

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

PROYECTO DE TESIS

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOSAS DE
LAMINA Y CONCRETO DE ANHIDRITA BAJO
CARGAS GRAVITACIONALES**

ING. LEONEL IVANNOVICH LOPEZ GUZMAN

MONTERREY, NUEVO LEON

MAYO DE 2003

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY
CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

PROYECTO DE TESIS

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOSAS DE LÁMINA Y
CONCRETOS DE ANHIDRITA BAJO CARGAS GRAVITACIONALES**

ING. LEONEL IVANNOVICH LÓPEZ GUZMÁN

MONTERREY, N. L.

MAYO 2003

AGRADECIMIENTOS

"¡Bendito seas señor mío!, por haber puesto en mi camino personas tan maravillosas y llenas de amor".

A Dios, por haber creado seres excepcionales y muy amados por mí, mis padres Leonel y Virginia, dos grandes y sin iguales personas que han sembrado en mi lo que ahora soy como profesionista y como ser humano. ¡Gracias señor divino!.

A mis hermanos Alexey, Lenika, Yoseliani, Adriana y Clarissa por todas sus muestras de apoyo y cariño en cada instante de mi estancia en Monterrey. En verdad, todo su amor lo llevo muy dentro de mi corazón.

A todos mis familiares (tíos, primos), por su gran cariño, admiración y apoyo, lo cual me alentaba a seguir realizando las cosas de la mejor manera posible. En especial a mi abuela Victoria, mis tías Lourdes, Tania Clarissa y Carmelita, por su gran amor y cariño.

A mi tío Alberto Guzmán, por despertar en mí el interés hacia el estudio propio, compartir sus experiencias personales y enseñarme a escuchar a uno mismo en los momentos difíciles de mi vida.

A mi niña hermosa, Nelly (mi amor) con amor y admiración dedico esta obra de mi vida. Gracias mi tesoro, por tu comprensión, paciencia y palabras de aliento para seguir en pie.

A mis abuelos Heriberto, Eleodoro y mi abuela Delia, que en algún lugar del cielo están gozando al lado de nuestro señor.

A mis amigos de la Maestría y amigos del Centro de Diseño y Construcción, por su solidaridad en los momentos difíciles y claves de la investigación. En especial a los Ingenieros José Ramón López Gámez, Eduardo Hernández Alfaro, Canek

Rubio López, Oscar A. Avilés Sánchez por su gran apoyo durante el proceso constructivo de los especímenes de prueba y el desarrollo experimental de los mismos.

A mi asesor el Dr. Francisco S. Yeomans Reyna, por su gran apoyo, comentarios, sugerencias en aras de obtener una buena investigación y por darme la oportunidad de aprender un poco de su experiencia en la Ingeniería Civil. A mis sinodales, M.C. Carlos Nungaray Pérez y M.C. Delma V. Almada Navarro por sus comentarios y sugerencias.

Al Ing. Jesús Durán de la empresa Galvak, por su gran apoyo con las láminas de acero para la construcción de las losas compuestas y al I.Q. Daniel Dávila de la empresa Termolita, por apoyarnos con la anhidrita para la elaboración del concreto de los especímenes de prueba.

INDICE**Página****CAPÍTULO UNO**

1. Introducción	1
1.2. Línea de Investigación	4
1.3. Objetivo del trabajo de tesis	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos particulares	

CAPÍTULO DOS

2. Estado del arte o revisión de la literatura	6
2.1. Antecedentes	6
2.2. Introducción	7
2.3. Generalidades	8
2.4. Investigaciones realizadas en losas de lámina de acero y concreto	9
2.5. Especificaciones ASCE para sistemas compuestos	12
2.5.1. Resistencia de Diseño	12
2.5.1.1. Factores de Carga	12
2.5.1.2. Factores de Reducción de Resistencia	13
2.5.1.3. Relaciones de Resistencia	13
2.5.2. Resistencia al cortante por adherencia	13
2.5.3. Resistencia a la Flexión	14
2.5.4. Diseño por cargas de servicio	16
2.5.5. Desarrollo de pruebas experimentales	17
2.5.5.1. Alcance de las pruebas experimentales	23
2.5.5.2. Evaluación de los resultados de las pruebas	25
2.6. Especificaciones SDI para sistemas compuestos	27
2.6.1. Comportamiento del Sistema Compuesto a base de lámina y concreto	27
2.6.1.1. Análisis de esfuerzos de trabajo en el acero de refuerzo	28
2.6.1.2. Análisis de resistencia Última	28
2.6.1.3. Análisis de esfuerzos de trabajo en el concreto	29
2.6.2. Otros requerimientos importantes	29

CAPÍTULO TRES

3. Desarrollo Experimental	31
3.1. Introducción	31
3.2. Características de los modelos de prueba	32

3.2.1. Dimensiones de los modelos de prueba	32
3.2.2. Procedimiento para pruebas experimentales	33
3.2.2.1. Modelo de cargas en especímenes de prueba	33
3.2.2.2. Instrumentación	35
3.2.2.3. Registro de datos	35
3.3 Alcance de las pruebas experimentales	37
3.3.1. Pruebas de Corte por Adherencia	37
3.3.2. Pruebas a Flexión	38
3.4. Evaluación de los resultados	39
3.4.1. Corte por adherencia	39
3.4.2. Flexión	40

CAPÍTULO CUATRO

4. Modelo Analítico	42
4.1. Introducción	42
4.2. Modelo Analítico para la predicción del desplazamiento límite	42
4.3. Ajustes para la gráfica Momento-Curvatura	47

CAPÍTULO CINCO

5. Análisis de Resultados	50
5.1. Introducción	50
5.2. Resultados para especímenes de la región B	50
5.3. Resultados para especímenes de la región A	71
5.4. Comparativa de Modelo Analítico vs Pruebas Experimentales en la predicción del comportamiento y del desplazamiento límite del elemento compuesto	92
5.4.1. Resultados de Modelos Analíticos empleados en la predicción del comportamiento y del desplazamiento límite de los elementos compuestos	93
5.5. Comparativa de Cortantes Experimentales contra Cortantes Teóricos basados en el reglamento de la ASCE	102
5.6. Comparativa de Comportamientos en Especímenes de Prueba	105
5.7. Cálculo de los esfuerzos de adherencia teóricos	113
5.8. Modelo para la predicción del comportamiento de elementos compuestos de lámina y concretos de anhidrita	116
5.9. Gráficas comparativas de comportamientos entre losas de concreto normal y losas de concretos de anhidrita.	118

CAPÍTULO SEIS

6. Conclusiones y Recomendaciones	120
6.1. Conclusiones	120
6.2. Recomendaciones	121

CAPÍTULO SIETE

7. Bibliografía

122

1. Introducción

A lo largo de los siglos, los sistemas de entresijos han cambiado su forma y tipos de material de los cuales se conforman, desde las antiguas formas, en su mayoría de madera soportada por vigas de acero, los elaborados a base de arcilla, hasta los más modernos producto de la combinación de elementos de pared delgada y concreto.

Gracias a que la industria del acero ha mejorado la calidad de sus productos, la evolución de los sistemas de entresijos han crecido en gran medida, adicionalmente, el desarrollo de los métodos de análisis, diseño y construcción ha permitido pasar de estructuras robustas, pesadas y simétricas a estructuras de formas esbeltas, ligeras y asimétricas.

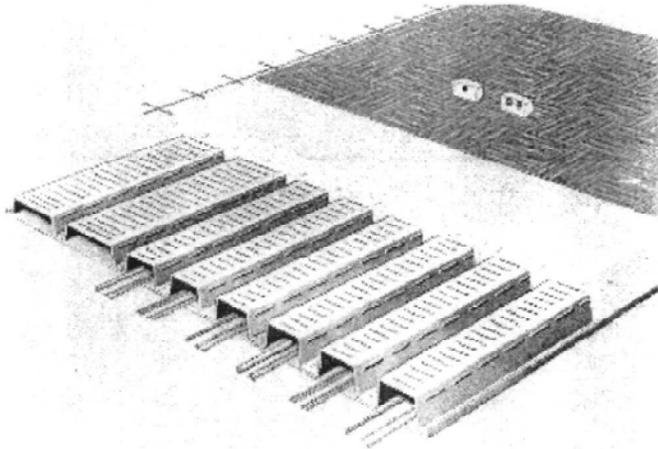
En la actualidad, un buen número de entresijos en edificaciones de varios niveles, son construidas a base de lámina de acero y concreto. Muchas de éstas son diseñadas como losas compuestas, en donde la lámina de acero es utilizada como el refuerzo en la zona de tensión de la losa.

Comparado con otros materiales tales como la madera y el concreto, los miembros y sistemas estructurales de lámina doblados en frío tienen las siguientes ventajas [8]:

1. Ligereza
2. Alta rigidez y resistencia
3. Facilidad de fabricación y producción en volumen.
4. Rapidez en construcción e instalación.
5. Calidad uniforme.
6. No es combustible.
7. No se contrae, ni presenta flujo plástico para temperaturas ambiente.
8. Requiere poco mantenimiento.

9. No requiere de cimbra.
10. Fácil de transportar y manejar.
11. Durabilidad.

Adicionalmente, la forma de este tipo de cubiertas proporciona áreas que facilitan las instalaciones eléctricas, permitiendo colocar materiales especiales que aislen el sonido, como se aprecia en la figura 1.1.



1.1-Instalaciones eléctricas en losas de lámina y concreto [8].

Los sistemas de lámina y concreto ofrecen una buena opción para la construcción de sistemas de entresijos. Sin embargo en busca de proponer nuevas alternativas, el objetivo de esta investigación es hacer un reemplazo al sistema estructural, el cual consiste en sustituir el concreto que comúnmente se usa para este tipo de sistemas, por un concreto alternativo con características muy atractivas desde el punto de vista económico y ambientales llamado "concreto de anhídrita".

Este sistema de entresijo, a base de concreto de anhídrita nos ofrece una serie de ventajas adicionales a las ya mencionadas para sistemas de entresijo de lámina y concreto tradicional. Las ventajas más importantes de este sistema estructural son las siguientes:

1. En términos económicos, el precio del concreto a base de anhídrita es la mitad del precio de concreto elaborado con cemento portland.

2. La lámina utilizada para el sistema de entrepiso, además de servir como refuerzo principal en la zona de momentos positivos, sirve de cimbra para el espesor de concreto.
3. Su rápida instalación ahorra tiempo en su construcción, lo que implicará un ahorro económico dentro del costo de la obra ya que los costos directos y costos indirectos de obra y oficina se ven reducidos de alguna manera.
4. Una característica muy importante de este tipo de losa, es su bajo impacto al medio ambiente, debido a que uno de sus componentes estructurales y de mayor volumen en la estructura o sea el concreto de anhidrita, se obtiene de manera natural (CaSO_4) y de residuos generados en la obtención de ácido fluorhídrico HF.

Por todo esto, se hará un estudio al sistema de entrepiso hecho a base de lámina y concreto de anhidrita con la finalidad de conocer su comportamiento bajo la acción de las cargas de gravedad y corroborar si efectivamente es una buena alternativa como sistema estructural en edificaciones de varios niveles.

1.2. Línea de Investigación

Dentro del trabajo de investigación a realizar se abarcarán las siguientes líneas de investigación de la Maestría en Ingeniería y Administración de la Construcción con especialidad en Ingeniería Estructural del Instituto Tecnológico Superiores de Monterrey Campus Monterrey:

- Materiales.
- Componentes Estructurales.

1.3. Objetivo del trabajo de tesis

1.3.1 Objetivo General

El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es estudiar el comportamiento de una losa de concreto formada por un elemento de pared delgada (lámina) y concreto de anhidrita cuando se somete a las acciones de gravedad.

1.3.2. Objetivos Particulares

Los objetivos particulares o específicos de este trabajo de tesis se describen a continuación:

1. Revisión de la literatura sobre el comportamiento de losas de lámina y concreto sujetas a cargas de gravedad.
2. Caracterizar el concreto de anhidrita.
3. Establecer un procedimiento de diseño para este sistema de entrepiso en particular.
4. Realizar un estudio indirecto de la pérdida de adherencia entre la lámina de acero y el concreto de anhidrita.
5. Evaluación del comportamiento a flexión de elementos compuestos de lámina y concreto.
6. Establecer un modelo analítico que prediga el desplazamiento de elementos compuesto de lámina y concreto de anhidrita.

7. Determinar el modo de falla y la carga de resistencia última de la losa compuesta.
8. Factibilidad de este sistema estructural en la construcción.

2. Estado del Arte o Revisión de Literatura

2.1 Antecedentes

En el transcurso de los años, las necesidades del ingeniero en la solución de problemas estructurales, han provocado el desarrollo de sistemas estructurales, y con ello muchos investigadores se han preocupado por estudiar a fondo su comportamiento, con el objetivo de proporcionar técnicas de diseños apegadas al comportamiento real del sistema estructural.

Un sistema estructural surge a partir de la unión de varios elementos estructurales (vigas, columnas, diagonales, montantes, etc.) ensamblados en el espacio de tal manera que sean capaces de resistir las acciones para las cuales fueron diseñados. Algunos de los sistemas estructurales más comunes son: sistemas de entrepiso tales como losas de concreto reforzado, losas de lámina de acero y concreto, armaduras, marcos, parrillas, muros reforzados, etc.

La utilización de losas, a base de lámina y concreto, se ha incrementado principalmente por las ventajas económicas que ofrecen, debido a que la lámina de acero sirve de cimbra para la losa en la colocación del concreto y forma parte del refuerzo principal en la zona de tensión. Adicionalmente, los sistemas estructurales de losa, hechos a base de lámina no solo tienen la capacidad de resistir cargas normales a su superficie, sino que también pueden funcionar como diafragmas para resistir cargas laterales, siempre y cuando se tenga una conexión adecuada entre la lámina y el miembro de soporte de la lámina.

Un sistema típico de lámina de acero y concreto se muestra en la figura 2.1.

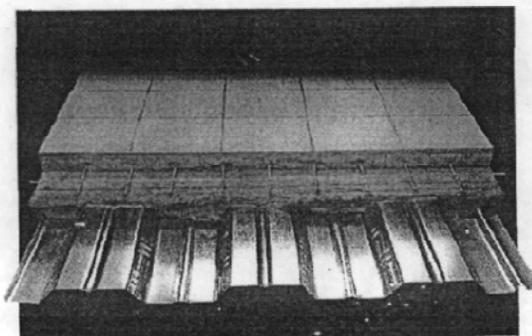


Figura 2.1. Losa típica construida con lámina de acero y concreto [13]

En la actualidad, un gran número de sistemas de entrepisos en edificaciones de varios niveles son construidos empleando lámina de acero y concreto, los cuales son diseñados en su gran mayoría como un sistema estructural compuesto, basados en resultados de programas de pruebas experimentales. Estos programas tienen como finalidad proporcionar al diseñador una guía para el diseño de losas compuestas.

Recientemente, algunos investigadores han propuesto procedimientos de diseño de losas compuestas basados en métodos analíticos del concreto reforzado y verificados con pruebas experimentales.

2.2. Introducción

El empleo de losas a base de lámina y concreto en sistemas de entrepiso data desde el año de 1920. En sus inicios la lámina de acero se empleaba como único componente estructural, cubierta de concreto para protegerla del fuego, del intemperismo y con la finalidad de proporcionar una superficie lisa que permitiera la funcionalidad de la edificación[10].

En 1954, fue diseñado el primer perfil de lámina de acero por Friberg y primeramente fue elaborado por la compañía "Granite City Steel". Friberg utilizó los principios tradicionales del concreto reforzado para predecir los esfuerzos en el sistema, los cuales resultaron satisfactorios [10].

En el año de 1967, con la idea de crear un procedimiento de diseño general para losas compuestas, el AISI inició un intenso programa de investigación en la Universidad del Estado de Iowa (ISU), los cuales arrojaron una serie de reportes, tesis y documentos técnicos, mismos que fueron publicados en 1978 por Porter y Ekberg [10].

Durante el transcurso del proyecto, algunas recomendaciones de diseño para losas compuestas fueron desarrolladas en ISU en conjunción con un comité de tareas específicas del AISI (Porter y Ekberg). Estas recomendaciones fueron la base de las especificaciones ASCE para losas compuestas, publicadas en 1984 [10].

2.3. Generalidades

En general los sistemas de entrepiso a base de losas de concreto, se pueden dividir en dos grandes categorías. Una, llamada losas sin vigas y otra llamada losas apoyadas en vigas situadas en los bordes de cada claro.

Las losas sin vigas, se refieren a placas y losas planas. Las placas, son estructuras de espesor uniforme apoyadas directamente sobre columnas, tal como se muestra en la figura 2.2.

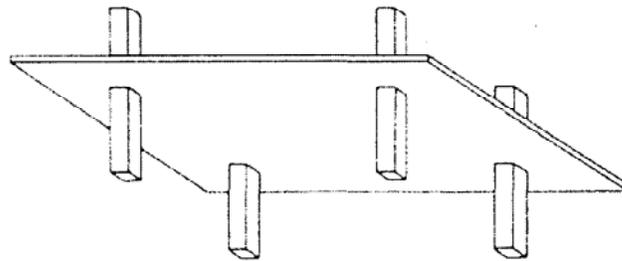


Figura 2.2. Placa plana [5]

Las losas planas se caracterizan por la presencia de capiteles en la parte superior de la columna o de áreas gruesas alrededor de la columna con la finalidad de eliminar el corte. Esto lo apreciamos mejor en la figura 2.3.

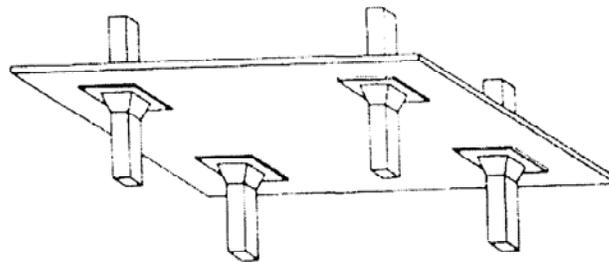


Figura 2.3. Losa plana [5]

La aplicación entre uno y otro tipo de losa, queda en función de la magnitud de las cargas de diseño y de la magnitud de los claros. Las losas apoyadas en vigas en todos los lados del panel, son a menudo conocidas como losas reforzadas en dos direcciones, tal como se muestra en la figura 2.4.

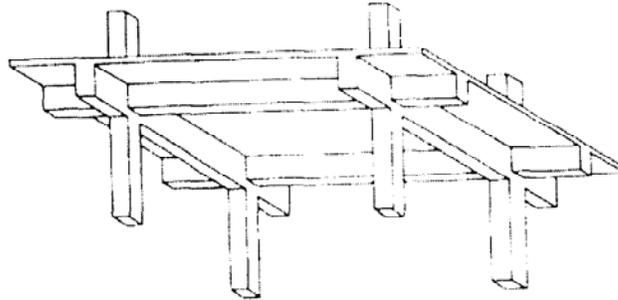


Figura 2.4. Losa reforzada en dos direcciones [5].

En este sistema de entepiso, resulta fácil visualizar como es el flujo de cargas a la cimentación, donde primeramente las cargas de la losa se transmiten a las vigas y trabes de acuerdo al área tributaria correspondiente para cada una de ellas, después de las vigas y las trabes pasa a las columnas para que finalmente a través de éstas lleguen a la cimentación donde se transmiten al terreno natural.

La primera losa plana se construyó en el año de 1906 en Minneapolis, Minnesota, por C. A. P. Turner. Debido a que la estructura cumplió satisfactoriamente con todos los requisitos de pruebas de carga la losa plana se convirtió rápidamente en el sistema de entepiso del momento y a causa de esto se construyeron en los E.U.A. más de 1000 estructuras en los 7 años posteriores a la primera que se edificó [5].

2.4 Investigaciones realizadas en Losas de Lámina de Acero y Concreto

Un método común para el análisis y diseño de sistemas de lámina y concreto, es considerar el sistema estructural como unidireccional [9]. Aquí el ingeniero estructurista selecciona el peralte y espesor de la lámina de acero basándose en

los requerimientos de cargas que tabularmente existen obtenidos a partir de un programa de pruebas experimentales.

Sin embargo, algunas cuestiones importantes en cuanto a la distribución de las fuerzas en la dirección débil (perpendicular a las corrugaciones), la cantidad de fuerza transmitida por los elementos de apoyo en las periferias, las deflexiones experimentadas por la losa, el estado límite de falla en el sistema estructural, la carga última de resistencia, la configuración del agrietamiento ocurrido en el sistema, el nivel de deformación en el acero y concreto, la adherencia entre la lámina y el concreto de la losa, el efecto de la adición de refuerzo soldado en el entrepiso, etc., son parámetros de gran interés para el análisis y diseño de este sistema estructural [9].

En 1977 Porter y Ekberg realizaron investigaciones a cerca del comportamiento de sistemas de losas de lámina de acero y concreto bajo cargas concentradas, haciendo pruebas de modelos escalados naturalmente donde encontraron que la falla última del sistema estructural se inició debido al deslizamiento entre la lámina de acero y el concreto, donde el concreto se movió en la dirección paralela a las corrugaciones en las regiones centrales de la losa. Este tipo de falla fue catalogada dentro de las fallas por cortante. Adicionalmente se concluyó que la falla de la losa no ocurrió como resultado del estado límite de fluencia del acero.

Porter y Ekberg observaron zonas localizadas de fluencia en la vecindad del punto de aplicación de las cargas antes que sucediera la falla del sistema estructural. También, se observó que la adición de acero de refuerzo soldado a la lámina, influenció de manera considerable en el comportamiento del entrepiso, ya que hubo un incremento de más del 40 % en la capacidad de carga en comparación con una losa de las mismas características pero sin refuerzo adicional. Desde el punto de vista de los esfuerzos no es necesario colocar una cantidad extra de refuerzo en el sistema de lámina y concreto, sin embargo debidos a los cambios de temperatura que experimenta la losa durante su vida útil se requiere la colocación de refuerzo adicional en la parte superior del

sistema para así cumplir con las condiciones de servicio para la que fue diseñada.

Resultados de investigaciones recientes [10], basadas en los conceptos convencionales de concreto reforzado y comparadas con pruebas experimentales, muestran que el primer momento de fluencia es un parámetro razonablemente útil en el cálculo de los esfuerzos de las losas compuestas.

El cálculo de los desplazamientos bajo cargas de servicio, empleando las especificaciones ASCE (1984) proporciona una muy buena aproximación, esto fue concluido por Easterling y Young en 1992 al comparar los resultados analíticos calculados con las normas y los datos obtenidos de pruebas experimentales realizadas por ellos. El momento de inercia empleado para el cálculo de las deflexiones, se obtiene a partir de la transformación de la lámina de acero y el concreto a una sección equivalente de concreto, donde el momento de inercia se calcula como un porcentaje del momento de inercia de la sección agrietada y sin agrietarse.

Actualmente, existen organismos internacionales que han estudiado muy de cerca el comportamiento de los sistemas de entrepiso de lámina y concreto, dentro de los cuales se encuentran, el "*Steel Deck Institute (SDI)*" [6] y la "*American Society of Civil Engineer (ASCE)*" [1].

Dichas instituciones, han realizado una extensa investigación experimental de la respuesta de los sistemas compuestos bajo diferentes condiciones de carga y cuentan con buen número de publicaciones que en la modernidad rigen los diseños de este tipo de sistemas estructurales.

En el ITESM, se han desarrollado proyectos de investigación con la finalidad de establecer tablas de cargas para el diseño de losas compuestas de lámina y concreto normal, a partir de pruebas de laboratorio [24]. Entre otras cosas interesantes, resultados de esta investigación muestra que la expresión analítica para la predicción del cortante último de una sección compuesta puede ser utilizada con seguridad, siempre y cuando la falla sea producto de la pérdida de adherencia entre el concreto y la lámina [24].

2.5 Especificaciones ASCE para Sistemas Compuestos

Las especificaciones más importantes en el diseño de un sistema de entrespado compuesto según el ASCE [1] son:

2.5.1 Resistencia de Diseño

Secciones Compuestas.-La aplicación de las cargas de diseño, deberá ser realizada una vez que el concreto haya alcanzado su resistencia total de diseño. En cuanto a cargas vivas admisibles deberá ser el menor valor obtenido de todas las consideraciones presentadas en el reglamento.

2.5.1.1 Factores de Carga

La carga muerta calculada, W_d , y la carga viva estipulada uniformemente distribuida, W_l , deberá ser multiplicada por los factores de carga correspondientes para obtener las cargas factorizadas, W_u , la cual deberá ser la mayor de las siguientes combinaciones de carga:

$$W_u = 1.4 W_d \quad 2.1$$

$$W_u = 1.2 W_d + 1.6 W_l + 0.5 W_{rf} \quad 2.2$$

Donde W_{rf} son las cargas vivas de piso (se recomienda ver sección 4.11 del ASCE 7), cargas de nieve o cargas de lluvia.

Cuando las cargas de viento, W , o cargas de sismo (perpendicular a la losa), E , deben ser incluidas en el diseño, W_u deberá ser:

$$W_u = 1.2 W_d + (0.5 W_l \text{ ó } 0.8 W) + 1.6 W_{rf} \quad 2.3$$

$$W_u = 1.2 W_d + 0.5 W_l + 1.3 W + 0.5 W_{rf} \quad 2.4$$

$$W_u = 1.2 W_d + 1.5 E - (0.5 W_l \text{ ó } 0.2 W_{sw}) \quad 2.5$$

$$W_u = 0.9 W_d - (1.3 W \text{ ó } 1.5 E) \quad 2.6$$

Cualquiera que gobierne, donde W_{sw} son las cargas por nieve. El diseñador deberá seleccionar la combinación apropiada y deberá considerar otras combinaciones de acuerdo con ASCE 7.

