- F_R factor de resistencia

Por otra parte, el refuerzo necesario por fuerza cortante se determinará con el criterio siguiente, respetando los requisitos por refuerzo mínimo.

La cuantía de acero horizontal, ρ_h , se calculará con la expresión:

$$\rho_h = \frac{V_u - V_{CR}}{F_R f_y d t} \quad (4.9)$$

y la de refuerzo vertical, ρ_v , con:

$$\rho_v = 0.0025 + 0.5 \left(2.5 - \frac{H}{L} \right) (\rho_h - 0.0025) \quad (4.10)$$

donde:

$$\rho_h = \frac{A_{vh}}{s_h t}$$
$$\rho_v = \frac{A_{vv}}{s_v t}$$

- s_h, s_v separaciones de los refuerzos horizontal y vertical, respectivamente [cm]
- A_{vh} área de refuerzo horizontal comprendida en una distancia s_h [cm²]
- A_{vv} área de refuerzo vertical comprendida en una distancia s_v [cm²]
- f_y esfuerzo de fluencia del acero [kg/cm²]
- H altura total del tablero [cm]
- L longitud horizontal del tablero [cm]
- V_u fuerza cortante actuante en el plano del tablero [kg]

No es necesario que la cuantía de refuerzo vertical por fuerza cortante sea mayor que la de refuerzo horizontal. Si la relación H/L no excede de 2.0, la cuantía de refuerzo vertical no debe ser menor que la de refuerzo horizontal.

Las cuantías de refuerzo horizontal y vertical en cada dirección no serán menores de 0.0025. El refuerzo se colocará uniformemente distribuido con separación no mayor de 35 cm. Se pondrá en dos capas, cada una próxima a una cara del tablero, cuando el espesor de éste exceda de 15 cm, o el esfuerzo cortante medio debido a las cargas horizontales de diseño sea mayor que:

$$0.6\sqrt{f \cdot c}$$

en caso contrario, se podrá colocar en una capa a medio espesor. En ningún caso se admitirá que la fuerza cortante de diseño V_u , sea mayor que:

$$2FRLt\sqrt{f \cdot c}$$

Para los tres tipos de sistema de piso estudiados en este trabajo se utilizarán las ecuaciones anteriores para evaluar su resistencia a cortante en el plano, con las modificaciones pertinentes de acuerdo a las características que presenta cada uno. No obstante, hay que recordar que, en todos los casos, el diseño original de los elementos se hizo siguiendo las recomendaciones hechas para proveer de resistencia adecuada ante cargas perpendiculares al plano del espécimen, con lo cual se obtuvieron cuantías de refuerzo ligeramente menores a las mínimas requeridas si se hubieran revisado como tableros sujetos a fuerzas horizontales en su plano.

4.4.1.2. ACI 318-95⁸

Esta referencia define a los diafragmas como elementos estructurales, tales como sistemas de piso o cubierta, que cumplen una o más de las siguientes funciones:

- a) Soportar elementos tales como muros, paredes divisorias y revestimientos metálicos, que resisten fuerzas horizontales sin formar parte del sistema sismo resistente del edificio y que tampoco contribuyan a soportar las cargas verticales.
- b) Transferir las fuerzas horizontales a los elementos verticales que forman parte del sistema sismo resistente.
- c) Interconectar varios componentes del sistema sismo resistente del edificio con resistencia, rigidez y tenacidad apropiadas para permitir que el edificio se deforme y rote como una unidad

En el inciso 21.6.4 se incluyen las siguientes recomendaciones para el cálculo de la resistencia a cortante de muros estructurales, diafragmas y contravientos:

21.6.4.1 - La resistencia nominal a cortante de muros estructurales y diafragmas se determinará de acuerdo a 21.6.4.2. ó 21.6.4.3.

21.6.4.2. - La resistencia nominal a cortante, V_n , de muros estructurales y diafragmas se supondrá que no excede a la fuerza cortante calculada con la siguiente ecuación

$$V_n = A_{cv}(2\sqrt{f_c} + \rho_n f_y) \quad (4.11)$$

21.6.4.3 - Para muros (diafragmas) y segmentos de muros (diafragmas) que tengan una relación (h_w/l_w) menor que 2, la resistencia nominal a cortante del muro (diafragma) se determinará con la ecuación 4.12.

$$V_n = A_{cv}(\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y) \quad (4.12)$$

donde α_c varía linealmente desde 3.0 para valores de $(h_w/l_w) = 1.5$ ó menos hasta 2.0 para valores de $(h_w/l_w) = 2.0$.

En este caso es necesario modificar las ecuaciones para poder utilizar kilogramos y centímetros como unidades, así pues las ecuaciones modificadas son,

$$V_n = A_{cv}(0.53\sqrt{f'_c} + \rho_n f_y) \quad (4.13)$$

$$V_n = A_{cv}(\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y) \quad (4.14)$$

donde:

el coeficiente α_c varía linealmente desde 0.79 para valores de $(h_w/l_w) = 1.5$ ó menos hasta 0.53 para valores de $(h_w/l_w) = 2.0$.

A_{cv}	área de la sección transversal del tablero [cm ²]
f'_c	resistencia especificada del concreto a compresión [kg/cm ²]
f_y	esfuerzo de fluencia del acero [kg/cm ²]
h_w	altura del tablero [cm]
l_w	longitud del tablero [cm]
V_n	fuerza cortante resistente nominal en el plano del tablero [kg]
α_c	coeficiente para tomar en cuenta la relación de forma de los tableros
ρ_n	cuantía nominal de acero

Como se puede apreciar, las ecuaciones propuestas por ambas referencias son muy semejantes y, por lo tanto, los resultados que se obtienen con ellas coinciden casi exactamente, sin embargo, hay pequeñas diferencias entre ellas que permiten recomendar mejoras para el proceso de cálculo. Por otro lado, se hace notar que para su empleo en este trabajo en ningún caso se utilizan los factores de reducción por tratarse de experimentos controlados en laboratorio.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar las recomendaciones de las NTC-96⁶ y el ACI 318-95⁸ para evaluar la resistencia a cortante de los tableros ensayados, así como su comparación con los resultados obtenidos experimentalmente.

4.4.2. Losa maciza

4.4.2.1. NTC-96⁶

En el apéndice D se muestran los cálculos realizados para evaluar la resistencia a cortante en su plano de este tipo de tableros. Para cada uno de ellos se consideró el espesor promedio considerando las variaciones debido a las deformaciones en la cimbra. En este caso, se usa el valor de f_c en lugar de f'_c , ya que la resistencia del concreto utilizada para cada caso espécimen es la obtenida de los cilindros de control. Considerando el sistema de carga utilizado, el valor de la fuerza cortante de agrietamiento $V_{\text{agrietamiento}}$ se tomó igual al producto de la carga de agrietamiento obtenida experimentalmente en cada tablero por el coseno de 45° (Figura 3.1). En la tabla 4.7 se hace un resumen de los resultados de los tres tableros, en ella se muestran los valores de la fuerza cortante resistente $V_{\text{Resistente}}$ calculada con las expresiones consideradas y de la fuerza cortante de agrietamiento $V_{\text{agrietamiento}}$, así como la diferencia promedio en porcentaje entre ellas.

Tablero	$V_{\text{Resistente}}[\text{kg}]$	$V_{\text{agrietamiento}}[\text{kg}]$	% Diferencia
1	68,205.55	60,104.08	+13.48
2	56,506.42	53,033.01	+6.55
3	68,630.91	63,639.61	+7.84
Diferencia _{promedio} =			+9.29%

TABLA 4.7.

Resistencias calculadas según las NTC-96⁶ para losas macizas.

4.4.2.2. ACI 319-95⁸

En el apéndice D también se muestran los cálculos realizados si se utilizan las expresiones recomendadas por el ACI 318-95⁸. En este caso se calcula la resistencia V_{CR} considerando el valor de α_c correspondiente. El valor de la fuerza cortante de agrietamiento $V_{\text{agrietamiento}}$ se obtiene con el procedimiento descrito en el inciso anterior. En la tabla 4.8 se muestran los valores de la fuerza cortante resistente teórica y de la fuerza cortante de agrietamiento experimental, asimismo, se muestra también la diferencia promedio entre ellas en porcentaje.

Tablero	$V_{\text{Resistente}}[\text{kg}]$	$V_{\text{agrietamiento}}[\text{kg}]$	% Diferencia
1	72,232.01	60,104.08	+20.18
2	62,289.38	53,033.01	+17.45
3	73,472.97	63,639.61	+15.45
Diferencia _{promedio} =			+17.69%

TABLA 4.8.

Resistencias calculadas según el ACI 318-95⁸ para losas macizas.

4.4.3. Losacero

4.4.3.1. NTC-96⁶

En el apéndice E se muestran los cálculos realizados para evaluar la resistencia a cortante en su plano de los tableros de este tipo que presentaron agrietamiento diagonal. Como espesor promedio se toma la suma del espesor promedio t_1 más el 50% del espesor promedio t_2 del elemento (Figura 3.6). Por otro lado, cabe mencionar que no se consideró la contribución de la lámina ya que no existe un procedimiento definido para ello. La resistencia V_{CR} tiene el mismo significado que en el caso de losas macizas, asimismo también se usa el valor de f'_c en lugar de f^*_c por las razones antes expuestas. El valor $V_{agrietamiento}$ al igual que para losas macizas es el producto de la carga de agrietamiento obtenida experimentalmente en cada tablero que presentó la falla diagonal (diafragmas #3, #4 y #5) por el coseno de 45° . Como se puede observar, las resistencias calculadas están por abajo de las obtenidas experimentalmente, el porcentaje de la diferencia entre las resistencias calculadas y las obtenidas de los ensayos es del 22% aproximadamente, esta diferencia se explica si se reconoce que la lámina tiene cierta participación en la resistencia que no se ve reflejada en las ecuaciones. En la tabla 4.9 se puede observar un resumen de los resultados.

Tablero	$V_{Resistente}$ [kg]	$V_{agrietamiento}$ [kg]	% Diferencia
3	36,240.68	40,305.09	-10.08
4	38,491.20	53,033.01	-27.42
5	40,655.51	56,568.59	-28.13
Diferencia _{promedio} =			-21.88%

TABLA 4.9.

Resistencias calculadas según las NTC-96⁶ para losacero.

4.4.3.2. ACI 319-95⁸

En el apéndice E también se muestran los cálculos realizados si se utilizan las expresiones recomendadas por el ACI 318-95⁸. En este caso también se calcula la resistencia V_{CR} considerando el valor de α_c correspondiente y sin tomar en cuenta la aportación de la lámina, lo cual tiene como consecuencia que las resistencias obtenidas estén por debajo de las experimentales. En la tabla 4.10 se hace un resumen de los resultados obtenidos

Tablero	V _{Resistente} [kg]	V _{agrietamiento} [kg]	% Diferencia
3	34,144.50	40,305.09	-15.28
4	36,236.16	53,033.01	-31.67
5	38,247.70	56,568.54	-32.39
Diferencia _{promedio} =			-26.45%

TABLA 4.10.

Resistencias calculadas según el ACI 318-95⁸ para losacero.

4.4.4. Losa de vigueta-bovedilla

4.4.4.1. NTC-96⁶

En el apéndice F se muestran los cálculos realizados para evaluar la resistencia a cortante en su plano de este tipo de tableros. Para cada uno de ellos se consideró el espesor promedio del firme sin tomar en cuenta a las dalas perimetrales. La resistencia V_{CR} tiene el mismo significado que en los casos anteriores. Al igual que para la losacero, las resistencias calculadas quedan por debajo de las obtenidas experimentalmente; en este caso, la diferencia promedio es aproximadamente del 31%, lo cual se debe, probablemente, a que no se está considerando la contribución de los elementos prefabricados y de las dalas perimetrales, lo cual, si bien no permite calcular de forma precisa la resistencia de los elementos, permite tener una aproximación por el lado de la seguridad. Si se quisiera tomar en cuenta la contribución real de los elementos prefabricados a la resistencia a cortante, se deberían establecer criterios mínimos de conexión, tanto entre ellos como con el resto de los componentes colados *in situ*, que permitieran considerarlos como un elemento monolítico capaz de repartir la carga inducida a sus diferentes componentes. En la tabla 4.11 se puede observar un resumen de los resultados.

Tablero	V _{Resistente} [kg]	V _{agrietamiento} [kg]	% Diferencia
1	35,901.96	56,568.54	-36.53
2	36,909.57	53,033.01	-30.40
3	36,069.75	49,497.47	-27.13
Diferencia _{promedio} =			-31.35%

TABLA 4.11.

Resistencias calculadas según las NTC-96⁶ para losas de vigueta-bovedilla.

4.4.4.2. ACI 319-95⁸

En el apéndice F también se muestran los cálculos realizados si se utilizan las expresiones recomendadas por el ACI 318-95⁸. Tampoco en este caso se ha tomado en cuenta la contribución de los elementos prefabricados y de las dalas perimetrales para el cálculo de la resistencia V_{CR} y, en consecuencia, las resistencias obtenidas por esta vía también están por debajo de las

experimentales. En la tabla 4.12 se hace un resumen de los resultados obtenidos

Tablero	V _{Resistente} [kg]	V _{agrietamiento} [kg]	% Diferencia
1	36,515.35	56,568.54	-35.45
2	37,451.84	53,033.01	-29.38
3	36,671.30	49,497.47	-25.91
Diferencia _{promedio} =			-30.25%

TABLA 4.12.

Resistencias calculadas según el ACI 318-95^a para losas de vigueta- bovedilla.

Recomendaciones para Diseño

5.1. MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ

De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 4, mediante el uso de la Teoría de la Elasticidad, es posible proponer expresiones que permitan evaluar la rigidez en su plano de tableros construidos con los sistemas estudiados en este trabajo y con condiciones de apoyo en las que únicamente dos de sus esquinas se encuentran restringidas. Para cada uno de los tipos de sistemas de piso considerados, en el capítulo 4 se propone una expresión que corresponde al modelo elástico y su correspondiente factor de corrección.

Si se introduce en la ecuación 4.6 el factor correctivo β , obtenido en 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4 para cada tipo de sistema de piso estudiado, tenemos que:

$$k_{\text{lateral}} = \frac{\beta Et(\pi + 2)}{16 \ln D} \quad (5.1)$$

donde,

β	factor correctivo
E	módulo de elasticidad del concreto [kg/cm ²]
t	espesor del tablero [cm]
D	longitud de la diagonal dividida entre dos [cm]

5.1.1. Losa maciza

La ecuación propuesta para este tipo de elementos toma en cuenta el factor correctivo β obtenido en el inciso 4.1.2., el cual es igual a 0.41. Al sustituir este valor de β en la ecuación 5.1, se obtiene la siguiente ecuación para evaluar la rigidez diagonal en el plano de un tablero aislado de losa maciza $k_{\text{losa maciza}}$,

$$k_{\text{losa maciza}} = \frac{0.13Et}{\ln D} \quad (5.2)$$

donde t es el espesor promedio de la losa.

5.1.2. Losacero

Para este tipo de elementos la ecuación es corregida por el factor β obtenido en el inciso 4.1.3., que es igual a 0.25. De esta forma la ecuación propuesta para evaluar la rigidez diagonal en el plano de un tablero aislado construido con losacero es,

$$k_{\text{losacero}} = \frac{0.10Et}{\ln D} \quad (5.3)$$

donde t es el espesor promedio igual a la suma del espesor t_1 más el cincuenta por ciento del espesor t_2 del elemento (Figura 3.6).

5.1.3. Losa de vigueta-bovedilla

Por último, para este tipo de elementos se considera al factor β obtenido en el inciso 4.1.4., que es igual a 0.53. La ecuación propuesta para evaluar la rigidez diagonal en el plano de un tablero aislado construido con vigueta y bovedilla queda de la siguiente forma,

$$k_{\text{vigueta - bovedilla}} = \frac{0.17Et}{\ln D} \quad (5.4)$$

donde t en este caso es el espesor promedio de la sección transversal a lo largo del claro del firme que se cuele sobre los elementos prefabricados.