2.5.1.2 Factores de reducción de resistencia, ϕ

a) Cortante de frontera	0.75
b) Flexión (subreforzado)	0.85
c) Flexión (subreforzado cuando $f_u / f_y \leq 1.08$)	0.65
d) Flexión (sobreforzado)	0.70
e) Flexión (concreto pobre)	0.60

2.5.1.3 Relaciones de resistencia

La resistencia del sistema estructural compuesto deberá ser gobernado por una de las siguientes capacidades de carga:

- a) Cortante por adherencia
- b) Flexión de una sección subreforzada, ó
- c) Flexión de una sección sobreforzada

2.5.2 Resistencia al cortante por adherencia

La fuerza cortante factorizada, V_u y la resistencia a la fuerza cortante, ϕV_n (en la dirección paralela a las corrugaciones de la losa) en lb/ft se relacionan por la siguiente expresión:

$$V_u \leq \phi V_n \quad 2.7$$

Para claros simplemente apoyados con cargas concentradas la resistencia al cortante es:

$$\phi V_n = \phi \left[bd \left(\frac{m\rho d}{\ell_i} + k\sqrt{f'c} \right) + \frac{\gamma W_s \ell_f}{2} \right] \quad 2.8$$

Para una carga uniformemente distribuida la ecuación 2.8 queda de la siguiente manera:

$$\phi V_n = \phi \left[bd \left(\frac{4m\rho d}{\ell_i} + k\sqrt{f'c} \right) + \frac{\gamma W_s \ell_f}{2} \right] \quad 2.9$$

De las pruebas de cortante se derivan los valores m y k , los cuales deberán calcularse de acuerdo a la sección 3.2.3.1 del ASCE [1].

Para determinar la porción de carga muerta soportada por la sección compuesta, se deberá considerar las condiciones de apoyo del sistema estructural durante la colocación del concreto, algunos factores se muestran en la Tabla 2.1.

Apoyo durante la colocación del concreto	γ^*
Apoyo completo en toda la longitud	1.000
Sin apoyo	0.000
Apoyo en el centro	0.625
Apoyado en tres puntos	0.733

Tabla 2.1. Factores de apuntalamiento [1].

* Otros factores para γ son necesarios según la configuración de apoyos del sistema.

Basados en la ecuación 2.2 de la sección 2.3.1.2 del manual ASCE, la carga viva uniforme admisible por cortante, W_{ls} , en lb/in² es determinada con:

$$W_{ls} = \frac{1}{1.6} \left[\frac{2\phi V_n}{\ell_f} - 1.2(\gamma W_s + W_{ds}) \right] \quad 2.10$$

donde ϕV_n es determinado por las ecuaciones 2.8 ó 2.9 y W_{rf} es cero.

Para las cargas de las ecuaciones 2.1, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6, W_{rf} , o cargas concentradas, la ecuación 2.10 deberá ser redefinida.

2.5.3 Resistencia a la flexión

En los sistemas de entresijos compuestas existen típicamente dos casos, uno cuando la losa está subreforzada y cuando el sistema estructural losa está sobreforzada, esto es dependiendo del porcentaje de acero de refuerzo ρ dado por $\rho = A_s / bd$. Para una falla balanceada el porcentaje de acero se calcula con:

$$\rho_b = \frac{0.85\beta_1 f'_c \left[\varepsilon_s E_s (h - d_d) \right]}{f_y \left[(\varepsilon_c E_s + f_y) d \right]} \quad 2.11$$

Losas con $\rho \leq \rho_b$ se consideran como subreforzadas y losas $\rho > \rho_b$ son consideradas como sobreforzadas.

Para el diseño de la sección transversal sujeta a flexión deberá basarse en:

$$M_u \leq \phi M_n \quad 2.12$$

Donde M_u , es el momento último factorizado actuante en la sección considerada y ϕM_n es el momento resistente de la sección transversal.

Caso subreforzado

Para este caso el momento resistente de diseño, ϕM_n es:

$$\phi M_n = \frac{\phi A_s f_y}{12} \left[d - \frac{a}{2} \right] \quad 2.13$$

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left[d - \frac{a}{2} \right] \text{ para el sistema SI}$$

La ecuación 2.13 deberá ser usada para losas capaces de desarrollar o alcanzar el esfuerzo de fluencia en el peralte completo de la lámina. Cuando la compatibilidad de deformaciones en la sección transversal o la ductilidad del acero no permita la fluencia en la sección completa de la lámina de acero, será necesario realizar un análisis general de resistencia. La ecuación 2.13 no es válida para láminas de un acero cuyo valor de f_u / f_y sea menor que 1.08.

Adicionalmente, la ecuación 2.13 queda al margen de aplicarse cuando exista refuerzo adicional encima de la lámina de acero y cuando una parte de la sección de la lámina esté sujeta a compresión. Para casos donde no se pueda aplicar la ecuación 2.13 un análisis generalizado de esfuerzos de deformaciones será necesario para conocer la respuesta del sistema.

Caso sobrerreforzado

El momento resistente de diseño, ϕM_n para sistemas sobrerreforzados se calcula mediante un análisis general de deformaciones. Para la validación de la capacidad de carga, es importante realizar pruebas experimentales y revisar la sección 3.2.4.3 de estas especificaciones.

Basados en la ecuación 2.2 de la sección 2.3.1.2, la carga viva permisible, W_{lf} para flexión en lb/in^2 se determina con la siguiente expresión:

$$W_{lf} = \frac{1}{1.6} \left(\frac{\phi M_n}{C_m \ell_f^2} - 1.2(W_s + W_{ds}) \right) \quad 2.14$$

donde W_{lf} es cero.

Para casos donde se usen combinaciones de carga tal como las de las ecuaciones 2.1 ó 2.3, hasta la 2.6 o W_{lf} la ecuación 2.14 deberá ser redefinida.

2.5.4 Diseño por cargas de servicio

Propiedades de la sección para el cálculo de las deflexiones

Las propiedades de la sección compuesta sometida a flexión, necesarias para determinar las deflexiones verticales del sistema estructural compuesto se deberán calcular de acuerdo con la teoría elástica convencional del concreto reforzado, requiriendo usar una transformación de áreas de acero a áreas equivalentes de concreto. Las siguientes suposiciones deberán ser tomadas en cuenta en la derivación de las relaciones necesarias:

- a) Secciones planas antes de la flexión permanecen planas después de la flexión (por ejemplo, las deformaciones longitudinales del concreto y del acero corrugado son proporcionales a la distancia de la fibra desde el eje neutro central compuesto.
- b) Los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones tanto para el concreto como para el acero bajo cargas de servicio.

- c) La sección transversal total deberá ser utilizada excepto cuando este reducida por agujero en la lámina.
- d) El momento de inercia I_d , usado en el cálculo de las deflexiones deberá ser tomado como un porcentaje de las secciones agrietadas I_c y las secciones sin agrietarse I_u , usando el peralte de diseño de la losa. Las fórmulas para el cálculo de las propiedades de la sección sometida a flexión y momentos de inercia son dadas en el Apéndice B de la norma del ASCE [1].

Deflexiones Límite

La consideración que debe ser tomada en cuenta para ambos casos (cargas instantáneas y cargas de larga duración). Las deflexiones máximas deben calcularse para las losas compuestas de todas las categorías basadas en lo dicho anteriormente.

La máxima deflexión se puede obtener mediante la Tabla 2.2.de la norma ASCE para sistemas compuestos. Pero las deflexiones a largo plazo del sistema estructural losa se calcularán multiplicando la deflexión instantánea debido a cargas sostenidas por el factor:

$$\lambda = \left[2 - 1.2 \left(\frac{A's}{A''s} \right) \right] \geq 0.6 \quad 2.15$$

donde $A's$, es el área de la porción de la lámina de acero la cual esta sometida a compresión en in^2/ft y $A''s$, es el área de la porción de acero la cual está en tensión en in^2/ft .

2.5.5 Desarrollo de pruebas experimentales

Características de los modelos de prueba.- El modelo de prueba que será ensayado, así como la localización de las cargas son tales que fallas por adherencia se logran para claros pequeños y fallas por flexión ocurran para claros largos. Debemos cuidar durante la fabricación de los especímenes de prueba, los esfuerzos resultantes y las deflexiones no deberán exceder los

valores indicados en las secciones 2.2.4 y 2.2.6 del manual del ASCE. El concreto empleado en los especímenes de las losas compuestas, deberá ser preparado y curado de acuerdo con los requerimientos que marca el ACI 318-95.

Dimensiones de los modelos de prueba.- Las dimensiones de los especímenes de prueba, deberán de determinarse de la siguiente manera:

- a) Longitud.- La longitud del modelo de prueba deberá ser de acuerdo al rango de claros encontrados en la práctica. Para proponer la longitud de los modelos que serán empleados en las pruebas de corte por adherencia se deberá considerar la tabla 2.2 que a continuación se muestra.

Región	Peralte, h	Claro de corte, l_c
A	Peralte mínimo ≥ 3.5 in (90 mm)	> 36 in. (900 mm), pero $P_u/f'c / 2 < 0.9 M_n$, determinado de la sección 2.5.3 con $\phi = 1.0$.
B	Peralte máximo encontrado en la práctica	≥ 18 in. (450 mm) y $<$ que ancho de la sección transversal.

Tabla 2.2.- Valores límites de peraltes y claros de corte [1].

- b) Ancho.- El ancho b_d de los modelos de prueba deberán ser al menos igual al ancho de una lámina de acero, pero no menor que 2 ft. (600mm).
- c) Peralte.- El peralte de la losa deberá caer dentro de los encontrados comúnmente en la práctica.

Procedimiento para pruebas.- Los parámetros a registrar de los modelos de prueba dependerán del objetivo de la investigación. En general los parámetros que se deben determinar de las pruebas experimentales son:

- a) *Capacidad de carga máxima.*
- b) *Modo de falla y detalles de la misma.*

Modelo de cargas en especímenes de prueba.- El modelo de carga para el sistema estructural compuesta, se muestra en la figura 2.5, donde se indica el modo de aplicación de la carga, algunos parámetros importantes del espécimen y detalles de la prueba que debemos tener en cuenta. Alternativamente, si el modelo de carga es uniformemente distribuida en lugar de cargas concentradas, ℓ_i deberá ser tomada como la distancia desde el apoyo hasta donde se observe la grieta más grande del elemento estructural.

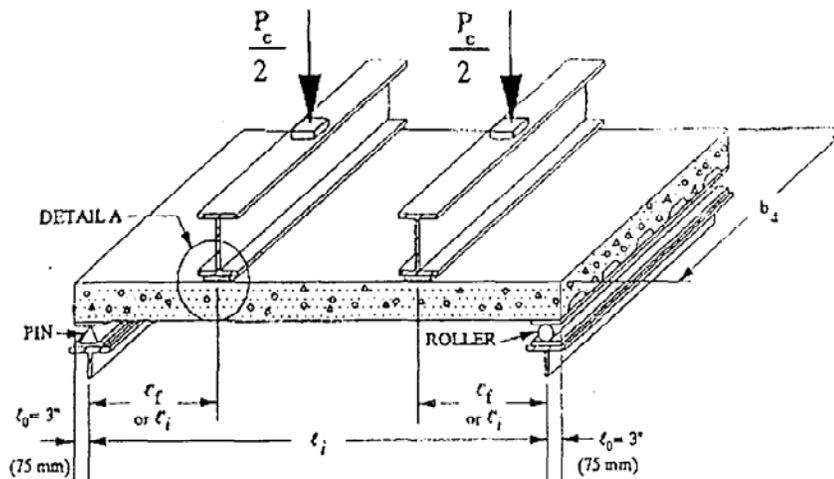


Figura 2.5. Modelo de cargas típico para sistemas compuestos [1]

La aplicación de las cargas deberá ser gradual en incrementos no mayores al 10 % de la carga de falla estimada. Adicionalmente, deberá aplicarse de manera continua cuidando no provocar efectos dinámicos, excepto por las pausas obligadas para tomar las lecturas correspondientes a los esfuerzos, deformaciones e incrementos de carga que ocurran en la losa compuesta. La velocidad de la carga, no deberá exceder un esfuerzo de 150 psi/min. (1 MPa/min.) en la fibra extrema en compresión de concreto.

Instrumentación.- El equipo necesario para la medición de los incrementos de carga deberá ser calibrado dentro de $\pm 1\%$. Las deflexiones en el centro del claro y el deslizamiento entre la lámina de acero y el concreto deberán registrarse al 0.001 in. (0.01 mm) más cercano en cada incremento de carga.

Registro de datos de los especímenes.- Los siguientes datos deberán ser registrados y documentados para cada espécimen de prueba:

a) Propiedades de la sección.

b_d = Ancho de la losa compuesta en (ft.).

h = Peralte total de la losa en (in.) medido en el centro, en los puntos de carga y en los extremos de la losa. Las medidas deberán ser tomadas en un acostillado interior y en los extremos del espécimen.

d_d = Peralte total del perfil de acero en (in.).

l_f = Longitud del claro o longitud apuntalado en (ft.).

l'_c = Longitud del claro sujeto a corte en (in.).

s = Espaciamiento en (in.) entre dispositivos de transferencia de corte medido de centro a centro.

t = Espesor del perfil de acero en (in.) sin considerar el recubrimiento determinado en especímenes usados para obtener propiedades del material.

h_t = Peralte de la losa en (in.) donde ocurra la grieta de falla.

l'_o = Porción de losa que sale del apoyo medida en (in.) y queda el voladizo.

b) Propiedades de los dispositivos de transferencia de corte.

B_b = Ancho en (in.) de un canal.

d_d = Peralte total del perfil de acero en (in.).

- D_w = Longitud del alma en (in.) que conforma el canal.
- N_b = Longitud del estampado en (in.) a lo largo de su base.
- N_t = Longitud del estampado en (in.) a lo largo de la parte superior de su borde.
- n_1 = Dimensión en (in.) a lo largo de cada segmento recto del estampado curvo.
- p_h = Profundidad del estampado en (in.).
- q = Distancia horizontal en (in.) medida de centro a centro de cada estampado.
- s = Espaciamiento entre cada estampado en (in.).
- w = Ancho del estampado en (in.).
- W_b = Ancho del estampado (in.) medido en la base.
- W_t = Ancho del estampado (in.) medido en la parte superior.

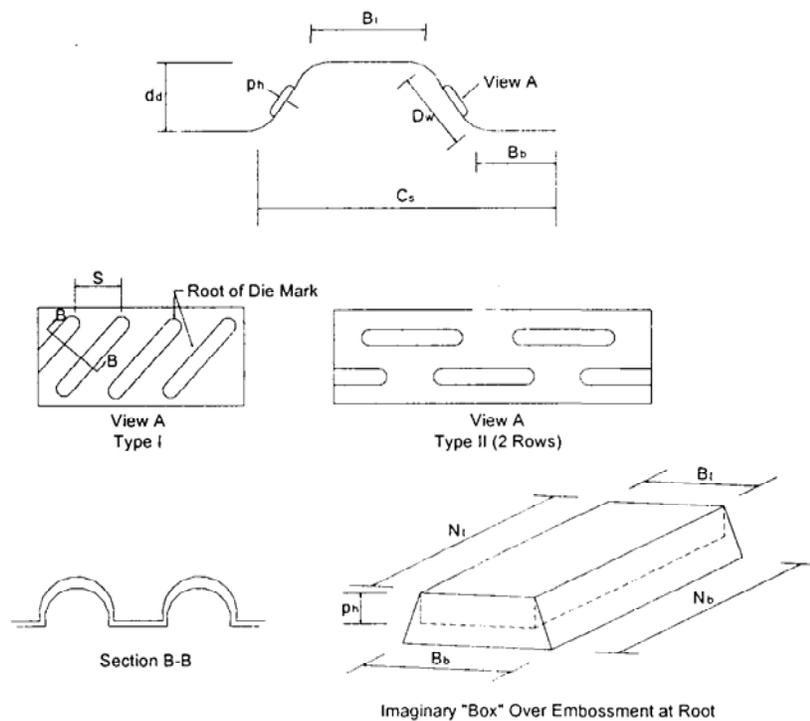


Figura 2.6. Características de los dispositivos de transferencia de corte [1].

c) Propiedades de los materiales

f'_{ct} = Resistencia a la compresión en (psi) del cilindro de concreto en el tiempo de prueba de la losa de acuerdo con ASTM 39.

f_{yt} = Resistencia a la fluencia del acero en (psi), de acuerdo con ASTM A370.

f_{ut} = Resistencia a la tensión del acero en (psi), de acuerdo con ASTM A370.

d) Cargas aplicadas

W_{dd} = Carga muerta debido a lámina de acero en psf.

W_{dc} = Carga muerta debido al concreto en (psf) incluyendo el peso adicional del concreto colocado durante la deflexión de la lámina.

e) Condiciones de construcción

1.- Registro del recubrimiento empleado en la lámina de acuerdo con la norma ASTM.

2.- Tipo de apuntalamiento.

3.- Diseño de la mezcla de concreto de acuerdo con la norma ACI-211.1

4.- Tipo y localización del acero soldado en el perfil laminar.

5.- Densidad del cilindro de concreto seco, en el tiempo de la prueba.

f) Datos de la prueba

Se recomienda realizar una breve descripción de los eventos significantes durante la prueba experimental, incluyendo los datos de prueba y registrando el modo de falla y detalles de la misma

Adicionalmente, se deberá registrar:

1) La carga P_e , denominada carga de falla del elemento losa.

2) Los parámetros carga-deflexión en el centro del claro para cada incremento de carga.

- 3) La carga y deslizamiento en los extremos del elemento.
- 4) La carga para la cual se observa la primera grieta.

2.5.5.1 Alcance de las pruebas experimentales

Típicamente las pruebas de *corte por adherencia* y pruebas a *flexión* son aplicadas a elementos estructurales a base de lámina y concreto. A continuación se explican algunos requerimientos que se debe cumplir al realizar este tipo de pruebas.

Pruebas de Corte por Adherencia.- Para encontrar los valores m y k necesarios para calcular resistencia de la losa al corte, se deberá seguir el siguiente proceso:

- a) El número de losas deberá ser adecuado para cubrir el rango de variables involucradas y proporcionar los datos suficientes para diseñar de acuerdo a este criterio.
- b) Deberán hacerse pruebas de al menos 2 especímenes en cada una de las regiones A y B las cuales fueron definidas en la Tabla 2.2 y se muestran en la figura 2.7. La región A define especímenes con peraltes pequeños, h , y/o relativamente claros de corte largos, l' , mientras que la región B define especímenes con peraltes grandes y/o relativamente claros de corte cortos.
- c) Cuando en las pruebas en cualquiera de las 2 regiones de la Tabla 2.2 consista de solo 2 especímenes de losa, entonces se recomienda ver la sección 3.4.1(2) de este capítulo.
- d) Para losas en las cuales el espaciamiento "s", de los dispositivos de transferencia de corte varían de una sección a otra, se deberá realizar una serie de pruebas en la determinación de los valores de m y k para cada espaciamiento.

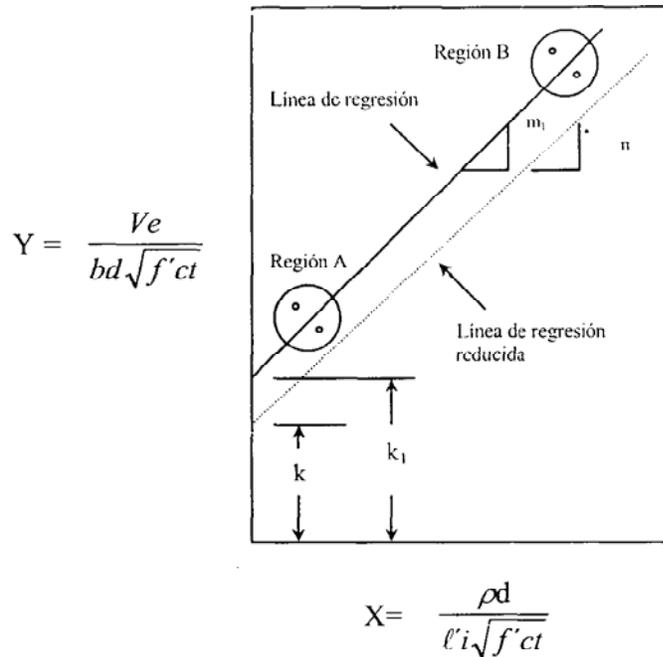


Figura 2.7. Gráfica típica para pruebas de corte por adherencia [1].

- e) No se requieren pruebas para todas las resistencias de concretos. Para casos donde la resistencia del concreto sea menor que la obtenida de pruebas anteriores, la resistencia debido al corte por adherencia deberá ser calculada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\frac{Ve_1}{Ve_2} = \left(\frac{f'c_1}{f'c_2} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{3.1}$$

Para casos donde la resistencia del concreto empleado es mayor que la obtenida de pruebas anteriores, la resistencia debido al corte por adherencia deberá ser obtenida empleando las expresiones del capítulo anterior, siempre que este no exceda los 1500 psi (10 MPa). La resistencia del concreto para estos especímenes probados no deberá ser menor que 2500 psi (17 Mpa).

Pruebas a Flexión.- Para láminas con peraltes mayores a 3 in (75 mm) o láminas de acero de ductilidad baja teniendo una relación f_u/f_y menor que 1.08 y una

elongación total menor que el 10 % para 2 in (50 mm) o menor que el 7 % para 8 in (200mm) de acuerdo con ASTM A370, se deberán realizar mínimamente 3 pruebas para establecer del momento de diseño para la losa en cuestión. Para casos donde la ecuación 2.13 no sea aplicable, se deberá realizar al menos tres pruebas representativas. Los especímenes de prueba deberán abarcar las cantidades mínimas y máximas de refuerzo usadas en la práctica actualmente.

2.5.5.2 Evaluación de los resultados de las pruebas

Típicamente, los estados límites que se consideran son uno debido a la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto, o cuando los esfuerzos por flexión exceden los límites de capacidad de los materiales de la losa compuesta.

Corte por adherencia.- La evaluación de los resultados correspondientes a este estado límite, se puede realizar empleando el siguiente procedimiento recomendado por el ASCE en su publicación "Standard for the Structural Design of Composite Slabs":

- 1) Para cada calibre diferente de lámina de acero, se deberá desarrollar una gráfica $\frac{V_e}{bd\sqrt{f'_{ct}}}$ vs. $\frac{\rho d}{\ell_i\sqrt{f'_{ct}}}$ como se muestra en la figura 2.7.

Usando los datos de prueba requeridos en las expresiones, se dibuja una línea recta llamada línea de corte por adherencia, calculándose la pendiente m_1 de la gráfica y el intercepto k_1 de la línea. El parámetro d queda definido como el peralte de la losa correspondiente a la grieta de falla, h_f .

- 2) Cuando se realicen dos pruebas en cada una de las regiones A ó B de la figura 2.7 definidas por la Tabla 2.2 y el valor de $\frac{V_e}{bd\sqrt{f'_{ct}}}$ para cualesquiera de las 2 pruebas varíe en más de $\pm 15 \%$, se deberán ejecutar al menos 2 pruebas adicionales del mismo tipo, utilizando los

datos que resultaran de menor magnitud para establecer la recta de corte por adherencia.

- 3) Los valores m_1 y k_1 obtenidos de figura 2.7 deberán ser reducidos en un 15 %, tal y como es indicado en la línea de regresión de la figura 2.7 para obtener los valores de m y k respectivamente y con ello poder calcular la capacidad de carga debido al corte por adherencia. Si el resultado de ocho o un mayor número de pruebas son empleados en el análisis; los valores de m_1 y k_1 deberán ser reducidos en un 10 % para obtener los valores de m y k .
- 4) Cuando se grafican los resultados de más de dos valores de $\frac{\rho d}{l' i \sqrt{f' c t}}$,

es necesario hacer un análisis de regresión lineal para determinar la línea de corte por adherencia.

Flexión.- La evaluación de los resultados de prueba de los modos de falla debido a la flexión deberán ser basados en una comparación entre las resistencias experimentales y las calculadas por las expresiones de la sección 2.5.3. Para los casos en donde la ecuación 2.13 no es aplicable, se deberá realizar una análisis general de esfuerzos y deformaciones para este tipo de especímenes. Si en la prueba experimental, el momento resistente es menor que el 95 % del momento resistente calculado de acuerdo con la sección 2.5.3, al menos 3 pruebas adicionales deberán ser desarrolladas. Para propósitos de comparación, ϕ deberá ser tomada igual a 1.0. El modo de falla a flexión deberá ser verificado por inspecciones de las muestras ensayadas, deslizamientos, deflexiones y datos de deformaciones.

2.6 Especificaciones SDI para Sistemas Compuestos

Por otro lado, en el año de 1975 después de varios años de investigación y de un gran número de pruebas experimentales, los miembros del SDI elaboraron un manual de diseño que incluyera sistemas de entrepiso compuestos, el cual lleva por nombre *“Steel Deck Institute Design Manual for Composite Decks, Form Decks and Roof Decks”*.

A continuación, se abordará la parte correspondiente al diseño de sistemas de entrepiso compuestos según las especificaciones del “Instituto de Láminas de Acero (SDI)”.

2.6.1 Comportamiento del Sistema Compuesto a base de lámina y concreto

En esta etapa, el concreto ya endurecido y entrelazado a la lámina de acero forman el sistema compuesto, el cual debe de resistir las cargas gravitacionales y accidentales que incidan sobre la estructura.