5.1.4. Condiciones de apoyo

Los resultados del estudio del modelo numérico de la losa maciza, sugieren que la rigidez en su plano de los tableros de losa dependen en gran medida de sus condiciones de apoyo y de la restricción que estas imponen a las deformaciones fuera del plano. El caso analizado experimentalmente, con sólo dos vértices apoyados, corresponde al caso más extremo en que la rigidez es mucho menor que los valores de los modelos teóricos y por tanto surge la necesidad de usar los valores de reducción β . El modelo analítico también sugiere que cuando los tableros están apoyados perimetralmente, la rigidez de los mismos se acerca a los valores obtenidos con la Teoría de la Elasticidad. De aquí que se haga evidente la necesidad de realizar estudios experimentales con otras condiciones de apoyo que permitan obtener los valores β correspondientes.

5.2. MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA

De acuerdo con los resultados obtenidos en el inciso 4.3 es posible establecer que las expresiones de diseño propuestas por el RCDF-95, a través de las NTC-96, y por el ACI 318-95 pueden utilizarse para evaluar la resistencia en su plano de los sistemas de piso aquí estudiados. No obstante, es importante reconocer que estas ecuaciones proporcionan resultados aproximados ya que

no consideran variables tales como la contribución de los elementos prefabricados o metálicos, así como las cargas transversales que en la realidad actúan sobre estos elementos, por lo cual, es necesario continuar estudiando este fenómeno para poder definir ecuaciones más precisas.

5.2.1. Losa maciza

Para losas macizas, los resultados obtenidos al usar las expresiones propuestas por las NTC-96 son mayores que los experimentales. La diferencia, en promedio, es menor a 10%. Por otro lado, al usar las expresiones propuestas por el ACI 318-95, la diferencia promedio aumenta hasta 20%. En ambos casos, las diferencias pueden considerarse aceptables, sobre todo si se toma en cuenta que no se ha sometido a los especímenes a un estado de esfuerzo cortante directo.

5.2.2. Losacero

En sistemas de piso construidos con losacero, las expresiones propuestas por las NTC-96 producen resultados menores que los obtenidos experimentalmente, con una diferencia promedio del orden del 22%. En cuanto al uso de las expresiones del ACI 318-95, la diferencia promedio se incrementa a 26%. Estas diferencias se deben probablemente a que no se considera la contribución de los módulos metálicos a la resistencia del tablero; sin embargo, de este estudio no es posible establecer, de forma confiable, alguna modificación a las ecuaciones, por lo cual es necesario llevar a cabo estudios más avanzados al respecto.

5.2.3. Losa de vigueta-bovedilla

Para las losas fabricadas con vigueta-bovedilla, al utilizar las expresiones de las NTC-96, los resultados son menores que los derivados del estudio experimental. La diferencia promedio es del orden del 30%, al igual que la obtenida con las expresiones del ACI 318-95. Las diferencias aquí observadas, se deben probablemente a que no se considera la contribución de los elementos prefabricados y las dalas a la resistencia del tablero, por lo cual es necesario llevar a cabo más estudios para establecer expresiones más confiables que permitan considerar la contribución de los elementos antes mencionados.

5.3. RECOMENDACIONES FINALES

Es preciso insistir que los resultados de este trabajo son aplicables únicamente a tableros con condiciones de apoyo prácticamente libres en su periferia, en los que las deformaciones fuera del plano provoquen que los efectos de segundo orden sean importantes.

Por otro lado, es importante seguir realizando estudios experimentales en los que se consideren otras condiciones de apoyo, ya que a partir de lo obtenido en este trabajo, se concluye que los modelos teóricos simples comúnmente utilizados en la práctica pueden llegar a sobrestimar la rigidez de los tablero en su plano en más de 500%

Referencias

- 1.- Bazan, Enrique y Juan Dyer. "Análisis de la rigidez de sistemas de piso en su plano". Ingeniería Sísmica (México, D.F.), abril de 1983, núm. 29, pp. 1-19.
- 2.- Building Seismic Safety Council. NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings. Earthquake hazards reduction Series 47. U.S.A., 1989.
- 3.- Naeim, Fazard. The seismic design handbook. Structural Engineering Series. New York, Van Nostrand Reinhold, 1989.
- 4.- Kong, F.K. Concrete Structures in Earthquake Regions: Design and Analysis. Great Britain, Longman Scientific & Technical, 1994.
- 5.- Mendoza, Carlos Javier. Recomendaciones para diseñar y construir entresijos con sistemas de viguetas y bovedillas. Reporte de investigación 366. México, D.F., Instituto de Ingeniería UNAM, 1976.
- 6.- Departamento del Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. Gaceta Oficial del Departamento del D.F., México, D.F., 1996.
- 7.- Uniform Building Code. Structural Engineering Design Provisions, Volume 2. Whittier, California, 1994.
- 8.- American Concrete Institute. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary - ACI 318R-95. Michigan, 1995.
- 9.- Iglesias, J. *et al.* Estudio de las intensidades del sismo del 19 de septiembre en la Ciudad de México. UAM-Azcapotzalco, 1987.
- 10.- Timoshenko, S.P. y J.N. Goodier. Theory of Elasticity. Singapore, Mc-Graw-Hill, 1970.
- 11.- Luthe García, Rodolfo. Análisis Estructural. México, D.F., Representaciones y Servicios de Ingeniería, 1971.
- 12.- Structural Analysis, Inc. mTAB*STRESS Ver. 6.3. Austin, Texas, 1997.

APÉNDICE

A

Cálculo de Rigideces para Losa Maciza

Nota: El valor t_{promedio} utilizado en este apéndice no corresponde al valor real del espesor del tablero, ya que fue manipulado para lograr obtener una rigidez calculada con el Modelo de la Teoría de la Elasticidad semejante a la obtenida experimentalmente.

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad ¹⁰

$f_c = 207.11 \text{ kg/cm}^2$
 $\alpha = 8,000.00$
 $t_{\text{promedio}} = 5.24 \text{ cm}$
 $E = \alpha(f_c)^{1/2} = 115,130.53 \text{ kg/cm}^2$

$L = 270.00 \text{ cm}$
 $\theta = 0.00 \text{ grados} =$
 $r = 1.00 \text{ cm}$
 $v = 0.19$

Diafragma #1-Losa maciza

$d = 190.92 \text{ cm}$
 0.00 radianes
 $\ln r = 0.00$
 $\ln d = 5.25$

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{\text{teórica}} [t/cm]$
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	954.20	0.0000	0.0000	0.0339	0.0339	73.83
10.00	1,908.40	0.0000	0.0000	0.0677	0.0677	73.83
15.00	2,862.60	0.0000	0.0000	0.1016	0.1016	73.83
20.00	3,816.79	0.0000	0.0000	0.1355	0.1355	73.83
25.00	4,770.99	0.0000	0.0000	0.1693	0.1693	73.83
30.00	5,725.19	0.0000	0.0000	0.2032	0.2032	73.83
35.00	6,679.39	0.0000	0.0000	0.2370	0.2370	73.83
40.00	7,633.59	0.0000	0.0000	0.2709	0.2709	73.83
45.00	8,587.79	0.0000	0.0000	0.3048	0.3048	73.83
50.00	9,541.98	0.0000	0.0000	0.3386	0.3386	73.83
55.00	10,496.18	0.0000	0.0000	0.3725	0.3725	73.83
60.00	11,450.38	0.0000	0.0000	0.4064	0.4064	73.83
65.00	12,404.58	0.0000	0.0000	0.4402	0.4402	73.83
70.00	13,358.78	0.0000	0.0000	0.4741	0.4741	73.83
75.00	14,312.98	0.0000	0.0000	0.5079	0.5079	73.83
80.00	15,267.18	0.0000	0.0000	0.5418	0.5418	73.83
85.00	16,221.37	0.0000	0.0000	0.5757	0.5757	73.83
90.00	17,175.57	0.0000	0.0000	0.6095	0.6095	73.83
95.00	18,129.77	0.0000	0.0000	0.6434	0.6434	73.83
100.00	19,083.97	0.0000	0.0000	0.6773	0.6773	73.83
105.00	20,038.17	0.0000	0.0000	0.7111	0.7111	73.83