El diseño del sistema estructural compuesto, deberá hacerse como el de una losa de concreto reforzado convencional, en donde la lámina de acero de la losa actúa como refuerzo positivo. Las losas compuestas, deberán ser diseñadas como simplemente apoyadas o continuas bajo cargas uniformemente distribuídas. En el caso de las losas continuas se deberá añadir acero de refuerzo en la zona de momentos negativos.

Para determinar las características carga-deflexión y el modo de falla del sistema estructural compuesto bajo cargas uniformes o cargas puntuales simétricas, el fabricante de láminas deberá realizar un número suficiente de pruebas experimentales. Basados en la información de las pruebas, la carga de diseño del sistema compuesto deberá ser establecida por:

1. Un análisis elástico de flexión ó,
2. Un análisis de resistencia última basado en una falla por cortante o por flexión.

En el diseño de la losa compuesta, existen casos en los que el sistema estructural requiera de apuntalamiento, por ello se analizarán ambos casos para establecer los esfuerzos de trabajo de diseño por flexión elástica.

2.6.1.1 Análisis de Esfuerzos de Trabajo en el Acero de Refuerzo

Flexión Elástica (Sistema no apuntalado).- El esfuerzo de tensión en la lámina, bajo la acción de las cargas vivas, no deberá exceder el 60% de la resistencia a la fluencia del acero empleado.

En el caso de cargas combinadas (cargas vivas, peso del concreto y peso de la lámina), el esfuerzo de tensión en la lámina no deberá exceder el 80% de la resistencia a la fluencia del acero utilizado.

Flexión Elástica (Sistema apuntalado).- Los esfuerzos de tensión en la lámina de acero, bajo la acción de la carga total, no deberán exceder el 60% de la resistencia a la fluencia del acero empleado, con un máximo de 36,000 psi (2533 kg/cm²).

2.6.1.2 Análisis de Resistencia Última

Mediante el empleo de técnicas de análisis (en el cálculo de los esfuerzos de trabajo o resistencia última), el fabricante puede determinar la capacidad de carga vivas del sistema compuesto. El factor de seguridad mínimo basado en una falla por flexión o cortante será de 2.

Las propiedades de la sección transversal de la lámina de acero se deberán calcular de acuerdo a lo establecido por el AISI en la sección 3.1. Cuando la lámina de acero es utilizada como acero de refuerzo negativo, el AISI estipula hacer una reducción en ancho del patín de compresión de la lámina a un ancho efectivo.

2.6.1.3 Análisis de Esfuerzos de Trabajo en el Concreto

Sistema no apuntalado.- Bajo la acción de las cargas vivas, el esfuerzo a compresión en el concreto deberá ser menor del 45% de la resistencia a compresión del concreto ($f'c$) a los 28 días.

Sistema apuntalado.- Bajo la acción de las cargas combinadas (muertas y vivas), el esfuerzo a compresión en el concreto no deberá exceder el 45% de la resistencia a compresión del concreto ($f'c$) a los 28 días.

Características del Concreto.- Deberá cumplir lo estipulado en las secciones correspondientes a los capítulos 3, 4 y 5 del Reglamento ACI 318 para concreto reforzado. Además la resistencia mínima a la compresión $f'c$ deberá ser 3 ksi (210 kg/cm^2). Mezclas que contengan cloruros no deberán ser usadas.

2.6.2 Otros requerimientos importantes

Esfuerzos Cortantes Permisibles.- Se deberán establecerse de acuerdo a las especificaciones ACI 318-95.

Cubierta Mínima de Concreto.- El espesor de concreto por encima de la lámina de acero deberá ser al menos de 2 pulgadas. Como se muestra en la Figura 2.8.



Figura 2.8.- Cubierta mínima de concreto sobre la cresta

Cuando la losa requiera refuerzo negativo, el espesor mínimo de concreto sobre la cuantía de acero será de $\frac{3}{4}$ ". La Figura 2.9 muestra el detalle.

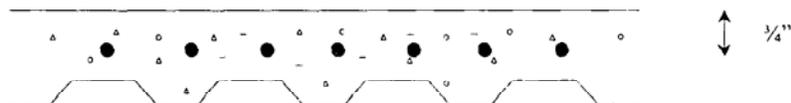


Figura 2.9.- Cubierta mínima de concreto sobre refuerzo negativo

Deflexiones.- Bajo la acción de las cargas impuestas, la deflexión en la losa compuesta no deberá exceder a $L / 360$. Como se muestra en la Figura 2.10.

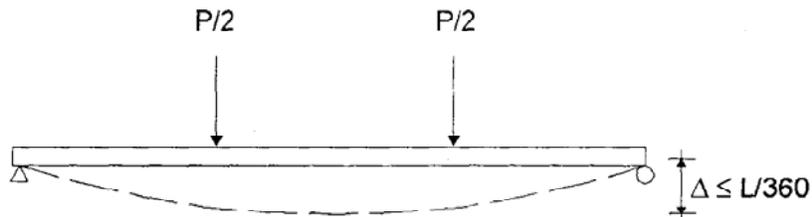


Figura 2.10.- Deflexión permisible para el sistema compuesto

El cálculo de la deflexión de la losa compuesta se aproxima mejor usando un porcentaje de la inercia de las secciones agrietadas y no agrietada determinadas por el análisis de la sección transformada.

Refuerzo por Contracción y Temperatura.- El área mínima por contracción y temperatura consiste de una malla electrosoldada, la cual deberá tener como mínimo un área de 0.00075 veces el área de concreto por encima de la losa por metro de ancho, pero no será menor que la proporcionada por una malla electrosoldada de 6 x 6 -10/10 (6 x 6 - W 1.4 x W 1.4).

3. Desarrollo Experimental

3.1 Introducción

El desarrollo de pruebas experimentales es un punto importante dentro del proceso de investigación, ya que a partir de ellas se podrá corroborar o refutar las hipótesis planteadas al inicio de la investigación. Adicionalmente, mediante un análisis detallado de los resultados obtenidos se tendrá la habilidad de establecer las conclusiones y recomendaciones correspondientes al proyecto de investigación.

Técnicamente, el desarrollo de pruebas experimentales es necesario, debido a que cada perfil de acero ensayado posee características únicas en cuanto a capacidad de transferencia de corte, distribución de las fuerzas cortantes horizontales y distribución de esfuerzos inducidos por flexión. Por lo tanto, la resistencia del sistema debido al corte por adherencia depende ampliamente del tipo de dispositivo de transferencia de corte empleado [12].

Basados en la publicación del ASCE "*Standard for the Structural Design of Composite Slabs*", la propuesta de las pruebas experimentales proporciona datos necesarios para las relaciones de resistencias últimas contenidas en la sección 2.3.1.5. del manual. En particular se desarrolla una serie de pruebas para proporcionar valores de cortantes experimentales para hacer un análisis lineal en la determinación de las constantes " m " y " k " de las ecuaciones (2-8) y (2-9) de la sección 2.3.1.5.1 del mismo.

Las pruebas experimentales son necesarias para verificar, si es posible, el modo de falla a flexión y las características del comportamiento del sistema antes de la falla. Mediante el empleo de las ecuaciones del capítulo segundo, aunado a la información obtenida de las pruebas experimentales, se puede obtener una tabulación con las cargas permisibles que pueden ser impuestas a un sistema de entrepiso compuesto con diferentes claros, peraltes, espesores de acero, estampados, calibres de láminas, resistencias de concretos y tipos de concretos. En este capítulo se presenta el proceso a seguir en la evaluación experimental, mientras que la discusión de los resultados se presenta en el capítulo 5.

3.2 Características de los modelos de prueba.

El modelo de prueba que será ensayado, así como la localización de las cargas son tales que fallas por adherencia se logran para claros pequeños y fallas por flexión ocurran para claros largos. Debemos cuidar durante la fabricación de los especímenes de prueba, los esfuerzos resultantes y las deflexiones no deberán exceder los valores indicados en las secciones 2.2.4 y 2.2.6 del manual del ASCE. El concreto empleado en los especímenes de las losas compuestas, deberá ser preparado y curado de acuerdo con los requerimientos que marca el capítulo 5 del ACI 318-95.

3.2.1 Dimensiones de los modelos de prueba.

Las dimensiones de los especímenes de prueba en general, deberán determinarse de la siguiente manera:

- a) **Longitud.**- La longitud del modelo de prueba deberá ser de acuerdo al rango de claros encontrados en la práctica. Para proponer la longitud de los modelos que serán empleados en las pruebas de corte por adherencia se deberá considerar la tabla 3.1 que a continuación se muestra.

Región	Peralte, h	Claro de corte, l_c
A	Peralte mínimo ≥ 3.5 in (90 mm)	> 36 in. (900 mm), pero $P_e l_c / 2 < 0.9 M_n$, determinado de la sección 2.5.3 con $\phi = 1.0$.
B	Peralte máximo encontrado en la práctica	≥ 18 in. (450 mm) y $<$ que ancho de la sección transversal.

Tabla 3.1.- Valores límites de peraltes y claros de corte.

- b) **Ancho.**- El ancho b_d de todos los modelos de prueba deberán ser al menos igual al ancho de una lámina de acero, pero no menor que 2 ft. (600mm).

c) **Peralte.**- El peralte de la losa deberá caer dentro de los encontrados comúnmente en la práctica.

Basados en la información anteriormente descrita, las características de los modelos de prueba que serán empleados en las pruebas de adherencia por corte son las siguientes:

- La longitud para los especímenes de la región A, deberá ser 300 cm teniendo un claro de corte de 100 cm, cumpliendo así con los requerimientos de la tabla 3.1.
- El peralte total para los especímenes de la región A, deberá ser 12.3 cm, cumpliendo así con los requerimientos de la tabla 3.1.
- La longitud para los especímenes de la región B, deberá ser 200 teniendo un claro de corte de 66.67 cm, cumpliendo así con los requerimientos de la tabla 3.1.
- El peralte total para los especímenes de la región B, deberá ser 16.3 cm, cumpliendo así con los requerimientos de la tabla 3.1.

Para cada una de las regiones se deberán realizar dos especímenes de prueba para los calibres 18, 20, 22 y 24, para un total de 16 losas compuestas, las cuales se emplearán en la obtención de los coeficientes de diseño “*m*” y “*k*” que aparecen en la ecuación 2.8 de capítulo 2.

3.2.2 Procedimiento para pruebas.

Los parámetros a registrar de los modelos de prueba dependerán del objetivo de la investigación. En general los parámetros que se deben determinar de las pruebas experimentales son:

- a) *Capacidad de carga máxima.*
- b) *Modo de falla y detalles de la misma.*

3.2.2.1- Modelo de cargas en especímenes de prueba

El modelo de carga para el elemento estructural compuesto, se muestra en la figura 3.1, donde se observa un sistema de cargas simétrica lineal concentradas a los tercios de la longitud del espécimen. Adicionalmente se especifican algunos

parámetros importantes del espécimen y detalles de la prueba que debemos tener en cuenta. Alternativamente, si el modelo de cargas es uniformemente distribuidas en lugar de cargas concentradas, l_c deberá ser tomada como la distancia desde el apoyo hasta donde se observe la grieta más grande del elemento estructural.

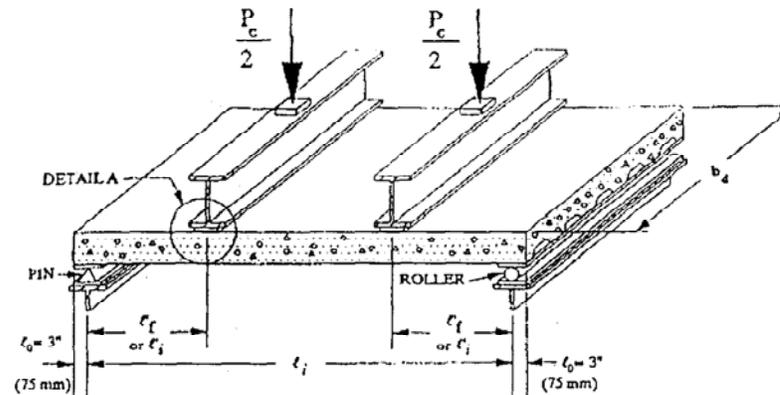


Figura 3.1. Modelo de cargas típico [1]

La aplicación de las cargas deberá ser gradual en incrementos no mayores al 10 % de la carga de falla estimada. Adicionalmente, deberá aplicarse de manera continua cuidando no provocar efectos dinámicos, excepto por las pausas obligadas para tomar las lecturas correspondientes a los esfuerzos, deformaciones e incrementos de carga que ocurran en la losa compuesta.

El desarrollo de las pruebas de laboratorio se llevará a cabo en el Laboratorio de Estructuras del ITESM, el cual cuenta con un marco de carga de aproximadamente 5m. de claro, formado básicamente por perfiles de acero IR, al cual se le colocarán unos apoyos que sirvan de base para la losa lámina y concretos de anhidrita.

A continuación se muestra una foto del marco de carga donde se probarán cada uno de los especímenes.

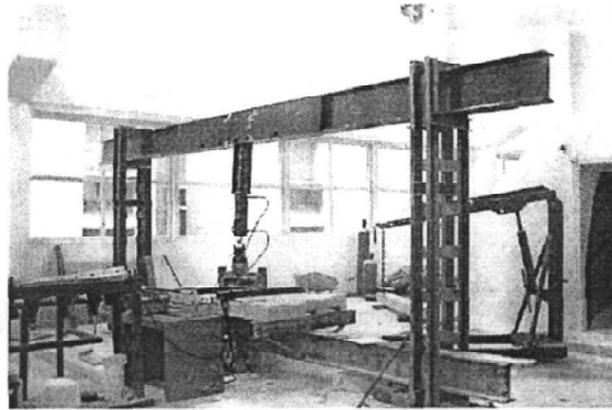


Foto 1.- Marco de carga a base de perfiles de acero

3.2.2.2 Instrumentación

El equipo necesario para la medición de los incrementos de carga deberá ser calibrado dentro de $\pm 1\%$. Las deflexiones en el centro del claro y el deslizamiento entre la lámina de acero y el concreto deberán registrarse al 0.001 in. (0.01 mm) más cercano en cada incremento de carga.

La instrumentación que se empleará en los elementos de prueba es a base de micrómetros con vástagos de 1 pulg. de largo colocados en el centro del claro en ambos extremos de la losa con la intención de tener una mayor precisión en la predicción del desplazamiento de la losa compuesta.

3.2.2.3 Registro de datos

Los siguientes datos deberán ser registrados y documentados para cada espécimen de prueba:

a) Propiedades de la sección.

b_d = Ancho de la losa compuesta en (ft.).

h = Peralte total de la losa en (in.) medido en el centro, en los puntos de carga y en los extremos de la losa. Las medidas deberán ser tomadas en un acostillado interior y en los extremos del espécimen.

d_d = Peralte total del perfil de acero en (in.).

l_f = Longitud del claro o longitud apuntalado en (ft.).

l'_c = Longitud del claro sujeto a corte en (in.).

- s = Espaciamiento en (in.) entre los dispositivos de transferencia de corte medido de centro a centro.
- t = Espesor del perfil de acero en (in.) sin considerar el recubrimiento determinado en especímenes usados para obtener propiedades del material.
- h_t = Peralte de la losa en (in.) donde ocurra la grieta de falla.
- l'_o = Porción de losa que sale del apoyo medida en (in.) y queda el voladizo.

b) Propiedades de los materiales

- f'_{ct} = Resistencia a la compresión en (psi) del cilindro de concreto en el tiempo de prueba de la losa de acuerdo con ASTM 39.
- f_{yt} = Resistencia a la fluencia del acero en (psi), de acuerdo con ASTM A370.
- f_{ut} = Resistencia a la tensión del acero en (psi), de acuerdo con ASTM A370.

c) Cargas aplicadas

- W_{dd} = Carga muerta debido a lámina de acero en psf.
- W_{dc} = Carga muerta debido al concreto en (psf) incluyendo el peso adicional del concreto colocado durante la deflexión de la lámina.

d) Condiciones de construcción

- 1.- Registro del recubrimiento empleado en la lámina de acuerdo con la norma ASTM.
- 2.- Tipo de apuntalamiento.
- 3.- Diseño de la mezcla de concreto de acuerdo con la norma ACI-211.1
- 4.- Densidad del cilindro de concreto seco, en el tiempo de la prueba.

e) Datos de la prueba

Se recomienda realizar una breve descripción de los eventos significantes durante la prueba experimental, incluyendo los datos de prueba y registrando el modo de falla y detalles de la misma. Adicionalmente, se deberá registrar:

- 1) La carga P_e , denominada carga de falla del elemento losa.

- 2) Los parámetros carga-deflexión en el centro del claro para cada incremento de carga.
- 3) La carga y deslizamiento en los extremos del elemento.
- 4) La carga para la cual se observa la primera grieta.

3.3 Alcance de las pruebas experimentales

Típicamente las pruebas de *corte por adherencia* y pruebas a *flexión* son aplicadas a elementos estructurales a base de lámina y concreto. A continuación se explican algunos requerimientos que se debe cumplir al realizar este tipo de pruebas.

3.3.1 Pruebas de Corte por Adherencia

Para encontrar los valores " m " y " k " necesarios para calcular resistencia de la losa al corte, se deberá seguir el siguiente proceso:

- a) El número de losas deberá ser adecuado para cubrir el rango de variables involucradas y proporcionar los datos suficientes para diseñar de acuerdo a este criterio.
- b) Deberán hacerse pruebas de al menos 2 especímenes en cada una de las regiones A y B las cuales son fueron definidas en la Tabla 3.1. La región A define especímenes con peraltes pequeños, h , y/o relativamente claros de corte largos, ℓ , mientras que la región B define especímenes con peraltes grandes y/o relativamente claros de corte cortos.
- c) Cuando en las pruebas en cualquiera de las 2 regiones de la Tabla 3.1 consista de solo 2 especímenes de losa, entonces se recomienda ver la sección 3.4.1(2) de este capítulo.
- d) Para losas en las cuales el espaciamiento " s ", de los dispositivos de transferencia de corte varían de una sección a otra, se deberá realizar una serie de pruebas en la determinación de los valores de " m " y " k " para cada espaciamiento.
- e) No se requieren pruebas para todas las resistencias de concretos. Para casos donde la resistencia del concreto sea menor que la obtenida de

pruebas anteriores, la resistencia debido al corte por adherencia deberá ser calculada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\frac{V_{e1}}{V_{e2}} = \left(\frac{f'_{c1}}{f'_{c2}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.1)$$

Para casos donde la resistencia del concreto empleado es mayor que la obtenida de pruebas anteriores, la resistencia debido al corte por adherencia deberá ser obtenida empleando las expresiones del capítulo anterior, siempre que este no exceda los 1500 psi (10 MPa). La resistencia del concreto para estos especímenes probados no deberá ser menor que 2500 psi (17 Mpa).

3.3.2 Pruebas a Flexión.

Para láminas con peraltes mayores a 3 in (75 mm) o láminas de acero de ductilidad baja teniendo una relación f_u/f_y menor que 1.08 y una elongación total menor que el 10 % para 2 in (50 mm) o menor que el 7 % para 8 in (200mm) de acuerdo con ASTM A370, un mínimo de tres pruebas representativas deberán realizarse para establecer la aplicabilidad del momento de diseño para la losa en cuestión. Para casos donde la ecuación 2.13 no sea aplicable, un mínimo de tres pruebas representativas deberán ser ejecutadas. Los especímenes de prueba deberán abarcar las cantidades mínimas y máximas de refuerzo usadas en la práctica actualmente.

Cuando sean requeridas pruebas por flexión, la evaluación de los resultados de prueba del modo de falla a flexión deberán ser basados en una comparación entre las resistencias calculados con la teoría y los obtenidos experimentalmente. Para los casos donde no sea aplicable la ec. 2.13 deberá emplearse una análisis general de esfuerzos y deformaciones. Si el momento resistente es menor que el 95 % que el momento calculado de acuerdo con la sección 2.5.3, al menos tres pruebas adicionales deberán ser ejecutadas para poder establecer la resistencia del elemento estructural. Para propósitos de comparación, ϕ deberá ser tomada igual a 1.0. El modo de falla en flexión deberá ser verificado por inspecciones hechas a la muestra y deslizamiento en los extremos, deflexiones, etc.

3.4 Evaluación de los resultados de las pruebas

La evaluación de los resultados de las pruebas desarrolladas, es necesario para establecer expresiones de diseño para los diferentes estados límites de falla presentados en los especímenes de prueba durante los ensayos de laboratorio. Típicamente, los estados límites que se analizan son cuando la falla es producida por la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto o cuando los esfuerzos por flexión exceden los límites de capacidad de los materiales de la losa compuesta.

3.4.1 Corte por adherencia

La evaluación de los resultados correspondientes a este estado límite, se puede realizar empleando el siguiente procedimiento recomendado por el ASCE en su publicación "Standard for the Structural Design of Composite Slabs":

- 1) Para cada calibre diferente de lámina de acero, se deberá desarrollar una gráfica $\frac{V_e}{bd\sqrt{f'_{ct}}}$ vs. $\frac{\rho d}{l_i\sqrt{f'_{ct}}}$ como se muestra en la Figura 3.3.

Usando los datos de prueba requeridos en las expresiones, se dibuja una línea recta llamada línea de corte por adherencia, calculándose la pendiente m_1 de la gráfica y el intercepto k_1 de la línea. El parámetro d , queda definido según el peralte de la losa h_t , correspondiente a la grieta de falla.

- 2) Cuando se realicen dos pruebas en cada una de las regiones A ó B de la figura 3.3 definidas por la Tabla 3.1 y el valor de $\frac{V_e}{bd\sqrt{f'_{ct}}}$ para cualesquiera de las 2 pruebas varíe en más de $\pm 15 \%$, se deberán ejecutar al menos 2 pruebas adicionales del mismo tipo, utilizando los datos que resultaran de menor magnitud para establecer la recta de corte por adherencia.
- 3) Los valores m_1 y k_1 obtenidos de figura 3.3 deberán ser reducidos en un 15 %, tal y como es indicado en la línea de regresión de la figura 3.3 para obtener los valores de m y k respectivamente y con ello poder

calcular la capacidad de carga debido al corte por adherencia. Si el resultado de ocho o un mayor número de pruebas son empleados en el análisis; los valores de m_1 y k_1 deberán ser reducidos en un 10 % para obtener los valores de m y k .

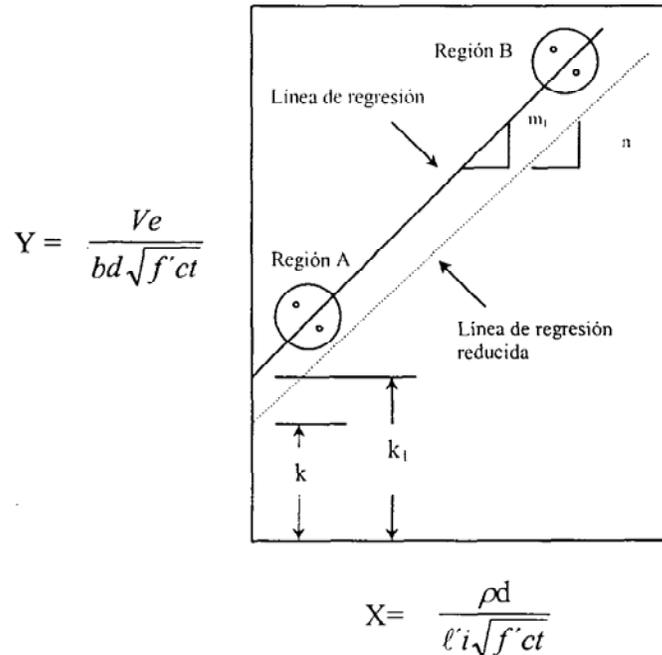


Figura 3.3. Gráfica típica para pruebas de corte por adherencia [1]

- 4) Cuando se grafican los resultados de más de dos valores de $\frac{\rho d}{l i \sqrt{f'ct}}$, es necesario hacer un análisis de regresión lineal para determinar la línea de corte por adherencia.

3.4.2 Flexión

La evaluación de los resultados de prueba de los modos de falla debido a la flexión deberá ser basada en una comparación entre las resistencias experimentales y las calculadas por las expresiones del capítulo 2. Para los casos en donde la ecuación 2.13 no es aplicable, se deberá realizar un análisis general de esfuerzos y deformaciones para este tipo de especímenes. Si en la prueba

experimental, el momento resistente es menor que el 95 % del momento resistente calculado de acuerdo con la sección 2.5.3, al menos 3 pruebas adicionales deberán ser desarrolladas. Para propósitos de comparación, ϕ deberá ser tomada igual a 1.0. El modo de falla a flexión deberá ser verificado por inspecciones de las muestras ensayadas, deslizamientos, deflexiones y datos de deformaciones.

4. MODELO ANALÍTICO

4.1 Introducción

Con la finalidad de plantear un modelo que prediga el desplazamiento de un elemento compuesto en la falla, resulta necesario analizar las fuentes principales que contribuyan al desplazamiento en el centro del claro de un elemento compuesto.

4.2 Modelo Analítico para la predicción del desplazamiento límite.

Para una losa compuesta de lámina y concreto, las fuentes principales que contribuyen al desplazamiento límite son debido a los *esfuerzos producidos por la flexión, el cortante y la pérdida de adherencia entre la lámina de acero y concreto.*

La contribución por Flexión es posible evaluarla mediante un análisis inelástico de la sección compuesta tomando las rigideces de cada porción del elemento de la gráfica Momento-Curvatura la cual asume lo siguiente [25]:

1. Las secciones planas antes de la flexión permanecen planas después de la flexión.
2. Se conoce la curva esfuerzo-deformación para el acero y el concreto.
3. Se puede despreciar la resistencia a tensión del concreto.
4. El acero de refuerzo esta perfectamente unido al concreto, por lo que no existe corrimiento entre los materiales durante su deformación.