$k_{\text{experimental}} = 72.43 \text{ t/cm}$
 $E_{t_{\text{modificado}}} = 603,284.00 \text{ kg/cm}$
 $E_{t_{\text{teórico}}} = 1,479,427.37 \text{ kg/cm}$
 $E_{t_{\text{modificado}}}/E_{t_{\text{teórico}}} = 0.40$
 $\beta_{\text{losa maciza}} = 0.35$

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad ¹⁰

$f_c =$	275.65 kg/cm ²	$L =$	270.00 cm
$\alpha =$	8,000.00	$\theta =$	0.00 grados =
$t_{prom} =$	4.51 cm	$r =$	1.00 cm
$E = \alpha(f_c)^{1/2} =$	132,821.68 kg/cm ²	$\nu =$	0.18

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [t/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	1,108.65	0.0000	0.0000	0.0341	0.0341	73.31
10.00	2,217.29	0.0000	0.0000	0.0682	0.0682	73.31
15.00	3,325.94	0.0000	0.0000	0.1023	0.1023	73.31
20.00	4,434.59	0.0000	0.0000	0.1364	0.1364	73.31
25.00	5,543.24	0.0000	0.0000	0.1705	0.1705	73.31
30.00	6,651.88	0.0000	0.0000	0.2046	0.2046	73.31
35.00	7,760.53	0.0000	0.0000	0.2387	0.2387	73.31
40.00	8,869.18	0.0000	0.0000	0.2728	0.2728	73.31
45.00	9,977.83	0.0000	0.0000	0.3069	0.3069	73.31
50.00	11,086.47	0.0000	0.0000	0.3410	0.3410	73.31
55.00	12,195.12	0.0000	0.0000	0.3751	0.3751	73.31
60.00	13,303.77	0.0000	0.0000	0.4092	0.4092	73.31
65.00	14,412.42	0.0000	0.0000	0.4433	0.4433	73.31
70.00	15,521.06	0.0000	0.0000	0.4774	0.4774	73.31
75.00	16,629.71	0.0000	0.0000	0.5116	0.5116	73.31
80.00	17,738.36	0.0000	0.0000	0.5457	0.5457	73.31
85.00	18,847.01	0.0000	0.0000	0.5798	0.5798	73.31
90.00	19,955.65	0.0000	0.0000	0.6139	0.6139	73.31
95.00	21,064.30	0.0000	0.0000	0.6480	0.6480	73.31
100.00	22,172.95	0.0000	0.0000	0.6821	0.6821	73.31
105.00	23,281.60	0.0000	0.0000	0.7162	0.7162	73.31

Diafragma #2-Losa maciza

$d =$	190.92 cm
$\theta =$	0.00 radianes
$\ln r =$	0.00
$\ln d =$	5.25

$k_{experimental} =$	70.65 t/cm
$Et_{modificado} =$	599,025.80 kg/cm
$Et_{teórico} =$	1,328,216.85 kg/cm
$Et_{modificado}/Et_{teórico} =$	0.43

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad¹⁰

$f'c = 306.55 \text{ kg/cm}^2$
 $\alpha = 8,000.00$
 $t_{prom} = 2.93 \text{ cm}$
 $E = \alpha(f'c)^{1/2} = 140,068.55 \text{ kg/cm}^2$

$L = 270.00 \text{ cm}$
 $\theta = 0.00 \text{ grados} =$
 $r = 1.00 \text{ cm}$
 $v = 0.18$

Diafragma #3-Losa maciza

$d = 190.92 \text{ cm}$
 0.00 radianes
 $\ln r = 0.00$
 $\ln d = 5.25$

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [ton/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	1,706.48	0.0000	0.0000	0.0498	0.0498	50.22
10.00	3,412.97	0.0000	0.0000	0.0996	0.0996	50.22
15.00	5,119.45	0.0000	0.0000	0.1493	0.1493	50.22
20.00	6,825.94	0.0000	0.0000	0.1991	0.1991	50.22
25.00	8,532.42	0.0000	0.0000	0.2489	0.2489	50.22
30.00	10,238.91	0.0000	0.0000	0.2987	0.2987	50.22
35.00	11,945.39	0.0000	0.0000	0.3484	0.3484	50.22
40.00	13,651.88	0.0000	0.0000	0.3982	0.3982	50.22
45.00	15,358.36	0.0000	0.0000	0.4480	0.4480	50.22
50.00	17,064.85	0.0000	0.0000	0.4978	0.4978	50.22
55.00	18,771.33	0.0000	0.0000	0.5476	0.5476	50.22
60.00	20,477.82	0.0000	0.0000	0.5973	0.5973	50.22
65.00	22,184.30	0.0000	0.0000	0.6471	0.6471	50.22
70.00	23,890.78	0.0000	0.0000	0.6969	0.6969	50.22
75.00	25,597.27	0.0000	0.0000	0.7467	0.7467	50.22
80.00	27,303.75	0.0000	0.0000	0.7964	0.7964	50.22
85.00	29,010.24	0.0000	0.0000	0.8462	0.8462	50.22
90.00	30,716.72	0.0000	0.0000	0.8960	0.8960	50.22
95.00	32,423.21	0.0000	0.0000	0.9458	0.9458	50.22
100.00	34,129.69	0.0000	0.0000	0.9956	0.9956	50.22

$k_{experimental} = 49.76 \text{ ton/cm}$
 $E t_{modificado} = 410,400.87 \text{ kg/cm}$
 $E t_{teórico} = 1,750,856.93 \text{ kg/cm}$
 $E t_{modificado} / E t_{teórico} = 0.23$

APÉNDICE

B

Cálculo de Rigideces para Losacero

Nota: El valor t_{promedio} utilizado en este apéndice no corresponde al valor real del espesor del tablero, ya que fue manipulado para lograr obtener una rigidez calculada con el Modelo de la Teoría de la Elasticidad semejante a la obtenida experimentalmente.

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad ¹⁰

$f_c =$	256.00 kg/cm ²	$L =$	270.00 cm
$\alpha =$	8,000.00	$\theta =$	0.00 grados =
$t_{prom} =$	1.82 cm	$r =$	1.00 cm
$E = \alpha(f_c)^{1/2} =$	128,000.00 kg/cm ²	$\nu =$	0.19

Diafragma #1-Losacero

$d =$	190.92 cm
$\theta =$	0.00 radianes
$\ln r =$	0.00
$\ln d =$	5.25

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [t/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	2,747.25	0.0000	0.0000	0.0877	0.0877	28.51
10.00	5,494.51	0.0000	0.0000	0.1754	0.1754	28.51
15.00	8,241.76	0.0000	0.0000	0.2631	0.2631	28.51
20.00	10,989.01	0.0000	0.0000	0.3508	0.3508	28.51
25.00	13,736.26	0.0000	0.0000	0.4385	0.4385	28.51
30.00	16,483.52	0.0000	0.0000	0.5262	0.5262	28.51
32.50	17,857.14	0.0000	0.0000	0.5700	0.5700	28.51
35.00	19,230.77	0.0000	0.0000	0.6138	0.6138	28.51
37.50	20,604.40	0.0000	0.0000	0.6577	0.6577	28.51
40.00	21,978.02	0.0000	0.0000	0.7015	0.7015	28.51
42.50	23,351.65	0.0000	0.0000	0.7454	0.7454	28.51
45.00	24,725.27	0.0000	0.0000	0.7892	0.7892	28.51
47.50	26,098.90	0.0000	0.0000	0.8331	0.8331	28.51
50.00	27,472.53	0.0000	0.0000	0.8769	0.8769	28.51
52.50	28,846.15	0.0000	0.0000	0.9208	0.9208	28.51

$k_{experimental} =$	28.26 t/cm
$E t_{modificado} =$	232,960.00 kg/cm
$E t_{teórico} =$	1,241,600.00 kg/cm
$E t_{modificado} / E t_{teórico} =$	0.19
$\beta_{losacero} =$	0.26

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad¹⁰

$$f'c = 266.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$\alpha = 8,000.00$$

$$t_{prom} = 1.87 \text{ cm}$$

$$E = \alpha(f'c)^{1/2} = 130,476.05 \text{ kg/cm}^2$$

$$L = 270.00 \text{ cm}$$

$$\theta = 0.00 \text{ grados} =$$

$$r = 1.00 \text{ cm}$$

$$v = 0.19$$

Diafragma #2-Losacero

$$d = 190.92 \text{ cm}$$

$$0.00 \text{ radianes}$$

$$\ln r = 0.00$$

$$\ln d = 5.25$$

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [ton/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	2,680.97	0.0000	0.0000	0.0840	0.0840	29.78
10.00	5,361.93	0.0000	0.0000	0.1679	0.1679	29.78
15.00	8,042.90	0.0000	0.0000	0.2519	0.2519	29.78
20.00	10,723.86	0.0000	0.0000	0.3358	0.3358	29.78
25.00	13,404.83	0.0000	0.0000	0.4198	0.4198	29.78
30.00	16,085.79	0.0000	0.0000	0.5037	0.5037	29.78
35.00	18,766.76	0.0000	0.0000	0.5877	0.5877	29.78
40.00	21,447.72	0.0000	0.0000	0.6716	0.6716	29.78
45.00	24,128.69	0.0000	0.0000	0.7556	0.7556	29.78

$$k_{experimental} = 29.66 \text{ ton/cm}$$

$$Et_{modificado} = 243,337.84 \text{ kg/cm}$$

$$Et_{teórico} = 1,265,617.70 \text{ kg/cm}$$

$$Et_{modificado}/Et_{teórico} = 0.19$$

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad ¹⁰

$f_c = 249.00 \text{ kg/cm}^2$ $L = 270.00 \text{ cm}$
 $\alpha = 8,000.00$ $\theta = 0.00 \text{ grados} =$
 $t_{prom} = 1.63 \text{ cm}$ $r = 1.00 \text{ cm}$
 $E = \alpha(f_c)^{1/2} = 126,237.87 \text{ kg/cm}^2$ $\nu = 0.19$

Diafragma #3-Losacero

$d = 190.92 \text{ cm}$
 0.00 radianes
 $\ln r = 0.00$
 $\ln d = 5.25$

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [t/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	3,067.48	0.0000	0.0000	0.0993	0.0993	25.18
10.00	6,134.97	0.0000	0.0000	0.1986	0.1986	25.18
15.00	9,202.45	0.0000	0.0000	0.2978	0.2978	25.18
20.00	12,269.94	0.0000	0.0000	0.3971	0.3971	25.18
25.00	15,337.42	0.0000	0.0000	0.4964	0.4964	25.18
30.00	18,404.91	0.0000	0.0000	0.5957	0.5957	25.18
35.00	21,472.39	0.0000	0.0000	0.6950	0.6950	25.18
40.00	24,539.88	0.0000	0.0000	0.7943	0.7943	25.18
45.00	27,607.36	0.0000	0.0000	0.8935	0.8935	25.18
50.00	30,674.85	0.0000	0.0000	0.9928	0.9928	25.18
57.00	34,969.33	0.0000	0.0000	1.1318	1.1318	25.18
60.00	36,809.82	0.0000	0.0000	1.1914	1.1914	25.18

$k_{experimental} = 34.81 \text{ t/cm}$
 $E t_{modificado} = 205,767.73 \text{ kg/cm}$
 $E t_{teórico} = 1,035,150.54 \text{ kg/cm}$
 $E t_{modificado} / E t_{teórico} = 0.27$

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad ¹⁰

$f'c = 256.00 \text{ kg/cm}^2$
 $\alpha = 8,000.00$
 $t_{prom} = 3.10 \text{ cm}$
 $E = \alpha(f'c)^{1/2} = 128,000.00 \text{ kg/cm}^2$

$L = 270.00 \text{ cm}$
 $\theta = 0.00 \text{ grados} =$
 $r = 1.00 \text{ cm}$
 $v = 0.19$

Diafragma #4-Losacero

$d = 190.92 \text{ cm}$
 0.00 radianes
 $\ln r = 0.00$
 $\ln d = 5.25$

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica} [t/cm]$
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	1,612.90	0.0000	0.0000	0.0515	0.0515	48.56
10.00	3,225.81	0.0000	0.0000	0.1030	0.1030	48.56
15.00	4,838.71	0.0000	0.0000	0.1545	0.1545	48.56
20.00	6,451.61	0.0000	0.0000	0.2059	0.2059	48.56
25.00	8,064.52	0.0000	0.0000	0.2574	0.2574	48.56
30.00	9,677.42	0.0000	0.0000	0.3089	0.3089	48.56
35.00	11,290.32	0.0000	0.0000	0.3604	0.3604	48.56
40.00	12,903.23	0.0000	0.0000	0.4119	0.4119	48.56
45.00	14,516.13	0.0000	0.0000	0.4634	0.4634	48.56
50.00	16,129.03	0.0000	0.0000	0.5148	0.5148	48.56
55.00	17,741.94	0.0000	0.0000	0.5663	0.5663	48.56
60.00	19,354.84	0.0000	0.0000	0.6178	0.6178	48.56
62.00	20,000.00	0.0000	0.0000	0.6384	0.6384	48.56
70.00	22,580.65	0.0000	0.0000	0.7208	0.7208	48.56
75.00	24,193.55	0.0000	0.0000	0.7723	0.7723	48.56

$k_{experimental} = 48.27 \text{ t/cm}$
 $E_{t_{modificado}} = 396,800.00 \text{ kg/cm}$
 $E_{t_{teórico}} = 1,113,600.00 \text{ kg/cm}$
 $E_{t_{modificado}}/E_{t_{teórico}} = 0.35$

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad ¹⁰

$f'c=$	261.00 kg/cm ²	$L=$	270.00 cm
$\alpha=$	8,000.00	$\theta=$	0.00 grados =
$t_{prom}=$	2.87 cm	$r=$	1.00 cm
$E=\alpha(f'c)^{1/2}=$	129,243.96 kg/cm ²	$v=$	0.19

Diafragma #5-Losacero

$d=$	190.92 cm
0.00	radianes
$\ln r=$	0.00
$\ln d=$	5.25

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [t/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	1,742.16	0.0000	0.0000	0.0551	0.0551	45.39
10.00	3,484.32	0.0000	0.0000	0.1101	0.1101	45.39
15.00	5,226.48	0.0000	0.0000	0.1652	0.1652	45.39
20.00	6,968.64	0.0000	0.0000	0.2203	0.2203	45.39
25.00	8,710.80	0.0000	0.0000	0.2754	0.2754	45.39
30.00	10,452.96	0.0000	0.0000	0.3304	0.3304	45.39
35.00	12,195.12	0.0000	0.0000	0.3855	0.3855	45.39
40.00	13,937.28	0.0000	0.0000	0.4406	0.4406	45.39
45.00	15,679.44	0.0000	0.0000	0.4957	0.4957	45.39
50.00	17,421.60	0.0000	0.0000	0.5507	0.5507	45.39
55.00	19,163.76	0.0000	0.0000	0.6058	0.6058	45.39
60.00	20,905.92	0.0000	0.0000	0.6609	0.6609	45.39
65.00	22,648.08	0.0000	0.0000	0.7160	0.7160	45.39
70.00	24,390.24	0.0000	0.0000	0.7710	0.7710	45.39
75.00	26,132.40	0.0000	0.0000	0.8261	0.8261	45.39
80.00	27,874.56	0.0000	0.0000	0.8812	0.8812	45.39

$k_{experimental}=$	44.08 t/cm
$E t_{modificado}=$	370,930.15 kg/cm
$E t_{teórico}=$	1,189,044.39 kg/cm
$E t_{modificado}/E t_{teórico}=$	0.30

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad¹⁰

$f'c = 273.00 \text{ kg/cm}^2$ $L = 270.00 \text{ cm}$
 $\alpha = 8,000.00$ $\theta = 0.00 \text{ grados} =$
 $t_{prom} = 2.58 \text{ cm}$ $r = 1.00 \text{ cm}$
 $E = \alpha(f'c)^{1/2} = 132,181.69 \text{ kg/cm}^2$ $\nu = 0.19$