En nuestro caso, de acuerdo al modelo de cargas empleado en la etapa experimental de la Figura 4.1 y usando el Teorema de Castigliano, es posible obtener una expresión para evaluar el desplazamiento en el centro del claro de la losa compuesta. A continuación se muestra el desarrollo de esta expresión:

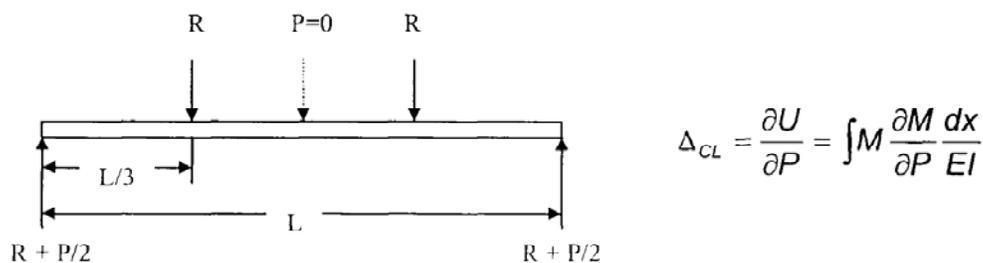
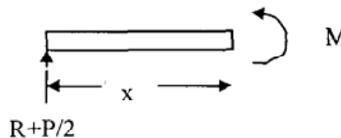


Figura 4.1.- Modelo de cargas experimental para losa de lámina y concreto

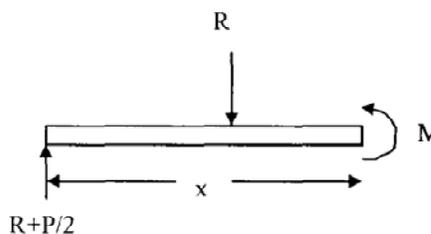
Para $0 < x < L/3$

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \int_0^{L/3} \frac{Rx^2}{2EI} dx$$



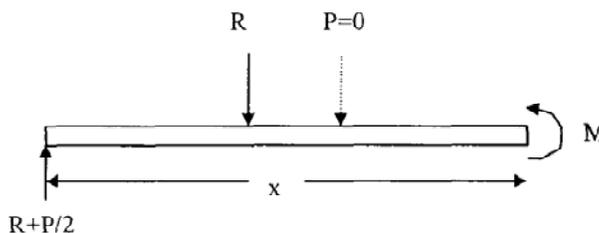
Para $L/3 < x < L/2$

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \int_{L/3}^{L/2} \frac{RLx}{6EI} dx$$



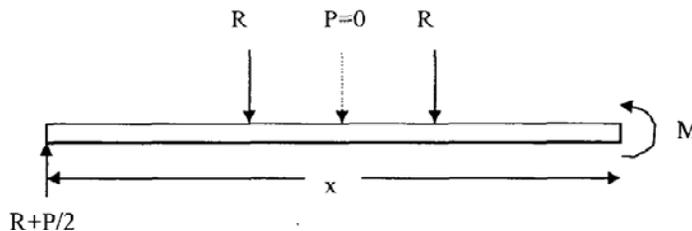
Para $L/2 < x < 2/3L$

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \int_{L/2}^{2/3L} \frac{RL}{6} (L-x) \frac{dx}{EI}$$



Para $2/3L < x < L$

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \int_{2/3L}^L \frac{R}{2} (L-x)^2 \frac{dx}{EI}$$



Sumando todas las secciones analizadas tenemos:

$$\Delta_{cl} = \int_0^{L/3} \frac{Rx^2}{2EI} dx + \int_{L/3}^{L/2} \frac{RLx}{6EI} dx + \int_{L/2}^{2/3L} \frac{RL}{6} (L-x) \frac{dx}{EI} + \int_{2/3L}^L \frac{R}{2} (L-x)^2 \frac{dx}{EI}$$

Expresada en sumatorias la expresión se convierte en:

$$\Delta_{CL} = \sum_0^{\frac{L}{3}} \frac{Rx_i^2}{2} \frac{\Delta x}{(EI)_i} + \sum_{\frac{L}{3}}^{\frac{L}{2}} \frac{RLx_i}{6} \frac{\Delta x}{(EI)_i} + \sum_{\frac{L}{2}}^{\frac{2L}{3}} \frac{RL}{6} (L - x_i) \frac{\Delta x}{(EI)_i} + \sum_{\frac{2L}{3}}^L \frac{R}{2} (L - x_i)^2 \frac{\Delta x}{(EI)_i}$$

La contribución de las fuerzas cortantes para el cálculo del desplazamiento en el centro del claro del elemento compuesto se omitirá en este caso, ya que se sabe de antemano que su contribución será muy pequeña.

Por otro lado, en la evaluación de la pérdida de adherencia debido al deslizamiento entre los materiales (lámina y concreto), la cual contribuye de manera importante al desplazamiento del elemento compuesto, deberán tomarse en cuenta parámetros como el deslizamiento entre los materiales al final de la prueba (δ_0), la longitud del claro (L) y la profundidad de la sección de acero (d). La manera de relacionarlos en una expresión, se presenta en un modelo basado en la referencia [22], el cual fue empleado en elementos compuestos de concreto y varilla.

Dado que no se tienen estudios precisos para lámina y acero, se empleará este modelo para evaluar la curvatura máxima debido a la pérdida de adherencia, la cual deberá adicionarse a la curvatura por flexión mediante un modelo que se presenta posteriormente, a partir del punto donde se termina el ajuste de la gráfica M- ϕ . Con esta nueva curvatura, se calcula el desplazamiento en el centro del claro debido a la carga de falla empleando la fórmula obtenida del análisis inelástico, de esta manera tomamos en cuenta la contribución de la pérdida de adherencia al desplazamiento en el centro del claro de la losa compuesta.

A continuación se presenta la deducción de la expresión de la curvatura máxima debido a este fenómeno y posteriormente se explica la forma de ajustar la gráfica M- ϕ .

Analizando la mitad del claro de la losa compuesta:

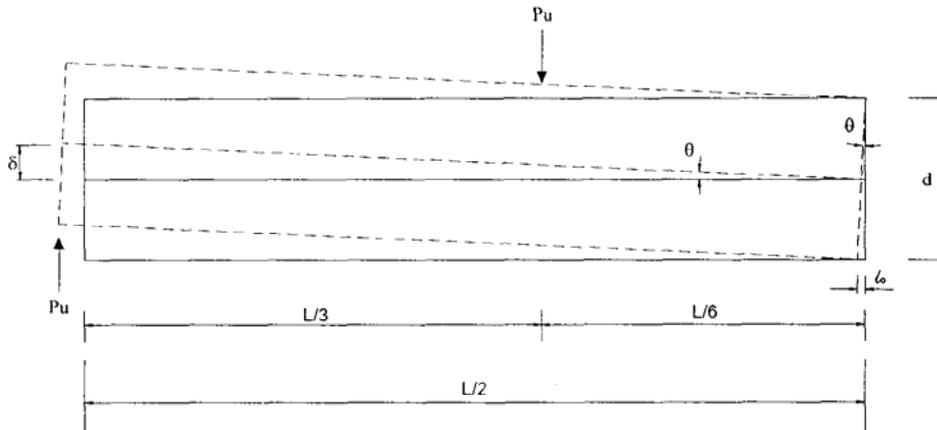


Figura 4.2. Modelo para obtener la curvatura por adherencia.

De la figura anterior, geoméricamente obtenemos:

$$d\theta = \ell_o \quad (1)$$

$$\frac{L}{2}\theta = \delta \quad (2)$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores el valor de δ es:

$$\delta = \frac{\ell_o L}{2d} \quad (3)$$

Para una viga en cantiliver sujeta al sistema de cargas mostradas, la deflexión en el extremo esta dada por:

$$\delta = \frac{P_u}{EI_{st}} \left(\frac{L}{3} \right) \left(\frac{L}{6} \right) \left[\frac{L}{3} + \frac{1}{2} \left(\frac{L}{6} \right) \right] + \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{L}{3} \right) \frac{P_u}{EI_{st}} \left(\frac{L}{3} \right) \left[\frac{2}{3} \left(\frac{L}{3} \right) \right]$$

$$\delta = \frac{5P_u L^3}{216EI_{st}} + \frac{P_u L^3}{81EI_{st}} = \frac{P_u L}{3} \frac{1}{EI_{st}} \left[\frac{23L^2}{216} \right] = \frac{M_{extremo}}{EI_{st}} \left[\frac{23L^2}{216} \right] \quad (4)$$

Por otro lado se sabe:

$$\frac{d_2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = \varphi \quad \therefore \text{de la ecuación (4)}$$

$$\delta = \varphi \left[\frac{23L^2}{216} \right] \quad (5)$$

Finalmente substituyendo la ecuación (5) en la ecuación (3), se obtiene la curvatura máxima $(\varphi_{sb})_{max}$ debido al fenómeno de pérdida de adherencia entre los materiales (lámina y concreto) del sistema compuesto:

$$(\varphi_{sb})_{max} = \frac{216\ell_o}{46dL} \quad (6)$$

Donde:

ℓ_o = Deslizamiento entre los materiales en la falla.

d = Profundidad del acero de refuerzo medida de la fibra extrema en compresión de la sección.

L = Longitud del claro de la losa compuesta.

4.3 Ajustes para la gráfica Momentos-Curvatura

Debido a que la gráfica $M-\varphi$, presenta una especie concavidad hacia arriba después del etapa de esfuerzos elásticos, y para ese tramo algunas de las pendientes son negativas, esto origina por tanto rigideces negativas, lo cual no es posible. Para ello, basados en la referencia [22] se deberá ajustar la gráfica $M-\varphi$ empleando cualesquiera de las dos rutas que se muestran a continuación:

La ruta 1, permite ajustar la gráfica $M-\varphi$ al trazar desde el pico de la Figura 4.3 una línea recta, la cual llega hasta el punto 2 definiendo así los valores de la rigidez para esa parte del gráfico.

La ruta 2, consiste en definir dos puntos que permiten hacer el ajuste lineal de la Figura 4.3, el primer punto de la gráfica, queda definido para un momento igual a la tercera parte del momento de agrietamiento de la losa compuesta calculado con la expresión:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

Donde:

f_r = Módulo de ruptura del concreto.

I_g = Momento de inercia grueso de la sección compuesta, transformando las áreas de acero a concreto. (Ver anexo A)

y_t = distancia del eje centroidal de la sección a su fibra extrema en tensión.

El segundo punto, se deberá obtener al prolongar la línea inicial de la gráfica 4.3 hasta el pico. Desde este punto trazamos una horizontal y donde corta la gráfica $M-\varphi$, ahí se encuentra el segundo punto. Finalmente, el ajuste consiste en trazar una línea recta desde el punto 1 hasta el 2 para obtener la gráfica $M-\varphi$ ajustada, la cual se empleará en el cálculo de las rigideces para el sistema compuesto. En nuestro caso emplearemos esta ruta para hacer el ajuste de la gráfica $M-\varphi$.

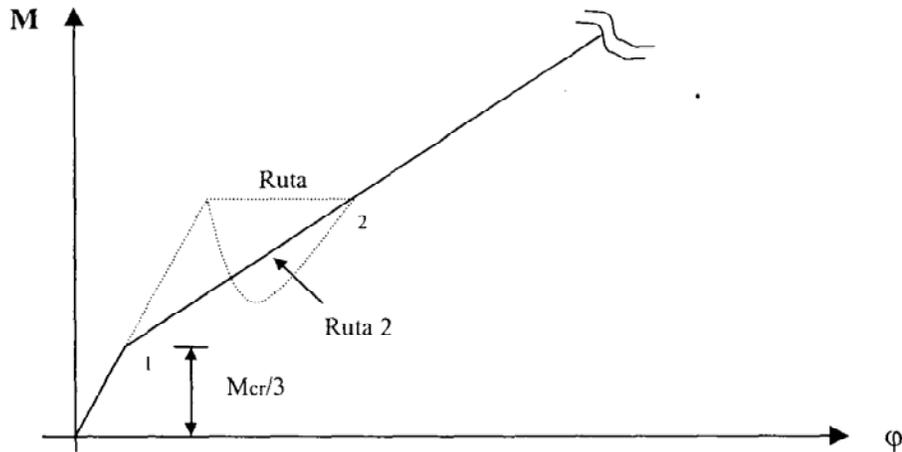


Figura 4.3. Rutas para ajustar las gráficas M-φ [22].

Por otro lado, debido a la pérdida de adherencia que se presenta en el elemento compuesto, resulta necesario adicionarle a la curvatura que tenemos por flexión una curvatura por pérdida de adherencia y así poder obtener la rigidez real del elemento a medida que los materiales pierden la acción compuesta.

La manera de introducir este término a la gráfica M-φ, es mediante la siguiente expresión que involucra los siguientes parámetros:

$$\varphi_{sb} = (\varphi_{sb})_{max} * \left(\frac{\varphi_x - \varphi_{cr}}{\varphi_u - \varphi_{cr}} \right)^\alpha \text{ para todo } \varphi_x > \varphi_{cr}; \text{ Si } \varphi_x \leq \varphi_{cr} \text{ entonces } \varphi_{sb} = 0$$

Donde:

- φ_{sb} = Curvatura por pérdida de adherencia entre los materiales.
- $(\varphi_{sb})_{max}$ = Curvatura máxima debido al fenómeno de pérdida de adherencia.
- φ_x = Curvatura correspondiente a un punto cualquiera de la gráfica M-φ.
- φ_{cr} = Curvatura correspondiente al M_{cr} del elemento compuesto.
- φ_u = Curvatura correspondiente al M_u obtenido de la prueba experimental.

α = Exponente que proporciona la forma que será la contribución de este fenómeno. Para losas de 2m se emplearon $\alpha = 1.0, 2.0$ y 3.0 . Para losas de 3m se emplearon $\alpha = 1.0, 1.5, 2.0$ y 3.0 .

La variación del exponente α , fue con la finalidad de encontrar el mejor ajuste al comportamiento y desplazamiento límite del elemento compuesto, con respecto al obtenido en las pruebas experimentales.

El análisis de los resultados de los análisis inelásticos empleando las rigideces reales de los elementos (Flexión y Pérdida de adherencia), en la evaluación del modelo analítico, que prediga el comportamiento y el desplazamiento límite del elemento compuesto, se mostrarán en el siguiente capítulo.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

El análisis de resultados, es un paso importante durante el proceso de investigación, ya que en esta etapa los parámetros obtenidos de cada uno de las pruebas experimentales son revisados a detalle, lo cual ayuda a explicar los fenómenos ocurridos durante la etapa experimental. Un total de 16 losas fueron ensayadas aplicando cargas simétricas y lineales a los tercios de los claros hasta llegar a la falla de cada elemento.

Un total de 2 losas de 2m de largo y 10cm de espesor de concreto sobre la cresta representan los puntos de la región B de la gráfica 3.3 para cada calibre de lámina, de igual manera para la región A, 2 especímenes de 3m de largo y 6cm de espesor sobre la cresta, representan los puntos correspondientes de la gráfica 3.3 para cada calibre de lámina.

5.2. Resultados para especímenes de la región B

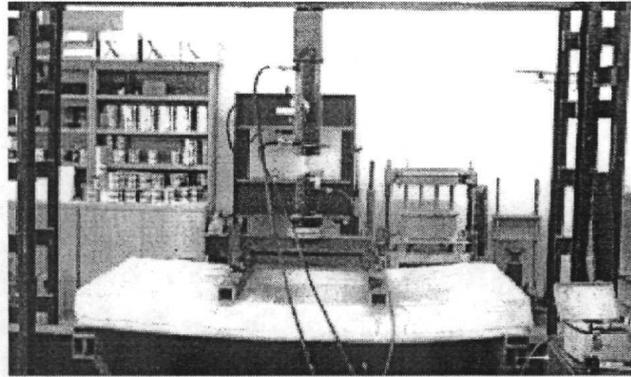
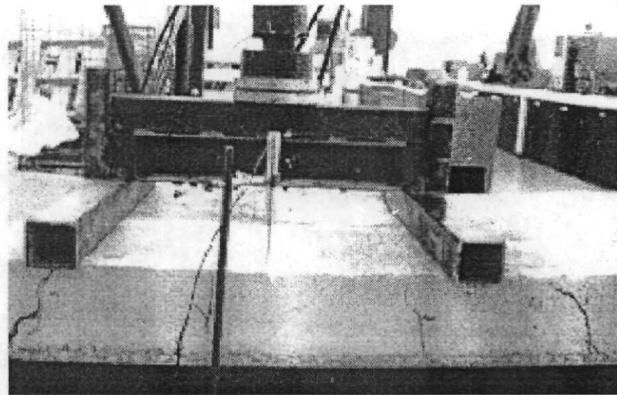
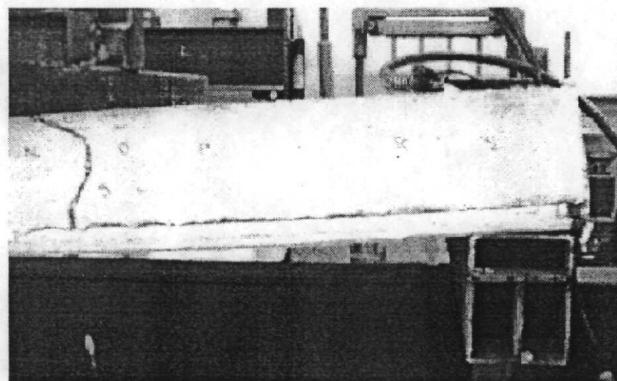
Las características geométricas de los modelos de prueba de 2m de largo se muestran en la siguiente tabla 5.1.

Especímen	Calibre	Longitud (cm)	tconcreto (cm)	bd (cm)	h _{prom} (cm)*	dd (cm)	S (cm)
1	18	200	10	91.4	15.50	6.3	11.6
2	18	200	10	91.4	14.80	6.3	11.6
3	20	200	10	91.4	15.80	6.3	11.6
4	20	200	10	91.4	16.96	6.3	11.6
5	22	200	10	91.4	15.64	6.3	11.6
6	22	200	10	91.4	15.34	6.3	11.6
7	24	200	10	91.4	15.26	6.3	11.6
8	24	200	10	91.4	15.40	6.3	11.6

* Peraltes medidos al inicio, al centro, al final y donde se aplicaron las cargas

Tabla 5.1. Características geométricas de los modelos de prueba.

Durante la prueba de cada losa compuesta se obtuvo un registro con las deflexiones en el centro del claro de cada losa correspondiente a cada incremento de carga. Los resultados obtenidos fueron graficados con la finalidad de identificar parámetros importantes y describir de manera más fácil el comportamiento del elemento estructural. A continuación se muestran fotos de los especímenes de prueba durante la sesión de pruebas y las gráficas P- Δ de cada losa de 2m de longitud, espesor de concreto sobre la cresta de 10cm y calibres 18, 20, 22 y 24.

1. L2-18-10 (Losa de 2m, calibre 18 y $t=10\text{cm}$)**Foto 1.- Dispositivos de carga en losa compuesta****Foto 2.- Agrietamiento por tensión diagonal y flexión****Foto 3.- Deslizamiento entre lámina y concreto**

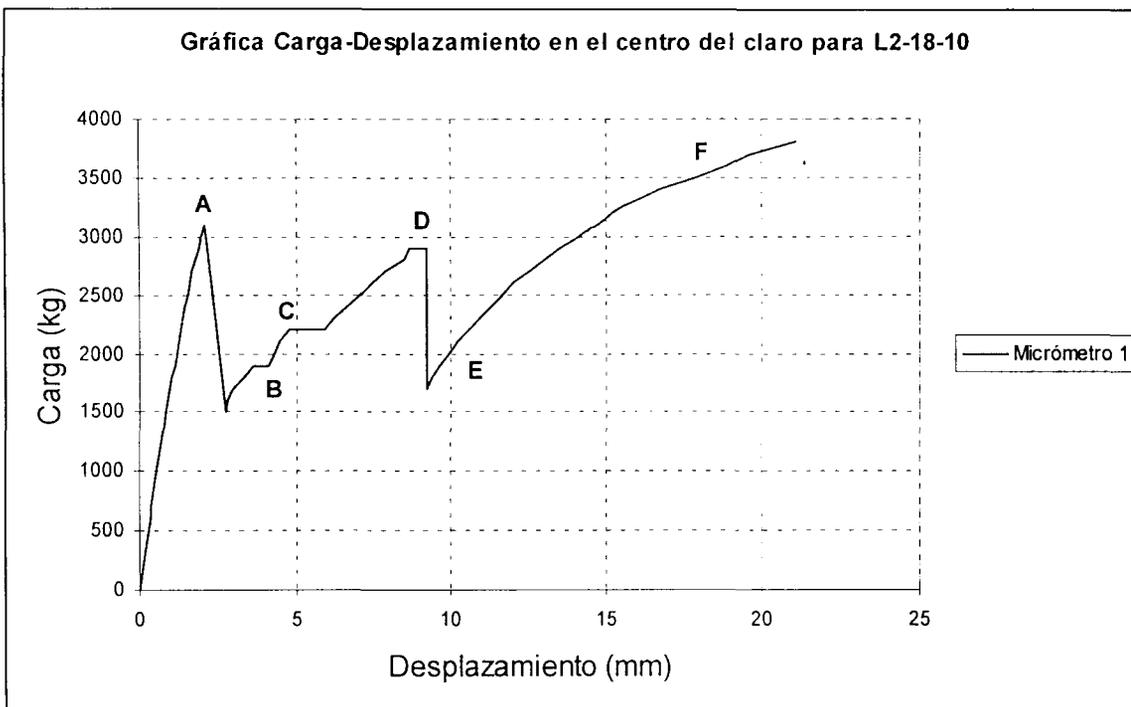


Figura 5.1- Gráfica P- Δ para L2-18-10

Durante el proceso de carga del elemento estructural se presentaron una serie de eventos importantes los cuales describen el comportamiento de la losa y se explican a continuación:

Aplicando incrementos de 100 kg sobre la losa, se inició el proceso de carga registrándose para cada incremento los desplazamientos en el centro del claro de la losa. Como se observa en la figura 5.1 el punto **A** indica la carga para la cual ocurre el primer agrietamiento (3100 kg) sobre la losa, la grieta ocurre debajo del apoyo derecho del dispositivo de carga debido a la tensión diagonal producida por las fuerzas cortantes y la flexión producto de las cargas, debido al agrietamiento del elemento se produce una reducción en la rigidez del elemento y por consiguiente se registra una caída de carga (de 3100 a 1500 kg) en el aparato de medición.

Continuando con el proceso de carga se percibe una pérdida de adherencia en el sistema compuesto debido a ligeros desplazamientos entre la lámina y el concreto dando origen a los puntos **B** y **C** en los cuales se observaron la presencia de grietas en flexión (grietas 2 y 3) para cargas de 1900 kg y 2200 kg

respectivamente. Al llegar a los 2900 kg, correspondiente al punto **D** aparece una grieta en tensión diagonal bajo el apoyo izquierdo del dispositivo de carga (grieta 4), se genera un cambio en la rigidez cayendo la carga hasta 1700 kg.

El punto **E** de la figura 5.1 se presentaron deslizamientos importantes entre la interfase de los materiales, lo cual produce una pérdida de adherencia en el elemento estructural. Adicionalmente se observó la propagación y aberturas de las grietas en tensión diagonal y flexión hasta llegar a la carga de falla de 3800 kg (Punto **F**), cuyo desplazamiento en el centro del claro corresponde a 21.04 mm. La figura 5.2 muestra la configuración de falla de la losa compuesta. La rigidez inicial del elemento se deberá calcular con la pendiente de la gráfica $P-\Delta$ en el rango elástico-lineal definido por el tramo inicial de la gráfica, en este caso el valor que corresponde es 20,000 kg/cm.