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [ton/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	1,937.98	0.0000	0.0000	0.0599	0.0599	41.73
10.00	3,875.97	0.0000	0.0000	0.1198	0.1198	41.73
15.00	5,813.95	0.0000	0.0000	0.1797	0.1797	41.73
20.00	7,751.94	0.0000	0.0000	0.2396	0.2396	41.73
25.00	9,689.92	0.0000	0.0000	0.2995	0.2995	41.73
30.00	11,627.91	0.0000	0.0000	0.3594	0.3594	41.73
35.00	13,565.89	0.0000	0.0000	0.4193	0.4193	41.73
40.00	15,503.88	0.0000	0.0000	0.4792	0.4792	41.73
45.00	17,441.86	0.0000	0.0000	0.5391	0.5391	41.73
50.00	19,379.84	0.0000	0.0000	0.5990	0.5990	41.73
55.00	21,317.83	0.0000	0.0000	0.6589	0.6589	41.73
60.00	23,255.81	0.0000	0.0000	0.7188	0.7188	41.73
65.00	25,193.80	0.0000	0.0000	0.7787	0.7787	41.73

Diafragma #6-Losacero

$d = 190.92 \text{ cm}$
 0.00 radianes
 $\ln r = 0.00$
 $\ln d = 5.25$

$k_{experimental} = 41.47 \text{ ton/cm}$
 $E_{t_{modificado}} = 341,028.77 \text{ kg/cm}$
 $E_{t_{teórico}} = 1,216,071.58 \text{ kg/cm}$
 $E_{t_{modificado}}/E_{t_{teórico}} = 0.28$

APÉNDICE

C

Cálculo de Rigideces para Losa de Vigueta-Bovedilla

Nota: El valor t_{promedio} utilizado en este apéndice no corresponde al valor real del espesor del tablero, ya que fue manipulado para lograr obtener una rigidez calculada con el Modelo de la Teoría de la Elasticidad semejante a la obtenida experimentalmente.

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad ¹⁰

$f_c =$	288.04 kg/cm ²	$L =$	290.00 cm
$\alpha =$	8,000.00	$\theta =$	0.00 grados =
$t_{prom} =$	4.06 cm	$r =$	1.00 cm
$E = \alpha(f_c)^{1/2} =$	135,773.93 kg/cm ²	$\nu =$	0.20

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [t/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	1,231.53	0.0000	0.0000	0.0376	0.0376	66.55
10.00	2,463.05	0.0000	0.0000	0.0751	0.0751	66.55
15.00	3,694.58	0.0000	0.0000	0.1127	0.1127	66.55
20.00	4,926.11	0.0000	0.0000	0.1503	0.1503	66.55
25.00	6,157.64	0.0000	0.0000	0.1878	0.1878	66.55
30.00	7,389.16	0.0000	0.0000	0.2254	0.2254	66.55
35.00	8,620.69	0.0000	0.0000	0.2629	0.2629	66.55
40.00	9,852.22	0.0000	0.0000	0.3005	0.3005	66.55
45.00	11,083.74	0.0000	0.0000	0.3381	0.3381	66.55
50.00	12,315.27	0.0000	0.0000	0.3756	0.3756	66.55
55.00	13,546.80	0.0000	0.0000	0.4132	0.4132	66.55
60.00	14,778.33	0.0000	0.0000	0.4508	0.4508	66.55
65.00	16,009.85	0.0000	0.0000	0.4883	0.4883	66.55
70.00	17,241.38	0.0000	0.0000	0.5259	0.5259	66.55
75.00	18,472.91	0.0000	0.0000	0.5635	0.5635	66.55
80.00	19,704.43	0.0000	0.0000	0.6010	0.6010	66.55

Diafragma #1-Losa de vigueta y

$d =$	205.06 cm
$\theta =$	0.00 radianes
$\ln r =$	0.00
$\ln d =$	5.32

$k_{experimental} =$	66.39 t/cm
$E_{t_{modificado}} =$	551,242.15 kg/cm
$E_{t_{teórico}} =$	936,840.12 kg/cm
$E_{t_{modificado}}/E_{t_{teórico}} =$	0.59
$\beta_{vigueta y bovedilla} =$	0.53

Modelo Analítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad ¹⁰

$$f_c = 308.51 \text{ kg/cm}^2$$

$$\alpha = 8,000.00$$

$$t_{prom} = 3.85 \text{ cm}$$

$$E = \alpha (f_c)^{1/2} = 140,515.62 \text{ kg/cm}^2$$

$$L = 290.00 \text{ cm}$$

$$\theta = 0.00 \text{ grados} =$$

$$r = 1.00 \text{ cm}$$

$$v = 0.20$$

Diafragma #2-Losa de vigueta y

$$d = 205.06 \text{ cm}$$

$$= 0.00 \text{ radianes}$$

$$\ln r = 0.00$$

$$\ln d = 5.32$$

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}[t/cm]$
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	1,298.70	0.0000	0.0000	0.0383	0.0383	65.31
10.00	2,597.40	0.0000	0.0000	0.0766	0.0766	65.31
15.00	3,896.10	0.0000	0.0000	0.1148	0.1148	65.31
20.00	5,194.81	0.0000	0.0000	0.1531	0.1531	65.31
25.00	6,493.51	0.0000	0.0000	0.1914	0.1914	65.31
30.00	7,792.21	0.0000	0.0000	0.2297	0.2297	65.31
35.00	9,090.91	0.0000	0.0000	0.2679	0.2679	65.31
40.00	10,389.61	0.0000	0.0000	0.3062	0.3062	65.31
45.00	11,688.31	0.0000	0.0000	0.3445	0.3445	65.31
50.00	12,987.01	0.0000	0.0000	0.3828	0.3828	65.31
55.00	14,285.71	0.0000	0.0000	0.4210	0.4210	65.31
60.00	15,584.42	0.0000	0.0000	0.4593	0.4593	65.31
65.00	16,883.12	0.0000	0.0000	0.4976	0.4976	65.31
70.00	18,181.82	0.0000	0.0000	0.5359	0.5359	65.31
75.00	19,480.52	0.0000	0.0000	0.5741	0.5741	65.31

$$k_{experimental} = 64.83 \text{ t/cm}$$

$$Et_{modificado} = 540,985.14 \text{ kg/cm}$$

$$Et_{teórico} = 969,557.79 \text{ kg/cm}$$

$$Et_{modificado}/Et_{teórico} = 0.55$$

Modelo Analfítico de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad¹⁰

$f'c = 291.40 \text{ kg/cm}^2$
 $\alpha = 8,000.00$
 $t_{prom} = 3.19 \text{ cm}$
 $E = \alpha(f'c)^{1/2} = 136,563.54 \text{ kg/cm}^2$

$L = 290.00 \text{ cm}$
 $\theta = 0.00 \text{ grados} =$
 $r = 1.00 \text{ cm}$
 $v = 0.20$

Diafragma #3-Losa de vigueta y bovedilla

$d = 205.06 \text{ cm}$
 0.00 radianes
 $\ln r = 0.00$
 $\ln d = 5.32$

F[ton]	P[kg/cm]	u1	u2	u3	u	$k_{teórica}$ [ton/cm]
0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
5.00	1,567.40	0.0000	0.0000	0.0475	0.0475	52.60
10.00	3,134.80	0.0000	0.0000	0.0951	0.0951	52.60
15.00	4,702.19	0.0000	0.0000	0.1426	0.1426	52.60
20.00	6,269.59	0.0000	0.0000	0.1901	0.1901	52.60
25.00	7,836.99	0.0000	0.0000	0.2377	0.2377	52.60
30.00	9,404.39	0.0000	0.0000	0.2852	0.2852	52.60
35.00	10,971.79	0.0000	0.0000	0.3327	0.3327	52.60
40.00	12,539.18	0.0000	0.0000	0.3803	0.3803	52.60
45.00	14,106.58	0.0000	0.0000	0.4278	0.4278	52.60
50.00	15,673.98	0.0000	0.0000	0.4753	0.4753	52.60
55.00	17,241.38	0.0000	0.0000	0.5229	0.5229	52.60
60.00	18,808.78	0.0000	0.0000	0.5704	0.5704	52.60
65.00	20,376.18	0.0000	0.0000	0.6179	0.6179	52.60
70.00	21,943.57	0.0000	0.0000	0.6655	0.6655	52.60