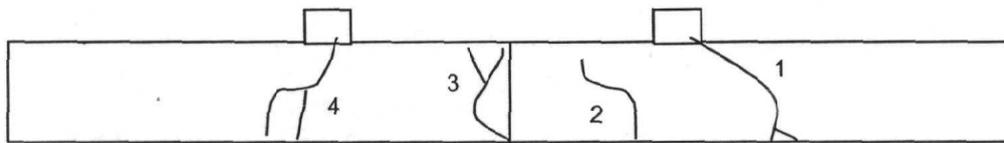


Figura 5.2. Configuración de falla de L2-18-10

2. L2-18-10 (Losas de 2m, calibre 18 y t = 10cm)

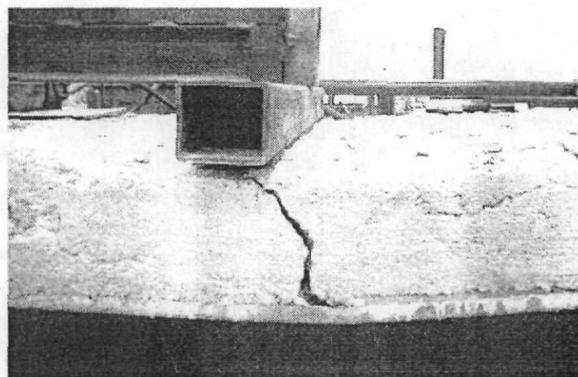


Foto 4.- Agrietamiento en tensión diagonal bajo el apoyo derecho

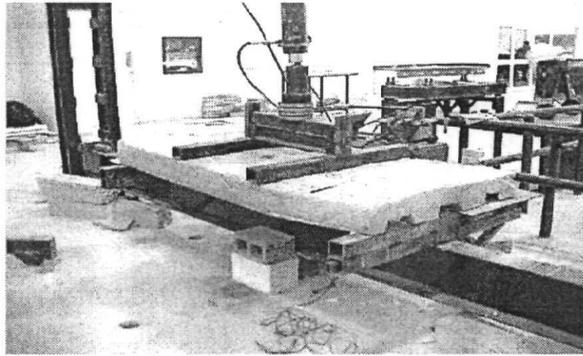


Foto 5.- Perspectiva de los dispositivos de carga sobre el espécimen

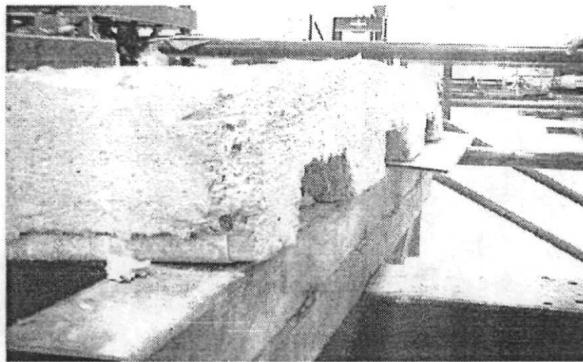


Foto 6.- Deslizamiento de extremo debido a la pérdida de adherencia

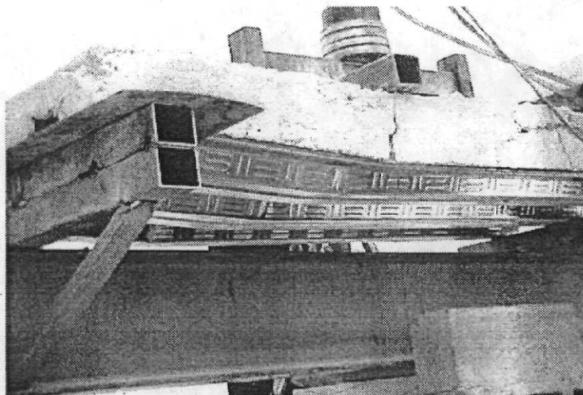


Foto 7.- Configuración de falla de los materiales

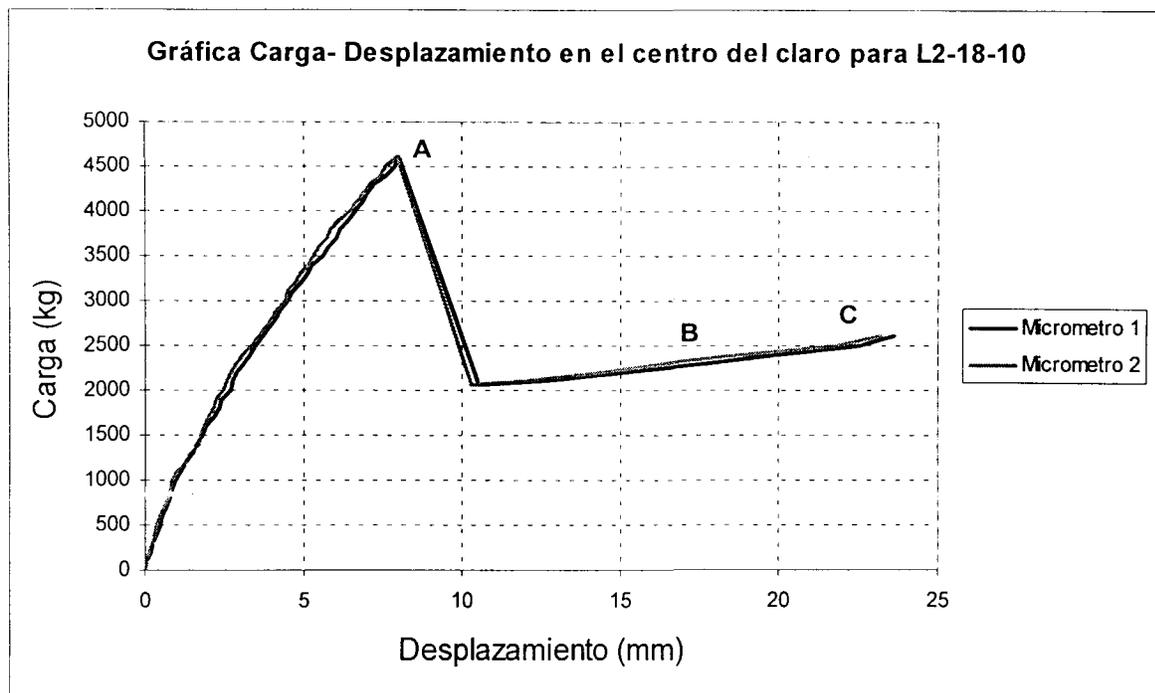


Figura 5.3.- Gráfica P- Δ para L2-18-10

Los eventos más importantes ocurridos en el sistema compuesto durante la prueba experimental se describen a continuación:

Como se observa en la Figura 5.3, el comportamiento del espécimen de prueba hasta llegar al evento principal en la prueba fue sin aparentes pérdidas de adherencia, hasta los 4600 kg donde aparece un agrietamiento en tensión diagonal bajo el apoyo derecho de la losa compuesta (Punto **A**) y con ello una caída en la carga hasta los 2060 kg debido a la pérdida de rigidez del sistema. A partir de esta carga, el elemento estructural comienza a perder adherencia de manera considerable para incrementos de cargas pequeños, además que el agrietamiento tiende a propagarse hacia la fibra extrema en compresión y las deformaciones en la losa comienzan a aumentar rápidamente (Punto **B**). Finalmente, el elemento estructural llega a la falla para una carga de 2600 kg y un desplazamiento promedio en el centro del claro de 23.9 mm (Punto **C**). La rigidez promedio inicial obtenida de la gráfica P- Δ fue de 13,393 kg/cm.

La configuración de falla al final de la prueba se muestra en la siguiente Figura 5.4 para el sistema compuesto de lámina y concreto:

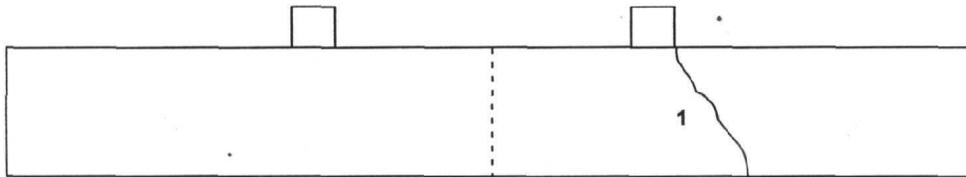


Figura 5.4.- Configuración de falla para L2-18-10

3.L2-20-10 (Losa de 2m, calibre 20 y $t = 10\text{cm}$)

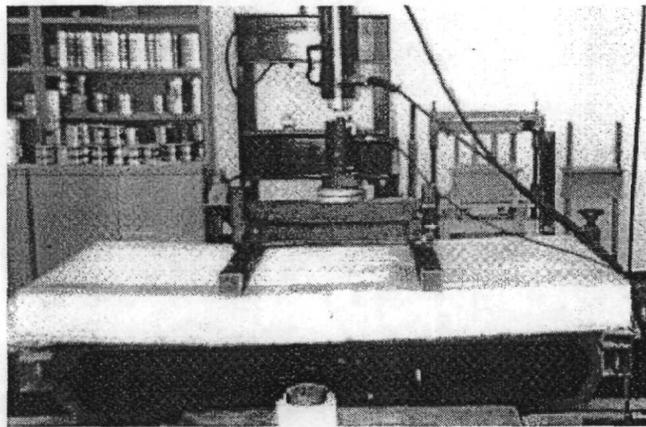


Foto 8.- Sistema de Cargas en Prueba Experimental de Losa 3.

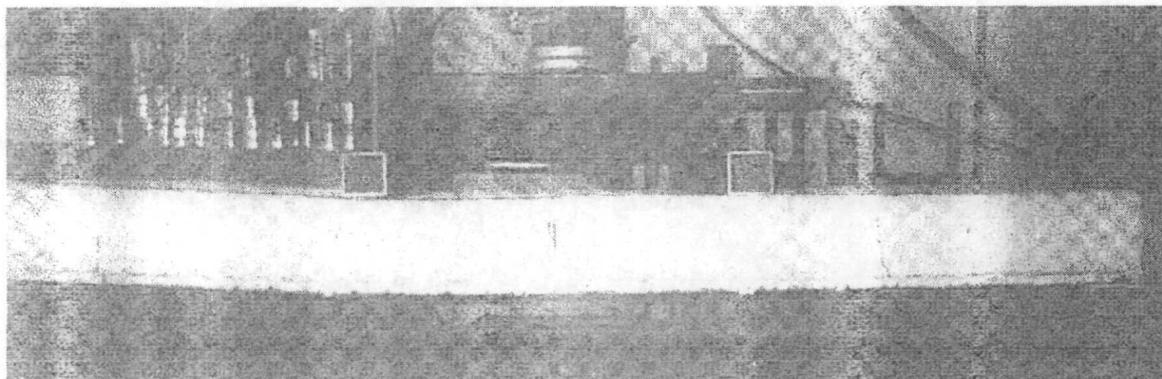


Foto 9.- Configuración de falla del elemento compuesto.

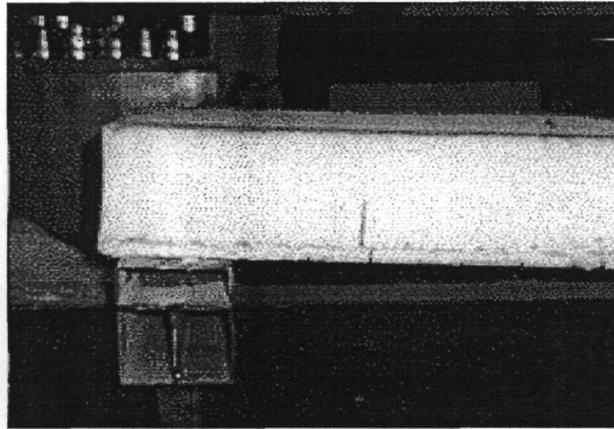


Foto 10.- Deslizamiento entre materiales después de la falla.

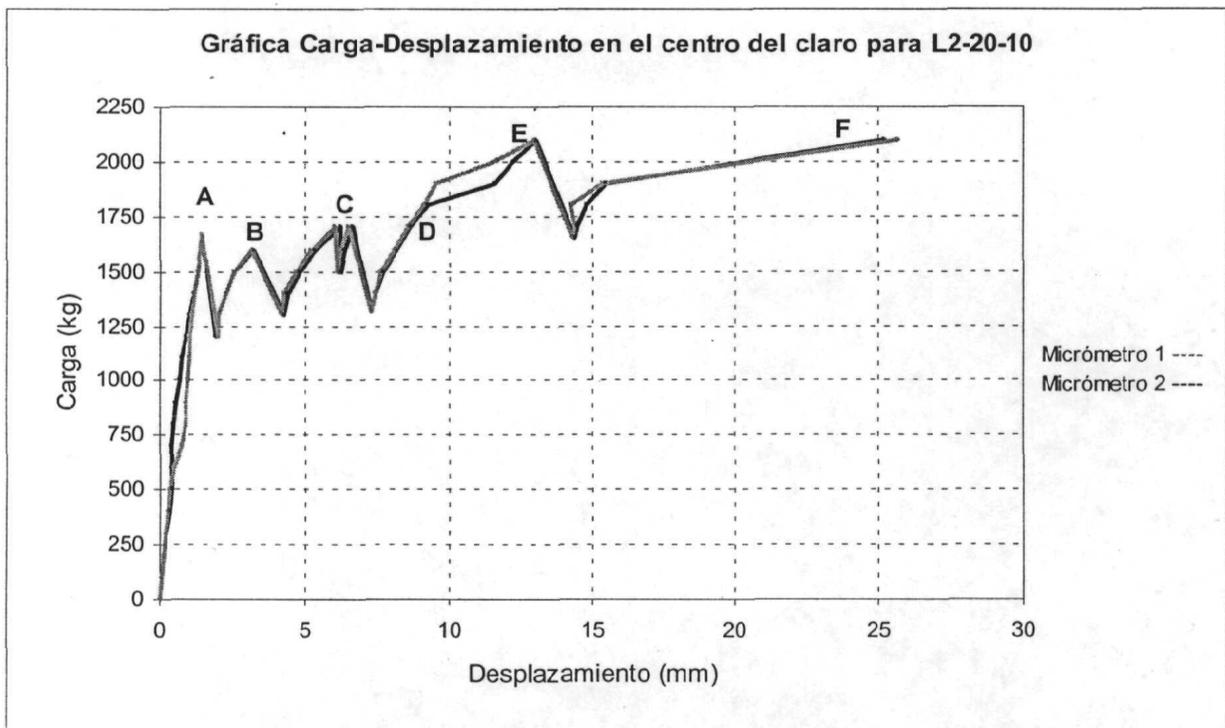


Figura 5.5.- Gráfica P- Δ para L2-20-10

A continuación se describe paso a paso las etapas del comportamiento durante la prueba experimental:

El punto **A** de la Figura 5.5, nos indica la carga de agrietamiento (1670 kg), la cual define el límite elástico lineal del elemento estructural debido a cargas simétricas y lineales aplicadas a los tercios del claro de la losa. La grieta formada para este nivel de carga es una grieta típica de tensión diagonal debido a los esfuerzos generados bajo ese punto de carga, la cual se observa en la Figura 5.6. Debido al agrietamiento de la losa, esto ocasiona una pérdida de rigidez en el elemento lo que genera una caída de carga en el aparato de medición.

Pariendo de 1200 kg se continúa cargando el elemento aplicando incrementos de 100 kg. Una vez que llegamos a los 1600 kg de carga (punto **B** de la Figura 5.5), aparece la segunda grieta por tensión diagonal bajo el apoyo izquierdo del dispositivo de carga, observándose pequeños corrimientos entre los materiales de la losa. De nuevo la carga sufre una caída hasta los 1300 kg y al llegar a los 1700 kg (punto **C**) se observan progresiones del agrietamiento sobre la losa cayendo la carga hasta 1500 kg.

Cuando la losa toma los 1700 kg de nueva cuenta se genera una progresión del agrietamiento existente en el elemento y de nueva cuenta la carga cae hasta los 1320 kg. Al llegar a los 1700 kg se observa la grieta no. 3 sobre la losa, la cual provocada por la flexión en esa zona del elemento, adicionalmente ocurren un mayor corrimiento entre los materiales (punto **D**). Finalmente, se genera una grieta a flexión cuando el elemento toma los 2100 kg (punto **E**), existe una caída de la carga en la losa hasta los 1650 kg y a los 2100 kg, la losa ya no toma más carga observándose en ella un desplazamiento total de 25.43cm en el centro de claro (punto **F**). La rigidez inicial para este elemento fue de 13,393 kg/cm.

La siguiente figura muestra la configuración de falla de la losa compuesta:

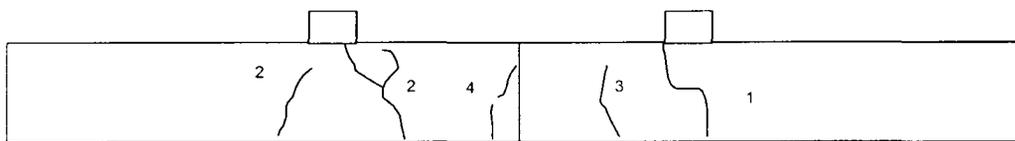


Figura 5.6. Configuración de falla para L2-20-10

4. L2-20-10 (Losa de 2m, calibre 20 y t=10cm)

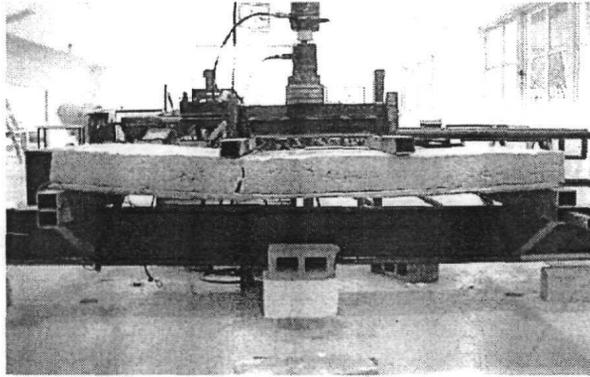


Foto 11.- Sistema de carga sobre espécimen de prueba

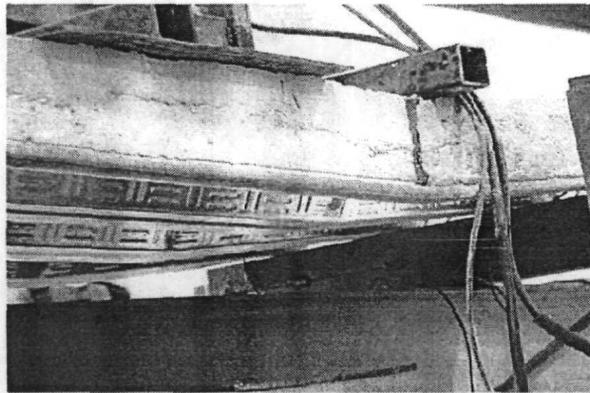


Foto 12.- Configuración de falla de lámina de acero

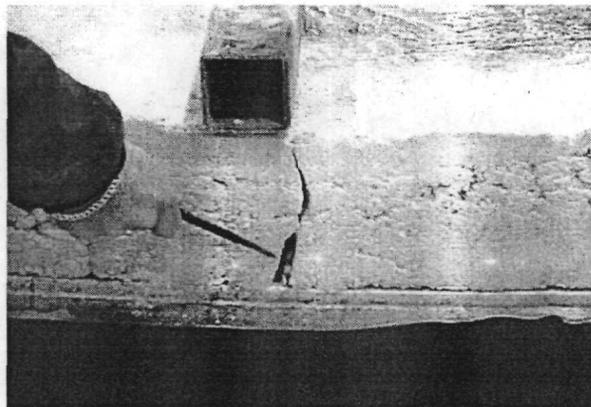


Foto 13.- Agrietamiento por flexión debido a la pérdida de adherencia

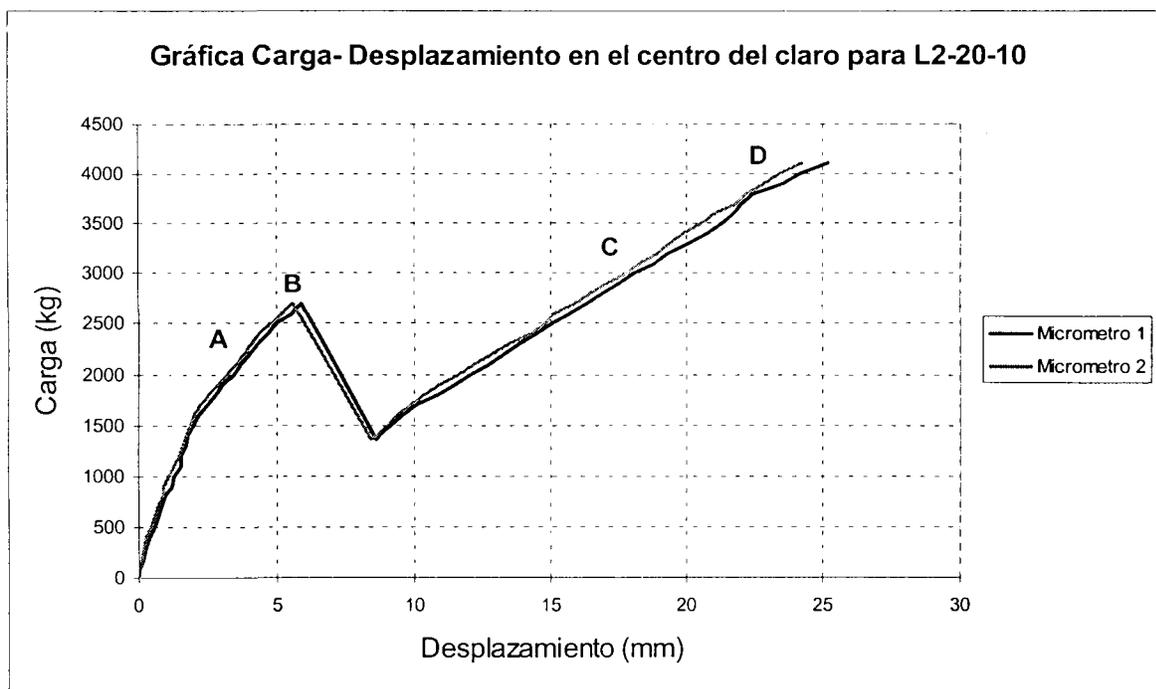


Figura 5.7.- Gráfica P- Δ para L2-20-10

En la etapa experimental una serie de eventos importantes ocurrieron en el espécimen de prueba, los cuales se describen a continuación:

Durante el proceso inicial de carga se obtuvo de la gráfica P-Δ, la rigidez inicial para este elemento fue de 13,393 kg/cm de acuerdo al cociente entre el valor de la carga y deformación donde se mantuvo proporcional. A partir de los 2,300 kg (Punto **A**), se originaron pérdidas de adherencia en el espécimen de prueba, siendo este el primer evento de importancia en el experimento. Para una carga de 2,700 kg (Punto **B**), se observa una grieta en flexión cerca del apoyo izquierdo de la losa, generándose una pérdida de rigidez en el elemento lo cual hace que la carga caiga hasta los 1,350 kg. Partiendo de este nivel de carga las deformaciones en el espécimen de prueba comienzan a aumentar más rápidamente cuando la losa acepta los 3,100 kg (Punto **C**). Adicionalmente se observa una progresión del agrietamiento hacia la fibra extrema en compresión del elemento y paralelamente la grieta comienza a ensancharse. Finalmente la falla en la losa ocurre para un nivel de carga de 4,100 kg (Punto **D**) y un desplazamiento promedio en el centro del claro igual a 24.72 mm.

La configuración de falla se muestra en la siguiente Figura 5.8.

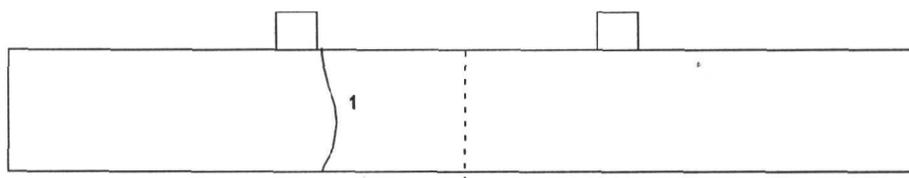


Figura 5.8.- Configuración de falla para L2-20-10

5. L2-22-10 (Losa de 2m, calibre 22 y $t = 10\text{cm}$)

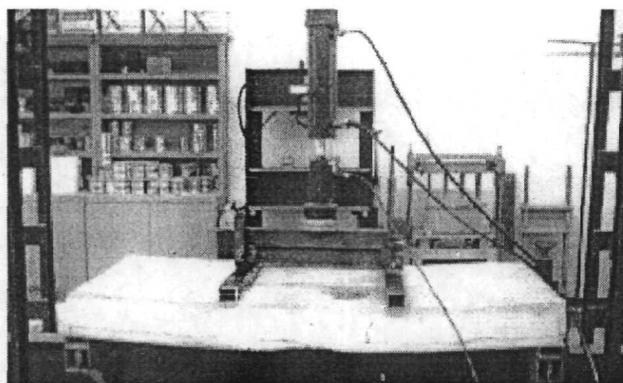


Foto 14.- Configuración deformada de la losa al final de la prueba

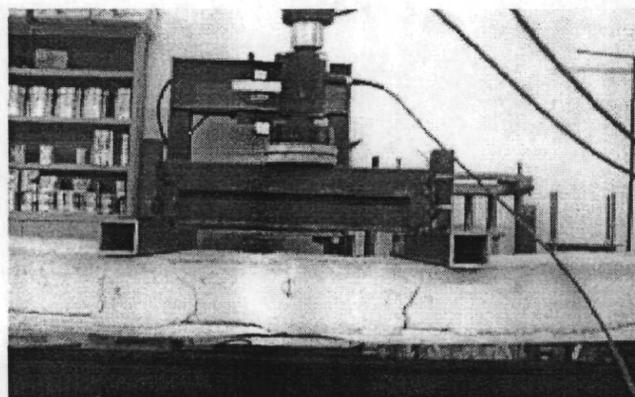


Foto 15.- Configuración agrietada de la losa al final de la prueba

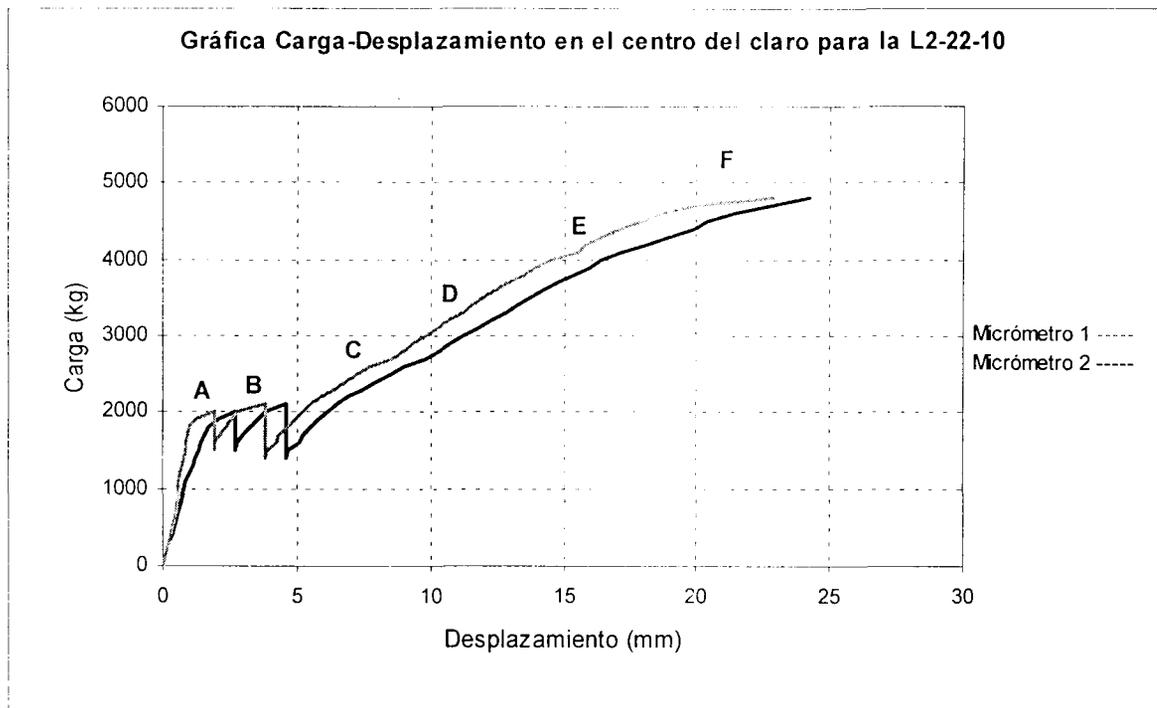


Figura 5.9.-Gráfica P- Δ para L2-22-10

El comportamiento del sistema compuesto se define con la aparición de grietas en tensión diagonal bajo los apoyos transmisores de carga para niveles de carga de 2000 kg, como lo muestran los puntos **A** y **B** de la figura 5.9, registrándose pequeñas pérdidas de adherencia antes del agrietamiento. Una vez agrietado el elemento, las deformaciones se incrementan considerablemente para incrementos de carga pequeños. Adicionalmente, el punto **C** indica una progresión del agrietamiento hacia las fibras en compresión más alejadas.

Cuando la carga sobre la losa llega a los 3900 kg. (tramo **D-E**) se observan pequeños deslizamientos entre los materiales del sistema compuesto y las grietas se abren excesivamente hasta llegar a la falla a los 4800 kg. (punto **F**) con una deformación promedio en el centro del claro igual a 23.55 mm. La rigidez inicial del elemento fue de 14,583 kg/cm obtenida de la gráfica P- Δ .

La figura 5.6 muestra la configuración de falla de la losa al final de la prueba.

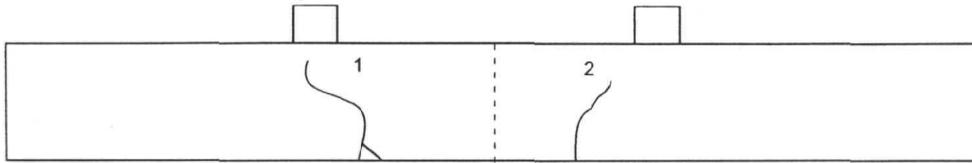


Figura 5.10. Configuración de falla para L2-22-10

6. L2-22-10 (Losa de 2m, calibre 22 y $t = 10\text{cm}$)

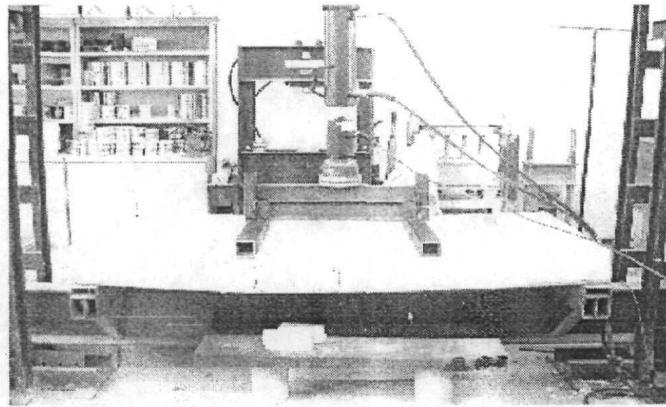


Foto 16. Acciones sobre la losa compuesta

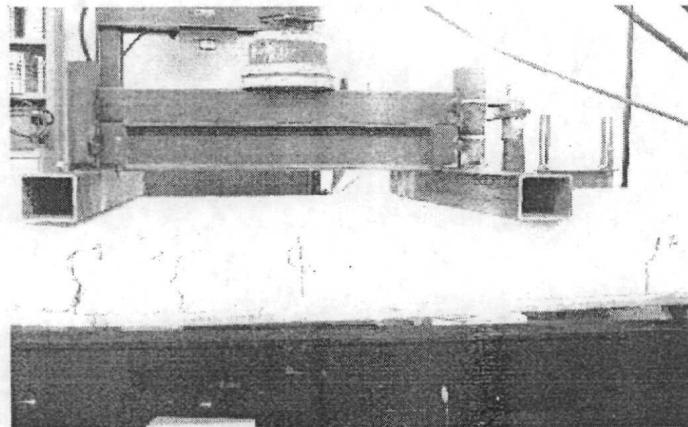


Foto 17. Agrietamiento de elemento debido a las acciones

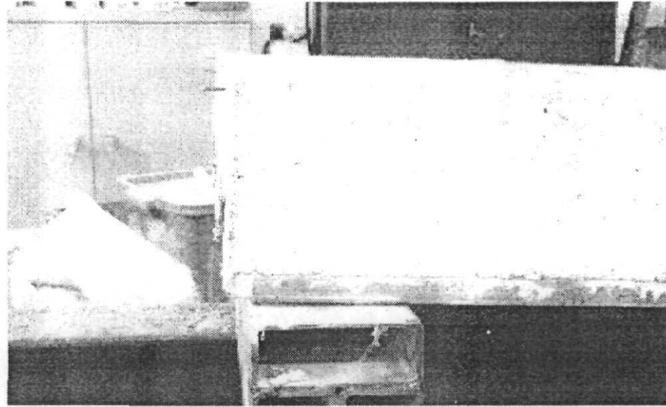


Foto 18. Deslizamiento entre materiales al final de la prueba

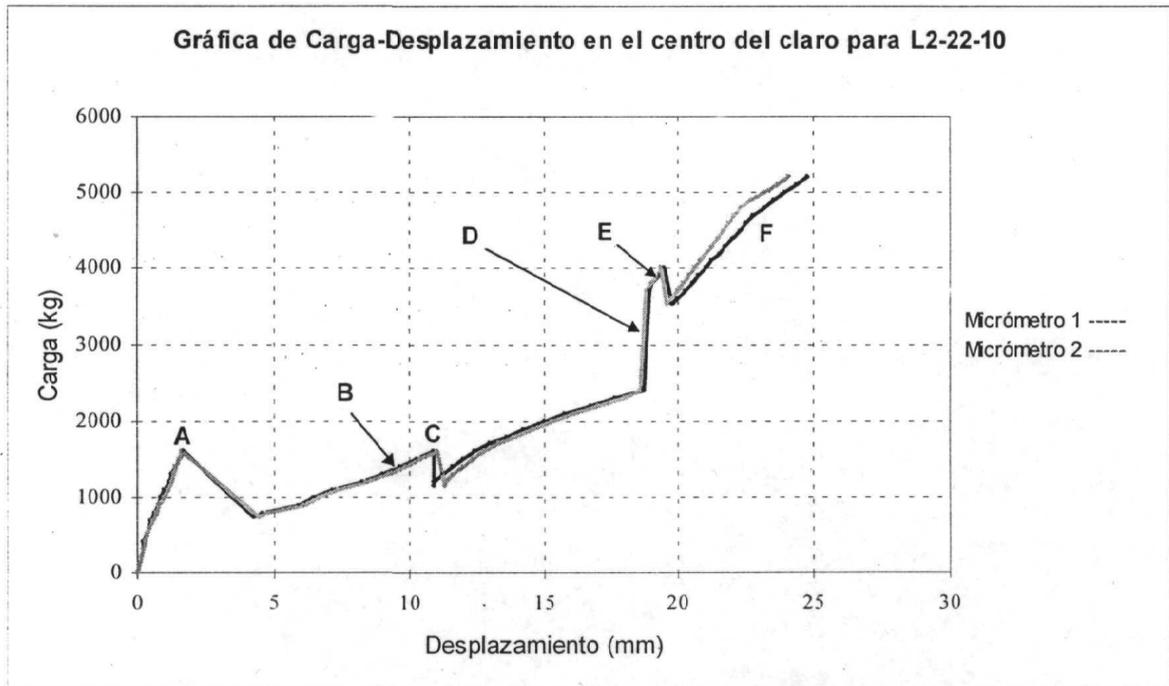


Figura 5.11. Gráfica P-Δ para L2-22-10

A continuación se describen los eventos más importantes ocurridos para L2-22-10 durante la prueba experimental:

El registro carga-desplazamiento en el centro del claro se mantiene proporcional hasta los 300 kg, definiéndose así la rigidez inicial del elemento igual a 15,476 kg/cm de acuerdo al promedio de los datos obtenidos de los micrómetros 1 y 2. A los 1600 kg se presenta el primer evento principal en el comportamiento de la losa

(PEP), el cual es un agrietamiento en tensión diagonal bajo uno de los apoyos transmisores de carga (Punto **A**), seguido por una caída en la carga hasta los 750 kg, y un desplazamiento en el centro del claro según los micrómetros 1 y 2 de 1.62 y 1.67mm respectivamente.

Continuando con la aplicación de la carga se observan pequeños corrimiento entre los materiales y aberturas de grietas para una carga de 1400 kg (Punto **B**). Al llegar a los 1600 kg se presentan las grietas no. 2, una por flexión y otra por tensión diagonal, acompañadas por una pérdida en la capacidad de carga del elemento llegando esta a los 1150 kg. (Punto **C**). De los 1150 kg hasta los 2300kg no hubo eventos importantes en la losa, pero al llegar a los 2400 kg, hubo un cambio brusco en la estabilidad de la losa golpeando los micrómetros de tal manera que hubo una pérdida de información en esos momentos. Se propuso un comportamiento lineal para ese tramo donde existió la pérdida de información (Punto **D**). La carga pasó hasta los 3700 kg y continuando con su aplicación al llegar a los 4000 kg se observan pequeñas progresiones del agrietamiento existente en la losa compuesta (Punto **E**), cayendo la carga hasta 3530 kg.

Finalmente el elemento llega a la falla debido a que no puede recibir más carga a los 5200 kg, registrándose un desplazamiento total en el centro del claro de 24.43 mm según el promedio los micrómetros 1 y 2.

A continuación se muestra la configuración de falla de este elemento:

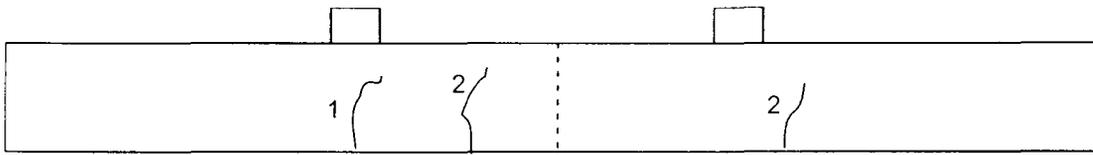


Figura 5.12.- Configuración de falla para L2-22-10

7. L2-24-10 (Losa de 2m, calibre 24 y $t = 10\text{cm}$)

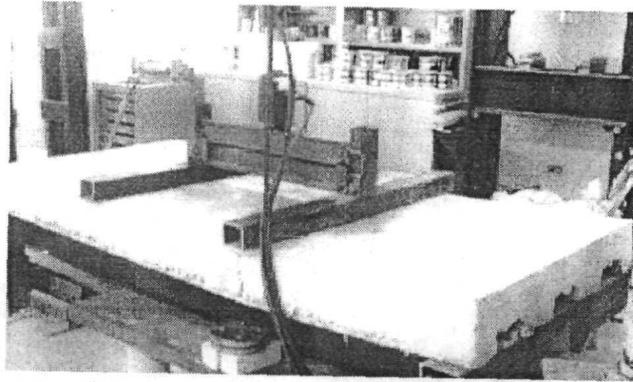


Foto 19. Dispositivos de carga en losa compuesta

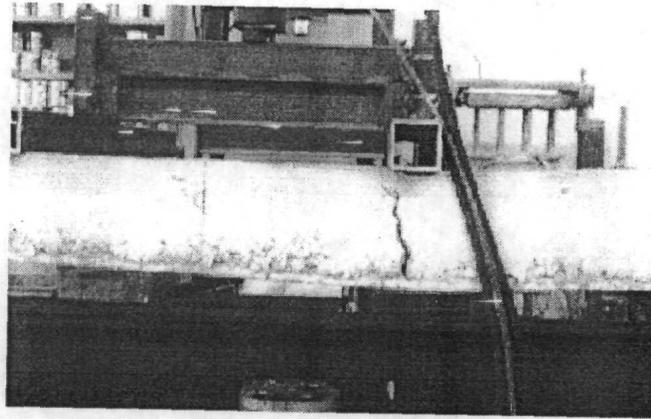


Foto 20. Grieta en tensión diagonal bajo el apoyo izquierdo

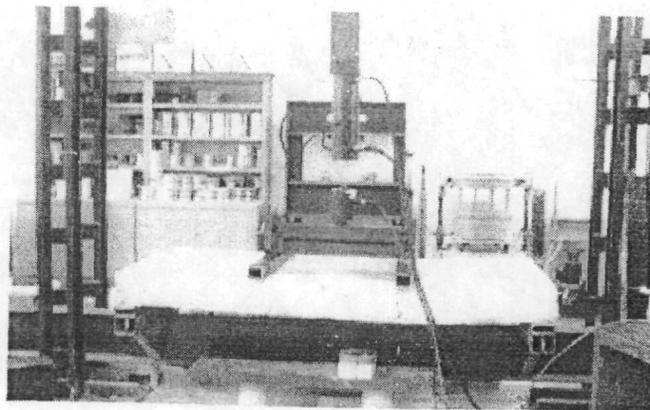


Foto 21. Vista frontal del sistema de carga en losa compuesta

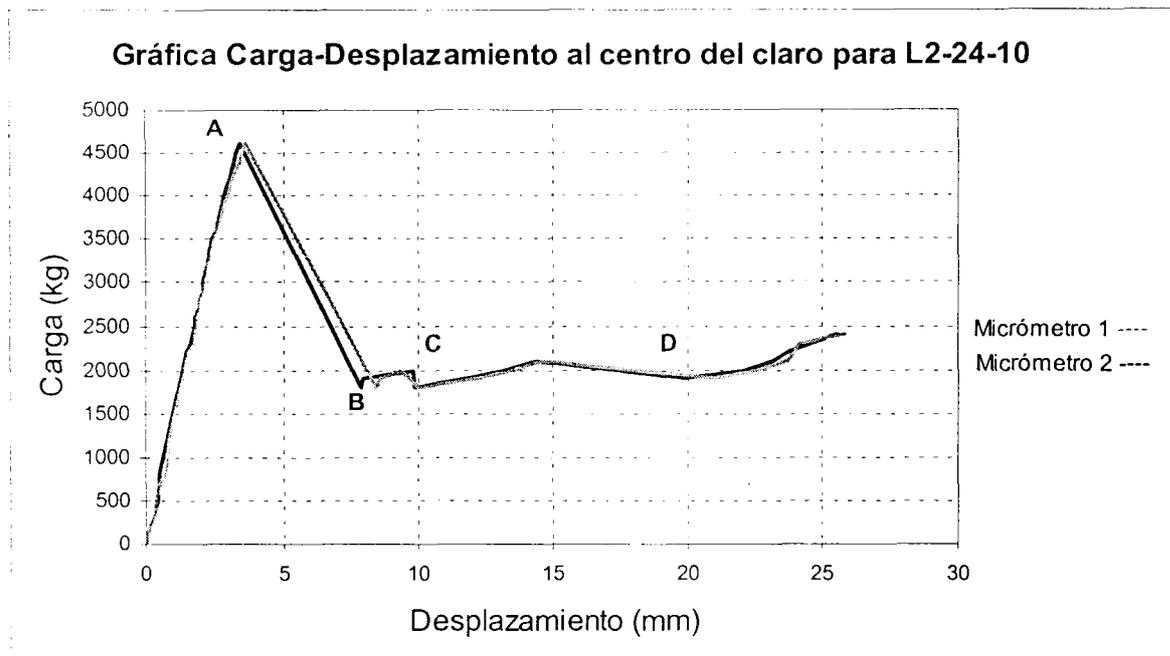


Figura 5.13. Gráfica P- Δ para L2-24-10

Para este elemento se colocaron dos micrómetros en lados opuestos de la losa sobre la línea central longitudinal. La carga aplicada en incrementos de 100 kg fue tal hasta presentarse una pérdida de rigidez del elemento, lo cual físicamente originó una grieta en tensión diagonal bajo el dispositivo de carga a un nivel de carga de 4600 kg, indicado en la gráfica por el punto **A** y una caída en la carga (de 4600 kg a 1800 kg).

Partiendo de 1800 kg se continuó el proceso de carga registrándose una serie de deslizamientos entre los materiales para niveles de carga entre 1800 y 2000 kg tal como se muestra en los puntos **B** y **C** de la figura 5.13. Finalmente (Punto **D**), se observa que las grietas en tensión diagonal se abren de manera excesiva hasta que los materiales del elemento compuesto pierden su adherencia por completo y por consiguiente se presenta la falla de la losa dado que ya no es posible aplicar más incrementos de carga físicamente. El desplazamiento promedio en el centro del claro para la carga de falla fue de 25.7 mm, y La rigidez inicial para este elemento obtenida de la gráfica P- Δ es de 13,393 kg/cm.

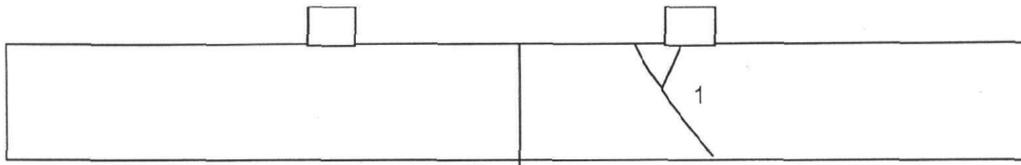


Figura 5.14. Configuración de falla para L2-24-10.

8. L2-24-10 (Losa de 2m, calibre 24 y $t = 10\text{cm}$)

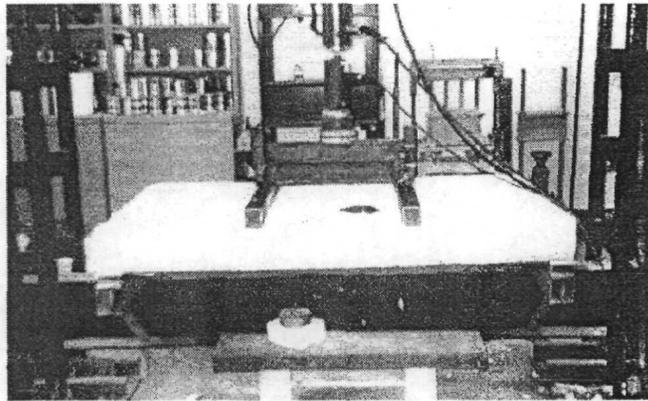


Foto 22.- Dispositivos de carga sobre Losa Compuesta 8.

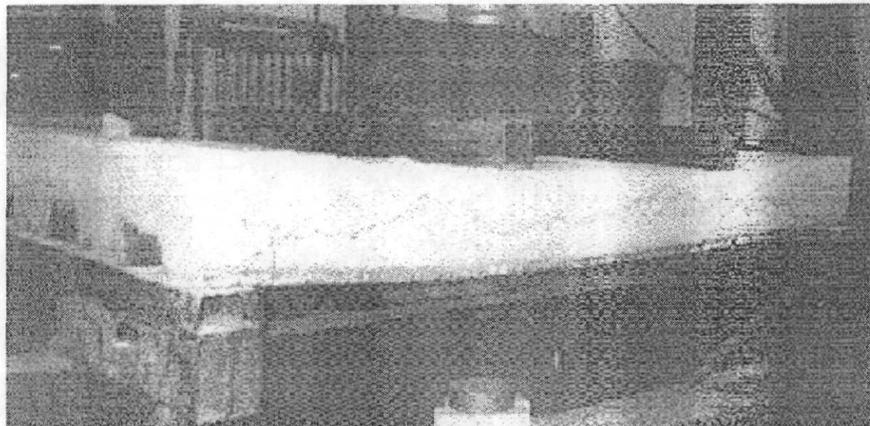


Foto 23.- Agrietamiento entre las capas de concreto de losa compuesta.

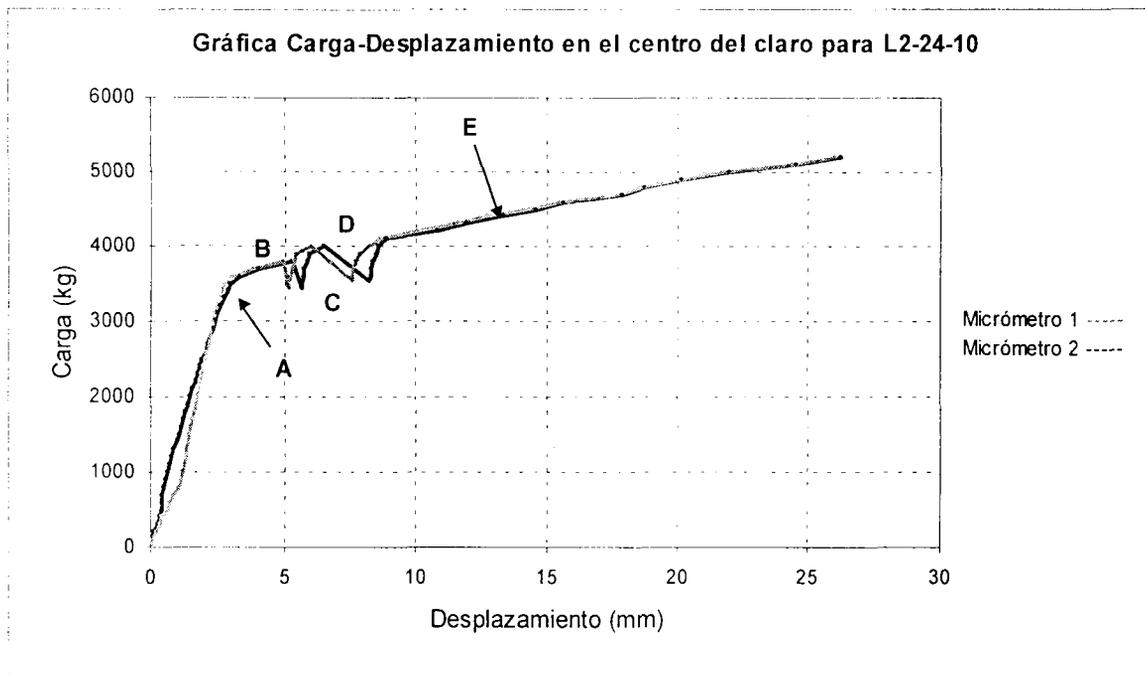


Figura 5.15.- Gráfica P- Δ para L2-24-10

Los eventos más importantes que definen el comportamiento para esta losa en particular se describen a continuación:

El proceso de carga permaneció de manera normal sin presentarse eventos hasta llegar a los 3300 kg, en donde se detectaron pequeños deslizamientos entre las capas de concreto (Punto **A**). Una vez que la carga en la losa alcanzó los 3800 kg (Punto **B**), aparecieron una serie de agrietamientos por tensión diagonal en diversas partes de la losa como se muestra en la Figura 5.16 (grieta 1 y grieta 2), lo cual provoca una caída en la carga hasta los 3430 kg (Punto **C**). En esos instantes el desplazamiento en el centro del claro era igual a 5.64 y 5.15 mm en los micrómetros 1 y 2 respectivamente.

Continuando con el proceso de carga en el elemento estructural, al llegar a los 4000 kg se observan propagaciones en el agrietamiento existente hacia los puntos de aplicación de las cargas (Punto **D**), acompañado de una caída en la carga hasta los 3530 kg.

Finalmente al seguir incrementando la carga se presentaron aberturas en las grietas existentes para los 4100 y 4300 kg de carga registrada en la losa (Punto **E**)

y al alcanzar los 5200 kg se presenta la falla en el elemento debido al agrietamiento excesivo y el deslizamiento entre las capas de concreto del sistema estructural. El desplazamiento final del elemento en la falla fue de 26.27 y 26.04 mm de acuerdo a las lecturas de los micrómetros 1 y 2. La rigidez inicial para la losa compuesta es 12,698 kg/cm.

Es importante señalar de antemano que en el colado de este elemento se tuvo problemas, ya que las proporciones de las cantidades no fueron adicionadas correctamente por un error en la supervisión, y es por ello que la configuración de falla del elemento parece un tanto rara con respecto a los demás elementos compuestos ensayados, sin embargo, es el elemento que mayor carga soportó durante la prueba experimental. Adicionalmente, se presentó deslizamiento entre capas de materiales de concreto dado que poseían características mecánicas diferentes por los problemas descritos anteriormente.