$k_{experimental} = 52.61 \text{ ton/cm}$
 $E_{t_{modificado}} = 435,637.69 \text{ kg/cm}$
 $E_{t_{teórico}} = 942,288.41 \text{ kg/cm}$
 $E_{t_{modificado}}/E_{t_{teórico}} = 0.46$

APÉNDICE

D

Cálculo de Resistencias para Losa Maciza

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96 (4.5.2.)⁶

Diafragma #1-Losa maciza

$$\begin{aligned}
 t &= 12.85 \text{ cm} \\
 L &= 270.00 \text{ cm} \\
 d = 0.8L &= 216.00 \text{ cm} \\
 f_c &= 207.11 \text{ kg/cm}^2 \\
 f^*c &= 165.69 \text{ kg/cm}^2 \\
 f_y &= 4,200.00 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{vh} &= 0.71 \text{ cm}^2 \\
 s_h &= 25.00 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$V_{CR} = 0.85 \sqrt{f_c} tL = 42,441.07 \text{ kg}$$

$$V_{Resistente} = V_{CR} + V_s = 68,205.55 \text{ kg}$$

$$V_s = \frac{A_{vh} f_y d}{s_h} = 25,764.48 \text{ kg}$$

$$V_{agrietamiento} = 60,104.08 \text{ kg}$$

$$\% \text{ Diferencia} = 13.48$$

$$\text{Diferencia}_{prom} = 9.29 \%$$

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96 (4.5.2.)⁶

Diafragma #2-Losa maciza

$$\begin{aligned}
 t &= 10.00 \text{ cm} \\
 L &= 270.00 \text{ cm} \\
 d = 0.8L &= 216.00 \text{ cm} \\
 f_c &= 275.65 \text{ kg/cm}^2 \\
 f^*c &= 220.52 \text{ kg/cm}^2 \\
 f_y &= 4,200.00 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{vh} &= 0.71 \text{ cm}^2 \\
 s_h &= 35.00 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$V_{CR} = 0.85 \sqrt{f_c} tL = 38,103.22 \text{ kg}$$

$$V_{Resistente} = V_{CR} + V_s = 56,506.42 \text{ kg}$$

$$V_s = \frac{A_{vh} f_y d}{s_h} = 18,403.20 \text{ kg}$$

$$V_{agrietamiento} = 53,033.01 \text{ kg}$$

$$\% \text{ Diferencia} = 6.55$$

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96 (4.5.2.)⁶

Diafragma #3-Losa maciza

$$\begin{aligned}
 t &= 12.50 \text{ cm} \\
 L &= 270.00 \text{ cm} \\
 d = 0.8L &= 216.00 \text{ cm} \\
 f_c &= 306.55 \text{ kg/cm}^2 \\
 f^*c &= 245.24 \text{ kg/cm}^2 \\
 f_y &= 4,200.00 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{vh} &= 0.71 \text{ cm}^2 \\
 s_h &= 35.00 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$V_{CR} = 0.85 \sqrt{f_c} tL = 50,227.71 \text{ kg}$$

$$V_{Resistente} = V_{CR} + V_s = 68,630.91 \text{ kg}$$

$$V_s = \frac{A_{vh} f_y d}{s_h} = 18,403.20 \text{ kg}$$

$$V_{agrietamiento} = 63,639.61 \text{ kg}$$

$$\% \text{ Diferencia} = 7.84$$

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #1-Losa maciza

$$\begin{aligned}t &= 12.85 \text{ cm} \\L &= 270.00 \text{ cm} \\A_{cv} &= 3,469.50 \text{ cm}^2 \\f_c &= 207.11 \text{ kg/cm}^2 \\f_y &= 4,200.00 \text{ kg/cm}^2 \\\rho_n &= 0.00225\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_n = A_{cv}(0.79\sqrt{f_c} + \rho_n f_y) &= 72,232.01 \text{ kg} \\V_{\text{agrietamiento}} &= 60,104.08 \text{ kg} \\\% \text{ Diferencia} &= 20.18 \\Diferencia_{\text{prom}} &= 17.69 \%\end{aligned}$$

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #2-Losa maciza

$$\begin{aligned}t &= 10.00 \text{ cm} \\L &= 270.00 \text{ cm} \\A_{cv} &= 2,700.00 \text{ cm}^2 \\f_c &= 275.65 \text{ kg/cm}^2 \\f_y &= 4,200.00 \text{ kg/cm}^2 \\\rho_n &= 0.00237\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_n = A_{cv}(0.79\sqrt{f_c} + \rho_n f_y) &= 62,289.38 \text{ kg} \\V_{\text{agrietamiento}} &= 53,033.01 \text{ kg} \\\% \text{ Diferencia} &= 17.45\end{aligned}$$

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #3-Losa maciza

$$\begin{aligned}t &= 12.50 \text{ cm} \\L &= 270.00 \text{ cm} \\A_{cv} &= 3,375.00 \text{ cm}^2 \\f_c &= 306.55 \text{ kg/cm}^2 \\f_y &= 4,200.00 \text{ kg/cm}^2 \\\rho_n &= 0.00189\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_n = A_{cv}(0.79\sqrt{f_c} + \rho_n f_y) &= 73,472.97 \text{ kg} \\V_{\text{agrietamiento}} &= 63,639.61 \text{ kg} \\\% \text{ Diferencia} &= 15.45\end{aligned}$$

APÉNDICE

E

Cálculo de Resistencias para Losacero

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96

(4.5.2.)⁶

Diafragma #3-

$$\begin{aligned} t &= 8.20 \text{ cm} \\ L &= 270.00 \text{ cm} \\ f_c &= 249.00 \text{ kg/cm}^2 \\ f^*c &= 199.20 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{y\text{malla}} &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{y\text{lámina}} &= 2,320.00 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{vh\text{malla tot.}} = 1.31 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} V_{CR} &= 0.85 \sqrt{f_c} tL = 29,695.88 \text{ kg} \\ V_{S\text{malla}} &= A_{vh\text{malla tot.}} f_{y\text{malla}} = 6,544.80 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{Resistente} &= V_{CR} + V_{S\text{malla}} = 36,240.68 \text{ kg} \\ V_{\text{agrietamiento}} &= 40,305.09 \text{ kg} \\ \% \text{ Diferencia} &= -10.08 \\ \text{Diferencia}_{\text{prom}} &= -21.88 \% \end{aligned}$$

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96

(4.5.2.)⁶

Diafragma #4-

$$\begin{aligned} t &= 8.70 \text{ cm} \\ L &= 270.00 \text{ cm} \\ f_c &= 256.00 \text{ kg/cm}^2 \\ f^*c &= 204.80 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{y\text{malla}} &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{y\text{lámina}} &= 2,320.00 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{vh\text{malla tot.}} = 1.31 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} V_{CR} &= 0.85 \sqrt{f_c} tL = 31,946.40 \text{ kg} \\ V_{S\text{malla}} &= A_{vh\text{malla tot.}} f_{y\text{malla}} = 6,544.80 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{Resistente} &= V_{CR} + V_{S\text{malla}} = 38,491.20 \text{ kg} \\ V_{\text{agrietamiento}} &= 53,033.01 \text{ kg} \\ \% \text{ Diferencia} &= -27.42 \end{aligned}$$