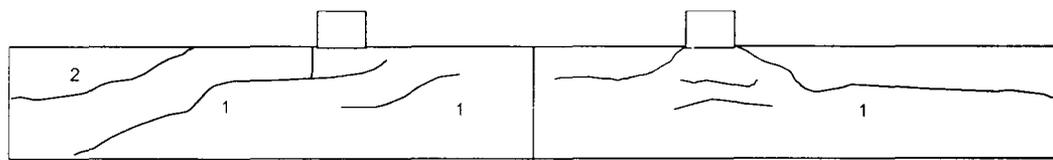


Figura 5.16. Configuración de falla para L2-24-10

Nota general: Las diferencias entre las lecturas de los micrómetros empleados en las mediciones del desplazamiento en el centro del claro de la losa, son debido a un pequeño ladeo que se presentó en la losa durante la prueba experimental.

5.3. Resultados para especímenes de la región A.

Las características geométricas generales de los modelos de prueba de 3m de largo para los diversos calibres empleados se muestran en el siguiente cuadro de datos.

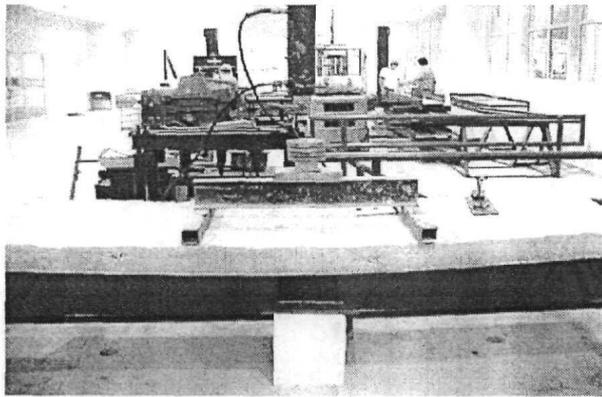
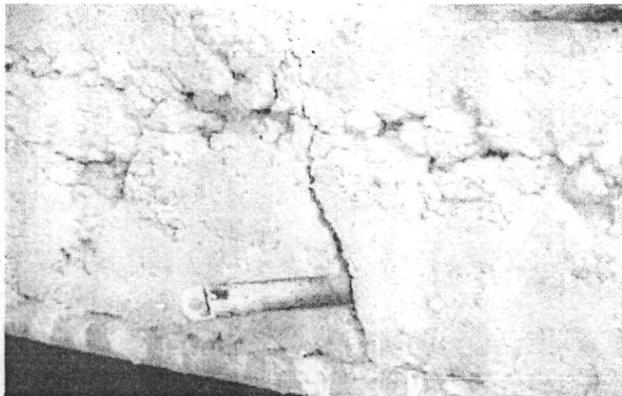
Especimen	Calibre	Longitud (cm)	tconcreto (cm)	bd (cm)	h _{prom} (cm)*	dd (cm)	S (cm)
1	18	300	6	91.4	13.04	6.3	11.6
2	18	300	6	91.4	13.26	6.3	11.6
3	20	300	6	91.4	13.84	6.3	11.6
4	20	300	6	91.4	13.23	6.3	11.6
5	22	300	6	91.4	12.84	6.3	11.6
6	22	300	6	91.4	12.72	6.3	11.6
7	24	300	6	91.4	13.10	6.3	11.6
8	24	300	6	91.4	13.40	6.3	11.6

* Peraltes medidos al inicio, al centro, al final y donde se aplicaron las cargas

Tabla 5.2. Características geométricas de los modelos de prueba.

De manera similar que los especímenes de 2m, se obtuvo un registro de las deflexiones en el centro del claro de cada losa correspondiente a cada incremento de carga. Los resultados obtenidos fueron graficados con el objetivo de identificar los parámetros importantes y describir fácilmente el comportamiento del elemento estructural. Posteriormente se realizarán gráficos comparativos con la finalidad de analizar el comportamiento los sistemas compuestos para cada uno de los calibres de prueba y con ello deducir un modelo analítico que prediga el comportamiento de este tipo de elementos sometidos a cargas gravitacionales.

A continuación se muestran fotos de los especímenes de prueba durante la fase experimental y la descripción del comportamiento del elemento basados en las gráficas $P - \Delta$ de cada losa de 3m de longitud, espesor de concreto sobre la cresta de 6cm y calibres 18, 20, 22 y 24.

9. L3-18-6 (Losa de 3m, calibre 18 y $t = 6\text{cm}$)**Foto 24.- Configuración deformada de la losa al final de la prueba****Foto 25.- Profundidad del agrietamiento en el sistema compuesto****Foto 26. Deslizamiento de extremo entre lámina y concreto**

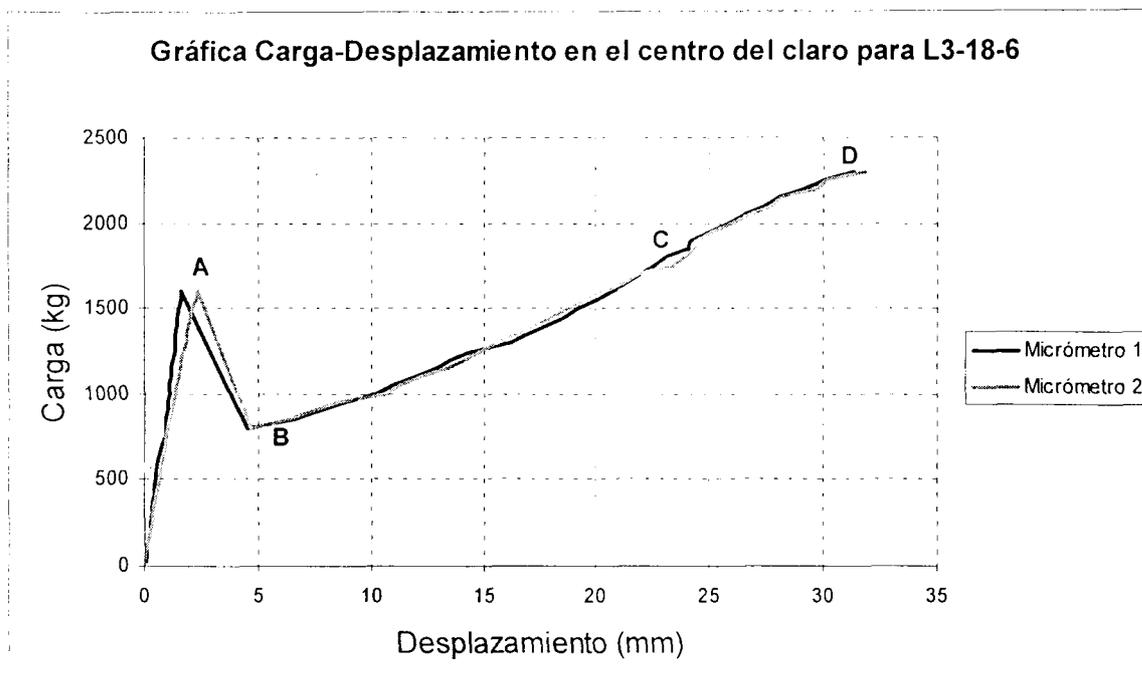


Figura 5.17. Gráfica P- Δ para L3-18-6

Los eventos más importantes que ocurrieron durante el proceso experimental para el elemento compuesto se resumen a continuación:

Aplicando incrementos de carga de 50 kg en el espécimen compuesto, el primer evento principal en la losa se registra para una carga de 1600 kg (Punto **A** de la Figura 5.17), con una grieta en tensión diagonal cercas del apoyo derecho del dispositivo de carga. Debido al agrietamiento, el elemento pierde rigidez y por consiguiente la carga cae hasta los 800 kg. Continuando con el proceso de carga sobre la losa, se generan una serie de deslizamientos entre los materiales producto de las fuerzas cortantes generados en la interfase lámina-concreto a partir de los 950 kg (Punto **B** de la Figura 5.17). Al llegar a los 1900 kg, comienza una progresión del agrietamiento hacia la fibra extrema en compresión (Punto **C**) para que finalmente a los 2300 kg se genera la falla en el espécimen compuesto, debido a la abertura excesiva del agrietamiento y a la pérdida de la acción compuesta entre los materiales (Punto **D**).

La deformación promedio en el centro del claro a la falla, de acuerdo a los micrómetros 1 y 2 fue de 31.58 mm. La rigidez inicial de este elemento obtenida de la gráfica P- Δ para este caso es de 11,806 kg. La siguiente Figura 5.18 muestra la configuración de falla de la losa compuesta:

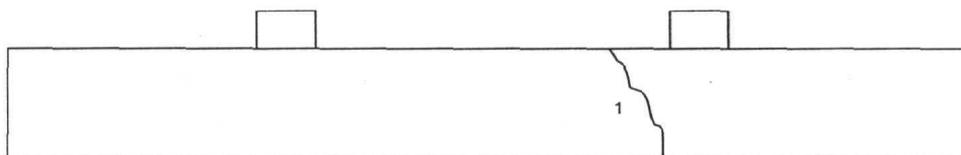


Figura 5.18. Configuración de falla de L3-18-6

10. L3-18-6 (Losa de 3m, calibre 18 y $t = 6$ cm)

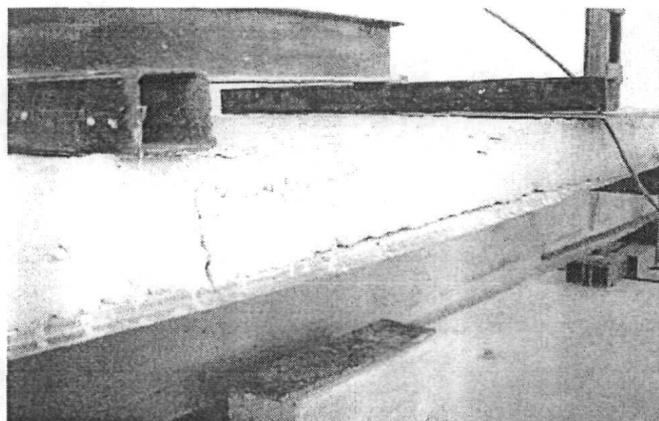


Foto 27. Agrietamiento bajo apoyo izquierdo y pérdida de adherencia en la parte central del elemento

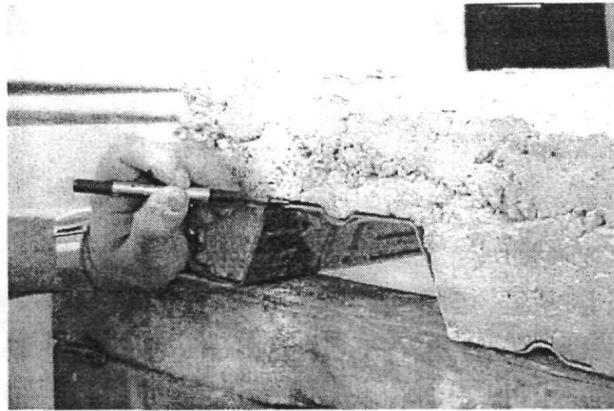


Foto 28.- Pérdida de adherencia entre los materiales en la falla

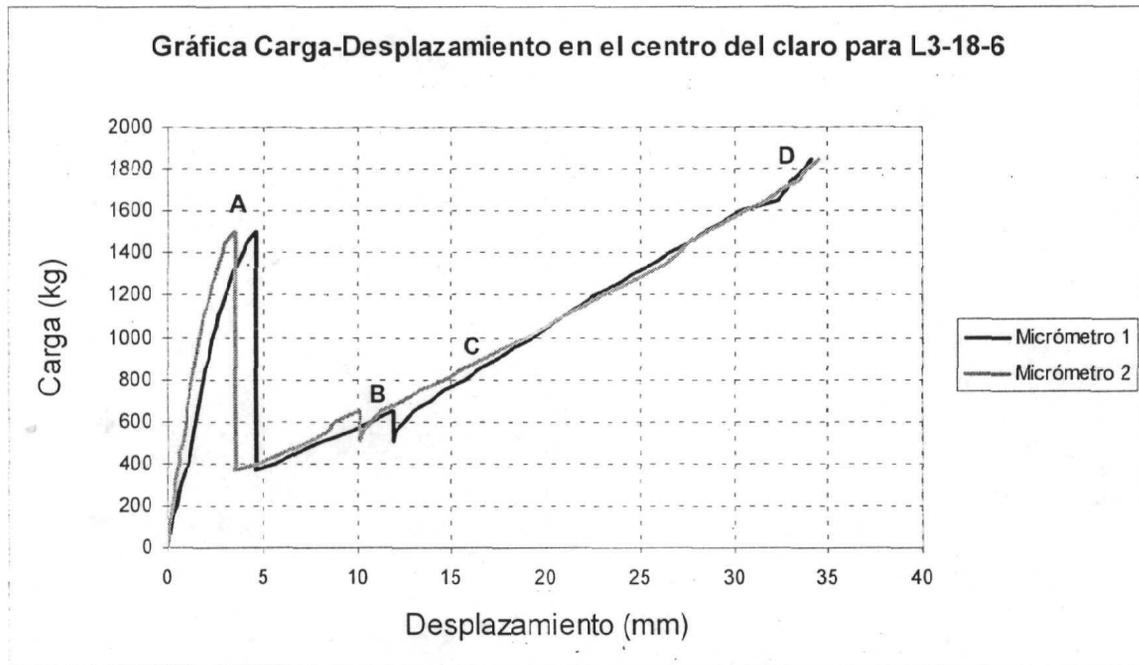


Figura 5.19. Gráfica P- Δ para L3-18-6

Durante el proceso de carga se observaron los siguientes eventos en la losa compuesta:

El proceso de carga fue de manera normal hasta que la losa alcanzó los 1500 kg, donde se originaron 2 grietas producto de los esfuerzos flexionantes generados en la zona central del elemento compuesto (Punto A de la Figura 5.19). La carga

sufre una caída hasta los 375 kg, debido a la pérdida de rigidez del elemento generado por el agrietamiento. Partiendo de 375 kg el proceso de carga continúa originándose pérdidas de adherencia entre los materiales para cargas menores a las 600 kg. Cuando llegamos a los 650 kg las grietas por flexión se propagan hacia la superficie de la losa y una nueva caída se origina en el dispositivo de carga llegando a las 510kg (Punto **B**). Continuando con el proceso de carga del elemento al llegar a los 950 kg (Punto **C**), las aberturas de la grietas se ve incrementada y para el nivel de carga de 1850 kg la acción compuesta entre los elementos lámina y concreto se pierde, generándose por consiguiente la falla para una deformación promedio en el centro de claro de 34.32 mm (Punto **D**).

La rigidez inicial para este elemento es igual a 7,008 kg/cm.

A continuación se muestra la configuración de falla para la losa compuesta:

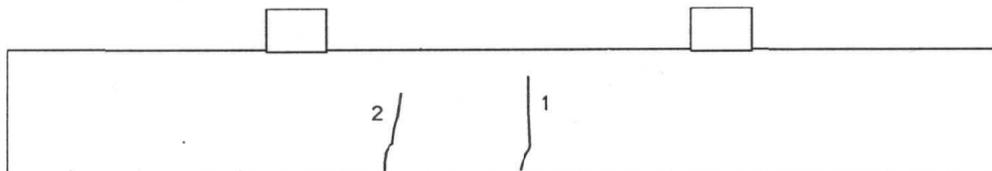


Figura 5.20. Configuración de falla de L3-18-6

11. L3-20-6 (Losa de 3m, calibre 20 y $t=6\text{cm}$)

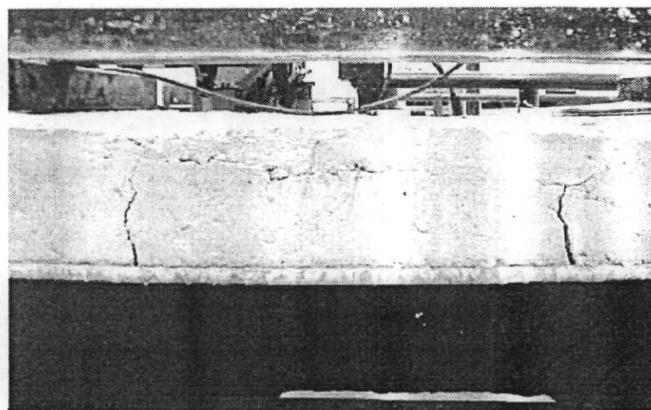


Foto 29. Configuración agrietada del elemento compuesto

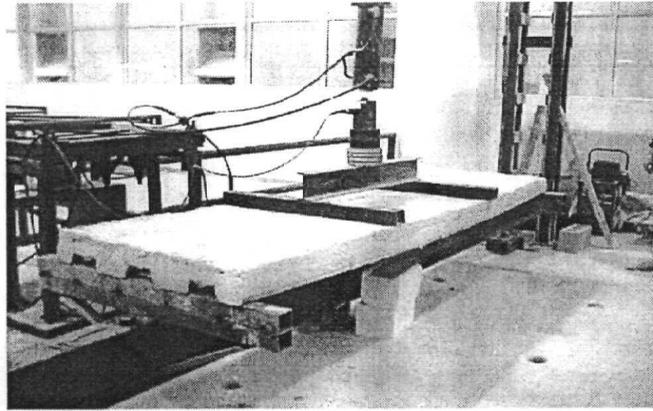


Foto 30. Vista lateral de losa compuesta durante la prueba experimental.

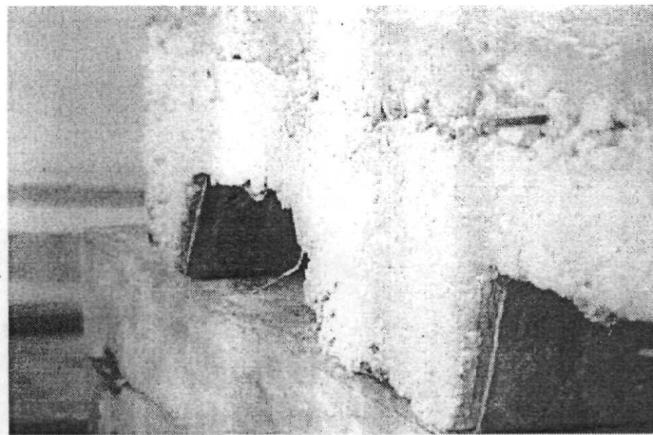


Foto 31. Deslizamiento de extremo entre lámina y concreto

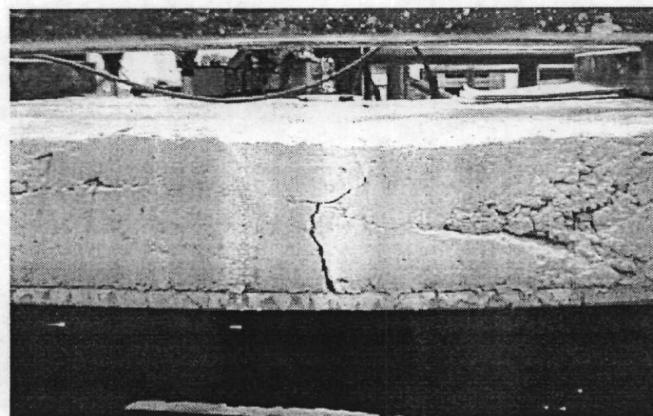


Foto 32. Abertura de grieta en flexión del elemento compuesto

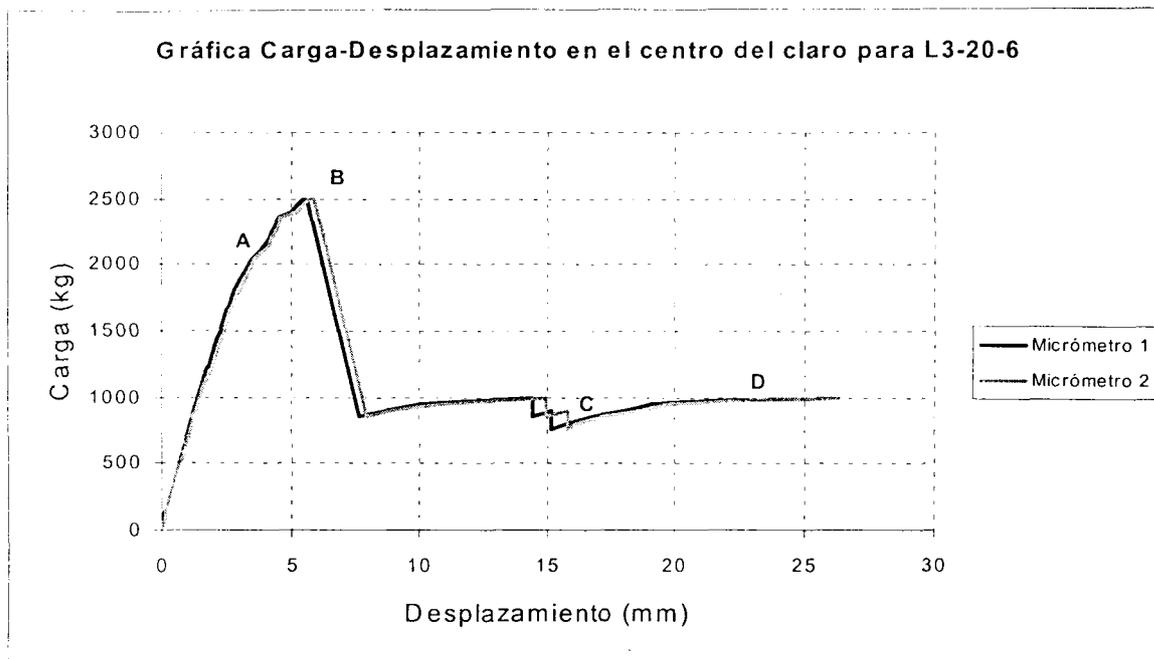


Figura 5.21. Gráfica P- Δ para L3-20-6

El comportamiento del sistema estructural losa bajo la acción de cargas aplicadas simétricamente a los tercios del claro se describe a continuación:

Aplicando incrementos de cargas de 50 kg, tenemos que el primer evento principal se presentó para carga de 2050 kg (Punto **A**), mediante la pérdida de adherencia entre los materiales sin un agrietamiento visible. A partir de esta carga hasta los 2450 kg la pérdida de adherencia entre los materiales si fue incrementando hasta que a los 2500 kg aparece dos grietas en la parte central de la losa producto de los esfuerzos flexionantes en esa zona del elemento compuesto (Punto **B**). La carga cae hasta los 860 kg, debido al cambio de rigidez en el elemento. Al llegar a los 1000 kg el sistema tiene una pérdida de rigidez producto del deslizamiento de los materiales y por lo tanto la carga cae hasta los 850 kg (Punto **C**). Finalmente el elemento llega a la falla a los 1000 kg, ya que para ese nivel de carga y deformación la losa pierde la acción compuesta y los materiales trabajan de manera independiente (Punto **D**). La deformación promedio en el centro del claro, de acuerdo a las lecturas de los micrómetros 1 y 2 fue de 26.22 mm y la rigidez inicial del sistema fue de 10,417 kg/cm.