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96

(4.5.2.)⁶

Diafragma #5-

$$\begin{aligned} t &= 9.20 \text{ cm} \\ L &= 270.00 \text{ cm} \\ f_c &= 261.00 \text{ kg/cm}^2 \\ f^*c &= 208.80 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{y\text{malla}} &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{y\text{lámina}} &= 2,320.00 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{vh\text{malla tot.}} = 1.31 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} V_{CR} &= 0.85 \sqrt{f_c} tL = 34,110.71 \text{ kg} \\ V_{S\text{malla}} &= A_{vh\text{malla tot.}} f_{y\text{malla}} = 6,544.80 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{Resistente} &= V_{CR} + V_{S\text{malla}} = 40,655.51 \text{ kg} \\ V_{\text{agrietamiento}} &= 56,568.54 \text{ kg} \\ \% \text{ Diferencia} &= -28.13 \end{aligned}$$

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #3-Losacero

t =	8.20 cm	A _{vmalla} =	1.31 cm ²
L =	270.00 cm	ρ _{malla} =	0.00059
A _{cv} =	2,214.00 cm ²		
f _c =	249.00 kg/cm ²		
f _y malla =	5,000.00 kg/cm ²		

$$V_n = A_{cv} (0.79 \sqrt{f'_c} + \rho_{malla} f_{ymalla})$$

V _n =	34,144.50 kg
V _{agrietamiento} =	40,305.09 kg
% Diferencia =	-15.28
Diferencia _{prom} =	-26.45 %

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #4-Losacero

t =	8.70 cm	A _{vmalla} =	1.31 cm ²
L =	270.00 cm	ρ _{malla} =	0.00056
A _{cv} =	2,349.00 cm ²		
f _c =	256.00 kg/cm ²		
f _y malla =	5,000.00 kg/cm ²		

$$V_n = A_{cv} (0.79 \sqrt{f'_c} + \rho_{malla} f_{ymalla})$$

V _n =	36,236.16 kg
V _{agrietamiento} =	53,033.01 kg
% Diferencia =	-31.67

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #5-Losacero

t =	9.20 cm	A _{vmalla} =	1.31 cm ²
L =	270.00 cm	ρ _{malla} =	0.00053
A _{cv} =	2,484.00 cm ²		
f _c =	261.00 kg/cm ²		
f _y malla =	5,000.00 kg/cm ²		

$$V_n = A_{cv} (0.79 \sqrt{f'_c} + \rho_{malla} f_{ymalla})$$

V _n =	38,247.70 kg
V _{agrietamiento} =	56,568.54 kg
% Diferencia =	-32.39

APÉNDICE

F

**Cálculo de Resistencias para Losa de
Vigueta-Bovedilla**

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96

(4.5.2.)⁶

Diafragma #1-Losa de vigueta y bovedilla

$$\begin{aligned}
 t_{\text{equivalente}} &= 6.90 \text{ cm} \\
 L &= 290.00 \text{ cm} \\
 d = 0.8L &= 232.00 \text{ cm} \\
 f_c &= 288.04 \text{ kg/cm}^2 \\
 f^*c &= 230.43 \text{ kg/cm}^2 \\
 f_y &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Area de Concreto} &= 2,000.00 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{\text{vhmalla tot.}} = 1.41 \text{ cm}^2$$

$$V_{\text{CR}} = 0.85 \sqrt{f_c} tL = 28,851.96 \text{ kg}$$

$$V_{\text{Resistente}} = V_{\text{CR}} + V_{\text{s_malla}} = 35,901.96 \text{ kg}$$

$$V_{\text{agrietamiento}} = 56,568.54 \text{ kg}$$

$$V_{\text{malla}} = A_{\text{vhmalla tot.}} f_{y_{\text{malla}}} = 7,050.00 \text{ kg}$$

$$\% \text{ Diferencia} = -36.53 \%$$

$$\text{Diferencia}_{\text{prom}} = -31.35 \%$$

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96

(4.5.2.)⁶

Diafragma #2-Losa de vigueta y bovedilla

$$\begin{aligned}
 t_{\text{equivalente}} &= 6.90 \text{ cm} \\
 L &= 290.00 \text{ cm} \\
 d = 0.8L &= 232.00 \text{ cm} \\
 f_c &= 308.51 \text{ kg/cm}^2 \\
 f^*c &= 246.81 \text{ kg/cm}^2 \\
 f_y &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Area de Concreto} &= 2,000.00 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{\text{vhmalla tot.}} = 1.41 \text{ cm}^2$$

$$V_{\text{CR}} = 0.85 \sqrt{f_c} tL = 29,859.57 \text{ kg}$$

$$V_{\text{Resistente}} = V_{\text{CR}} + V_{\text{s_malla}} = 36,909.57 \text{ kg}$$

$$V_{\text{agrietamiento}} = 53,033.01 \text{ kg}$$

$$V_{\text{malla}} = A_{\text{vhmalla tot.}} f_{y_{\text{malla}}} = 7,050.00 \text{ kg}$$

$$\% \text{ Diferencia} = -30.40 \%$$

Resistencia Calculada de acuerdo con NTC-96

(4.5.2.)⁶

Diafragma #3-Losa de vigueta y bovedilla

$$\begin{aligned}
 t_{\text{equivalente}} &= 6.90 \text{ cm} \\
 L &= 290.00 \text{ cm} \\
 d = 0.8L &= 232.00 \text{ cm} \\
 f_c &= 291.40 \text{ kg/cm}^2 \\
 f^*c &= 233.12 \text{ kg/cm}^2 \\
 f_y &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\
 \text{Area de Concreto} &= 2,000.00 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{\text{vhmalla tot.}} = 1.41 \text{ cm}^2$$

$$V_{\text{CR}} = 0.85 \sqrt{f_c} tL = 29,019.75 \text{ kg}$$

$$V_{\text{Resistente}} = V_{\text{CR}} + V_{\text{s_malla}} = 36,069.75 \text{ kg}$$

$$V_{\text{agrietamiento}} = 49,497.47 \text{ kg}$$

$$V_{\text{malla}} = A_{\text{vhmalla tot.}} f_{y_{\text{malla}}} = 7,050.00 \text{ kg}$$

$$\% \text{ Diferencia} = -27.13 \%$$

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #1-Losa de vigueta y bovedilla

$$\begin{aligned}t_{\text{equivalente}} &= 6.90 \text{ cm} \\L &= 290.00 \text{ cm} \\A_{\text{cv}} &= 2,000.00 \text{ cm}^2 \\f_c &= 288.04 \text{ kg/cm}^2 \\f_{y\text{malla}} &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\P_{\text{malla}} &= 0.00097\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_s &= A_{\text{cv}}(0.79\sqrt{f'_c} + \rho_s f_y) = 36,515.35 \text{ kg} \\V_{\text{agrietamiento}} &= 56,568.54 \text{ kg} \\\% \text{ Diferencia} &= -35.45 \text{ \%} \\Diferencia_{\text{prom}} &= -30.25 \text{ \%}\end{aligned}$$

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #2-Losa de vigueta y bovedilla

$$\begin{aligned}t_{\text{equivalente}} &= 6.90 \text{ cm} \\L &= 290.00 \text{ cm} \\A_{\text{cv}} &= 2,000.00 \text{ cm}^2 \\f_c &= 308.51 \text{ kg/cm}^2 \\f_{y\text{malla}} &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\P_{\text{malla}} &= 0.00097\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_s &= A_{\text{cv}}(0.79\sqrt{f'_c} + \rho_s f_y) = 37,451.84 \text{ kg} \\V_{\text{agrietamiento}} &= 53,033.01 \text{ kg} \\\% \text{ Diferencia} &= -29.38\end{aligned}$$

Resistencia Calculada de acuerdo con ACI 318-95 (21.6.4.)⁸

Diafragma #3-Losa de vigueta y bovedilla

$$\begin{aligned}t_{\text{equivalente}} &= 6.90 \text{ cm} \\L &= 290.00 \text{ cm} \\A_{\text{cv}} &= 2,000.00 \text{ cm}^2 \\f_c &= 291.40 \text{ kg/cm}^2 \\f_{y\text{malla}} &= 5,000.00 \text{ kg/cm}^2 \\P_{\text{malla}} &= 0.00097\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_s &= A_{\text{cv}}(0.79\sqrt{f'_c} + \rho_s f_y) = 36,671.30 \text{ kg} \\V_{\text{agrietamiento}} &= 49,497.47 \text{ kg} \\\% \text{ Diferencia} &= -25.91\end{aligned}$$