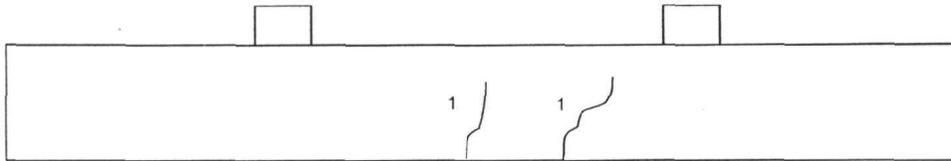


Figura 5.22. Configuración de falla de L3-20-6

12. L3-20-6 (Losa de 3m, calibre 20 y $t = 6\text{cm}$)

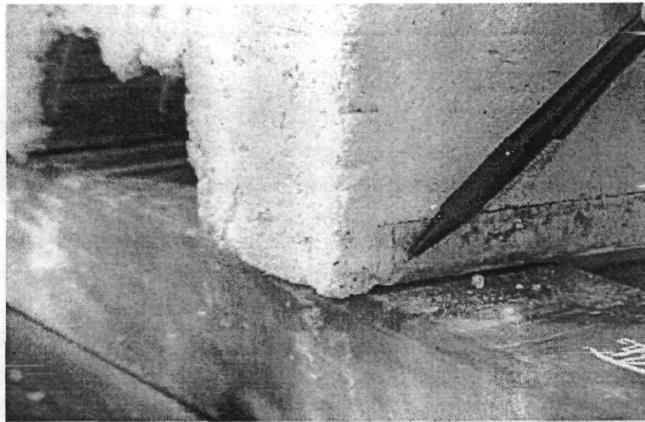


Foto 33. Deslizamiento de extremo para el sistema compuesto

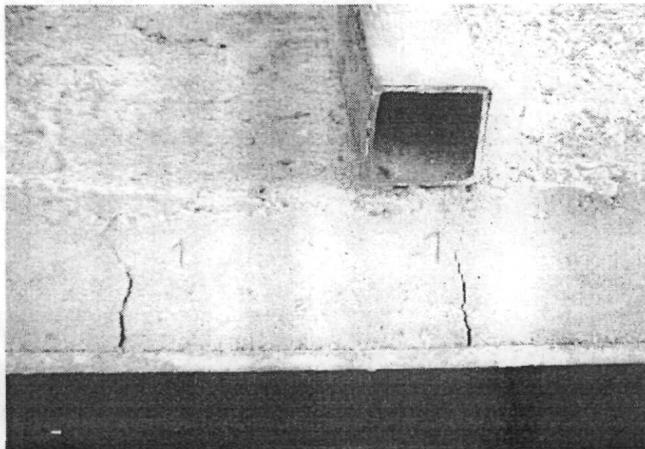


Foto 34. Grietas debido a los esfuerzos de corte y flexión

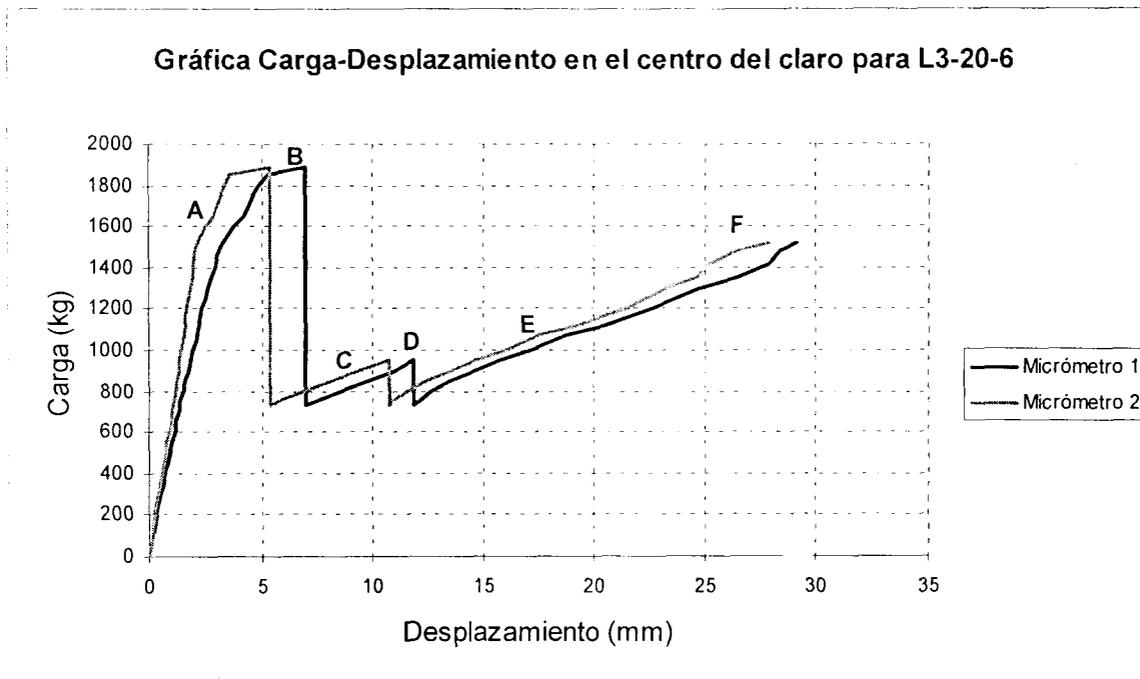


Figura 5.23. Gráfica P- Δ para L3-20-6

Los eventos más importantes registrados para L3-20-6, se describen a continuación:

Para el cálculo de la rigidez inicial del elemento, debemos de tomar en cuenta la porción de la gráfica P-Δ donde las deformaciones sean proporcionales a los incrementos de carga aplicados y en este caso tenemos que la rigidez inicial del elemento es de 6,066 kg/cm. Durante el proceso de carga del elemento, se observan pequeñas pérdidas de adherencia entre la lámina y el concreto a partir de los 1350 kg hasta los 1600 kg (Punto **A**). Cuando la losa acepta los 1889 kg (Punto **B**), se origina una caída en la carga hasta los 729 kg, producto del agrietamiento generado en la losa. Una grieta por flexión cerca del centro del claro (Punto **C**) y una por tensión diagonal a un lado del apoyo derecho (Punto **D**), se originaron debido a los elementos mecánicos de corte y flexión. Partiendo de los 729 kg, se continuó cargando la losa presentándose pérdidas de adherencia

entre los materiales (Punto E) y se observaron ensanchamientos de las grietas hasta llegar a la falla del elemento para una carga de 1520 kg, debido a que se perdió la acción compuesta entre la lámina y el concreto. La deformación en el centro del claro, en la falla fue de 28.49 mm, de acuerdo al promedio registrado de las lecturas de los micrómetros 1 y 2.



Figura 5.24. Configuración de falla para L3-20-6

13. L3-22-6 (Losa de 3m, calibre 22 y $t=6\text{cm}$)

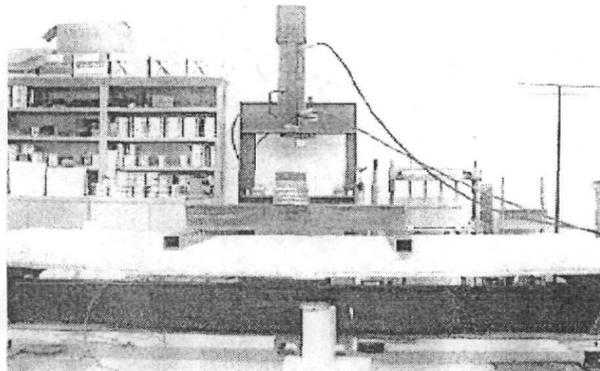


Foto 35. Configuración de la losa al final de la prueba

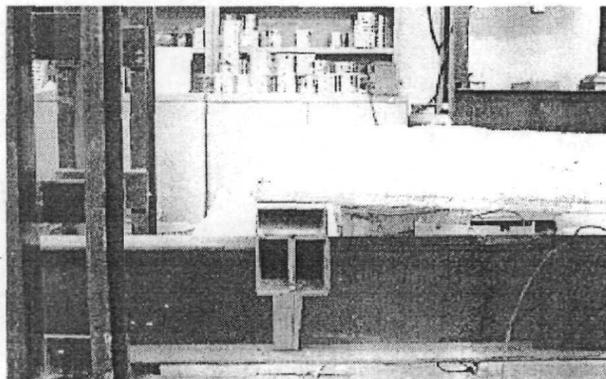


Foto 36. Desplazamiento relativo entre la lámina y el concreto

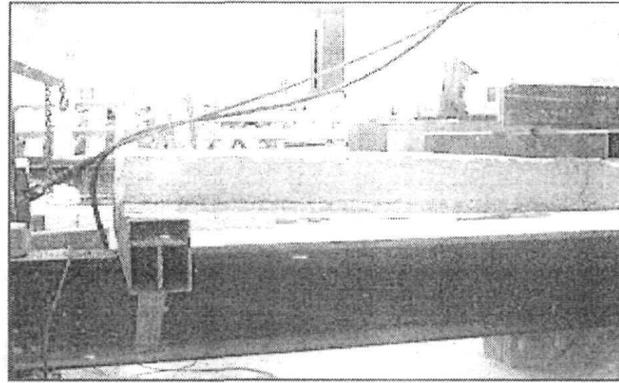


Foto 37. Deslizamiento de extremo al final de la prueba

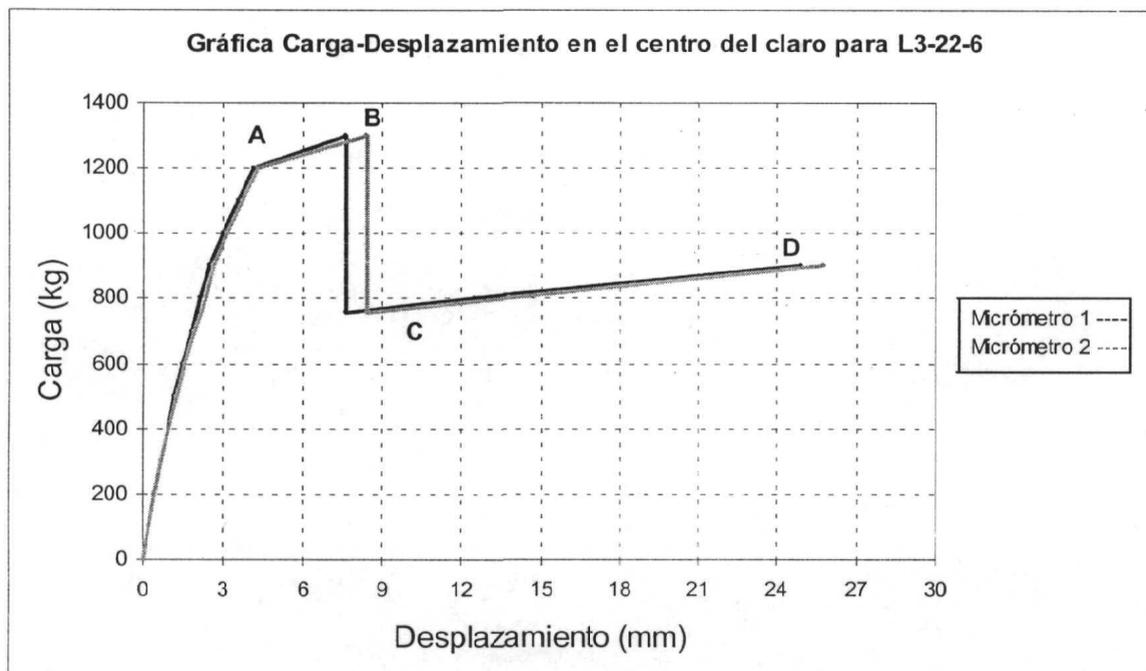


Figura 5.25. Gráfica P- Δ para L3-22-6

El comportamiento para esta losa se describe a continuación, marcando los eventos más importantes ocurridos durante la prueba experimental:

Los incrementos de carga al igual que para los especímenes de 2m fue de 100 kg. El primer evento principal (PEP) en la losa ocurrió cuando la carga aplicada en la losa era de 1200 kg (Punto **A**), lo cual físicamente el elemento compuesto tuvo

una pérdida de adherencia entre el acero y el concreto sin manifiestos de agrietamiento, solo un pequeño cambio en la rigidez del elemento. Para los 1300 kg (Punto **B**), se aprecia físicamente en la losa un agrietamiento en tensión diagonal bajo uno de los apoyos del dispositivo transmisor de carga (ver Figura 5.25) y una caída en la carga hasta los 756 kg.

Siguiendo con el mismo incremento, se observa para los 800 kg una pérdida de adherencia en el elemento compuesto (Punto **C**) y para los 900 kg la grieta en tensión diagonal comienza a sufrir una abertura considerable y el elemento falla debido a que ya no es capaz de tomar más carga (Punto **D**). La rigidez inicial para esta losa es 4,881 kg/cm de acuerdo a las datos obtenidos de la prueba experimental. El desplazamiento total fue de 25.34 mm y la configuración de falla se muestra en la siguiente figura.

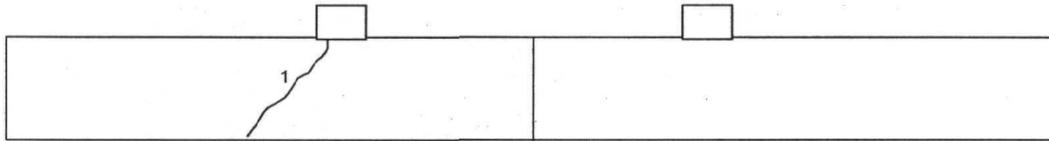


Figura 5.26. Configuración de falla para L3-22-6

14. L3-22-6 (Losa de 3m, calibre 22 y t =6cm)

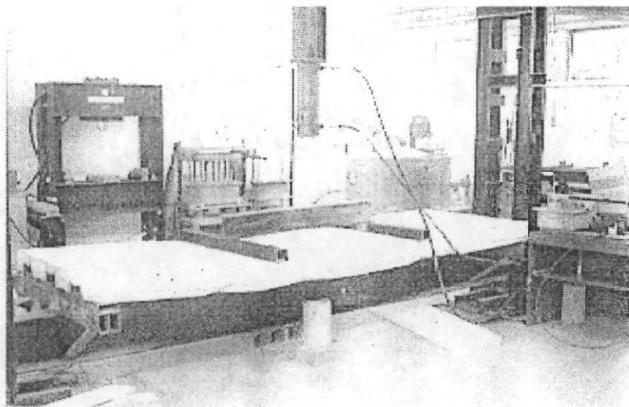


Foto 38. Sistema de cargas para losa compuesta

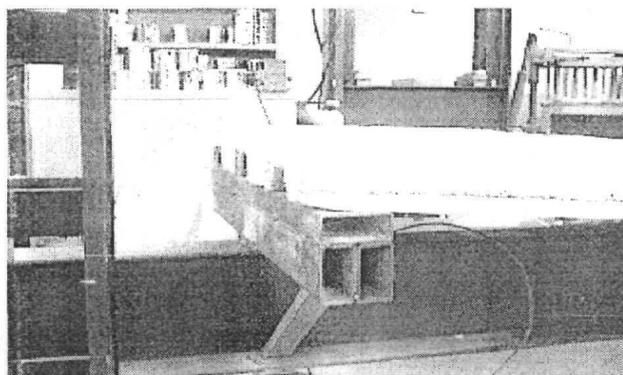


Foto 39. Deslizamiento de extremo, debido a la pérdida de adherencia.

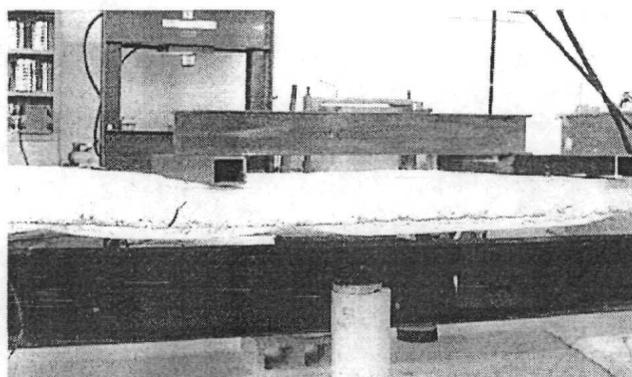


Foto 40. Grieta de falla en tensión diagonal sobre losa compuesta

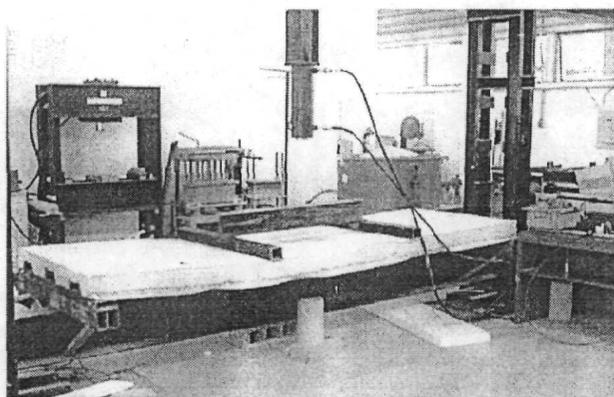


Foto 41. Vista lateral de la configuración deformada de la losa

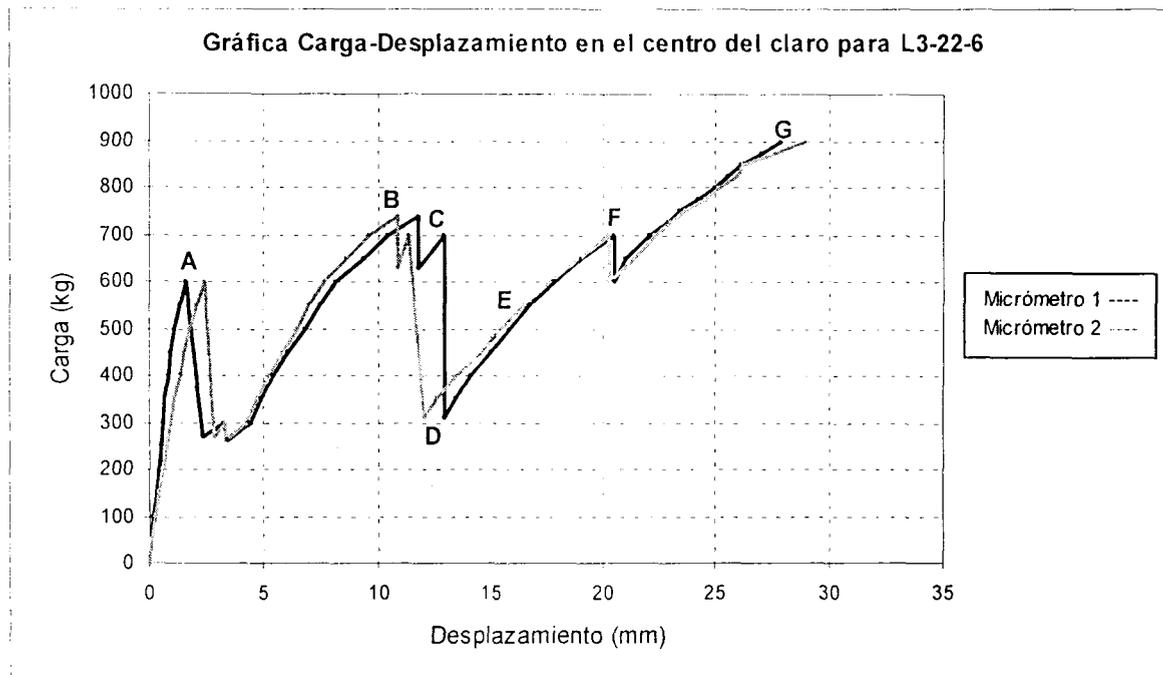


Figura 5.27. Gráfica P- Δ para L3-22-6

Debido a que la losa anterior fallo para una carga relativamente baja, para esta losa se modificó el incremento de carga de 100 kg a 50 kg con la intención de obtener un mayor número de puntos y definir mejor la gráfica P- Δ . Haciendo esta modificación se inició el proceso de carga presentándose los siguientes sucesos:

Para una carga de 600 kg, el evento de mayor importancia (PEP) toma lugar con una grieta en flexión (grieta1) en la zona central de la losa (Punto **A**). Esto es debido a que durante las cargas anteriores a los 600 kg el elemento fue perdiendo adherencia en la parte central y por consiguiente la flexión en esa zona agrietó el elemento. Debido a la pérdida de rigidez del elemento se produce una caída en la carga hasta los 270 kg, y de nueva cuenta al llegar a los 300 kg se detecta una pequeña pérdida de adherencia, lo cual genera una caída en la carga hasta los 260 kg.

Continuando con el proceso de carga, ocurre un agrietamiento en la losa al llegar a los 740 kg en la zona central del elemento compuesto (grieta 2), así como se observa un ligero deslizamiento en el extremo del elemento (Punto **B**) y una caída

en la carga de 90 kg. Al llegar a los 700 kg (Punto C), aparece la tercera grieta en este caso por tensión diagonal bajo uno de los apoyos del dispositivo de carga y por consiguiente una caída en la carga hasta los 310 kg (Punto D). Partiendo de 310 kg, se presentan eventos importantes cuando la losa toma una carga de 550 kg y 700 kg, observándose físicamente propagación del agrietamiento existente y abertura en las misma respectivamente (Puntos E y F). Continuando con el proceso de carga desde los 600 kg, el elemento llega a la falla para una carga de 900 kg, (Punto G) para la cual se tiene una deformación promedio en el centro del claro de la losa de 28.42 mm de acuerdo a los registros de los micrómetros 1 y 2. La rigidez promedio inicial de este elemento es 4,861 kg/cm empleando los valores de los micrómetros 1 y 2. La configuración de falla al final de la prueba se muestra a continuación:

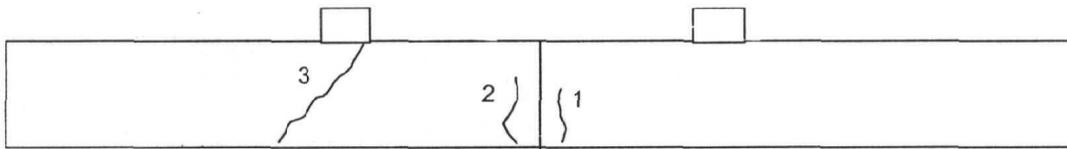


Figura 5.28. Configuración de falla para L3-22-6

15. L3-24-6 (Losa de 3m, calibre 24 y $t=6\text{cm}$)

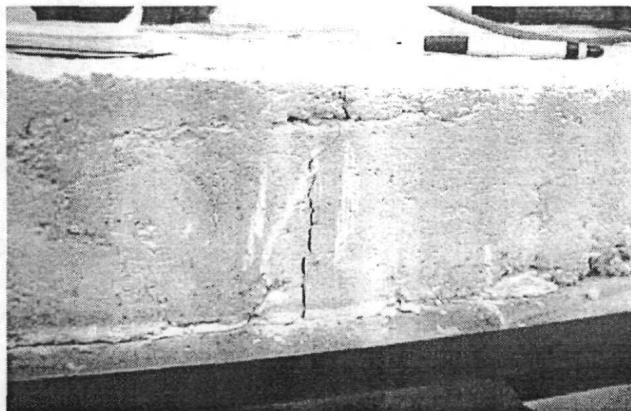


Foto 42. Agrietamiento por flexión sobre losa compuesta

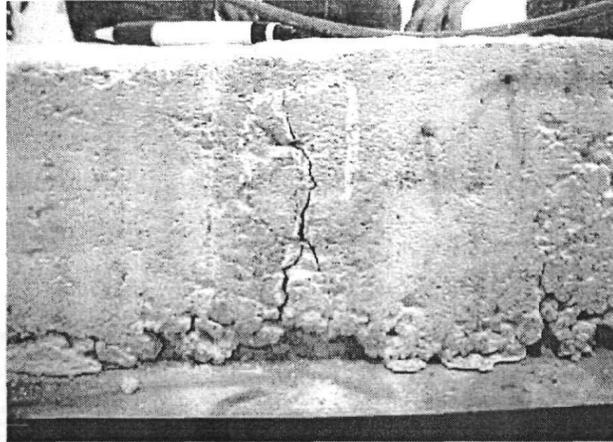


Foto 43. Agrietamiento y pérdida de adherencia entre los materiales

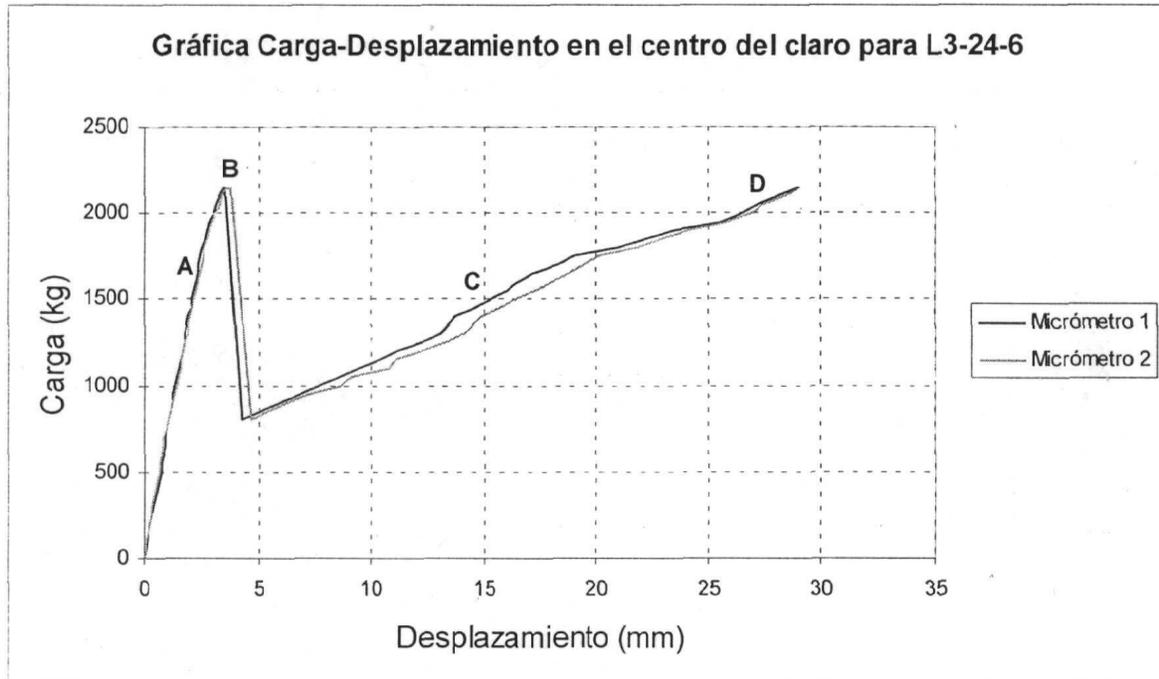


Figura 5.29. Gráfica P- Δ para L3-24-6

Aplicando incrementos de carga de 50 kg sobre el espécimen compuesto, el primer evento principal es producto de la pérdida de adherencia entre la lámina y el concreto debido a los esfuerzos cortantes y flexionantes para una carga de

1650 kg (Punto A). Al llegar a 2,154 kg, aparecen grietas por flexión cercas de los apoyos del dispositivo de carga y una grieta por tensión diagonal cercas del apoyo derecho (Punto B). Debido a la pérdida de rigidez del elemento la carga cae a 800 kg. Continuando con el proceso de carga sobre la losa se origina una serie de pérdidas de adherencia en los claros de corte, adicionalmente el agrietamiento se propaga hacia la fibra extrema en compresión para cargas entre los 1650 kg (Punto C) y la carga de falla de 2150 kg (Punto D) que es donde se pierde la acción compuesta entre los materiales, además que no es posible aplicar mas carga con el dispositivo hidráulico. La deformación promedio registrada para la carga de falla en el centro del claro, fue de 28.99 mm y la rigidez inicial definida por el tramo proporcional de la gráfica.

La configuración de falla se muestra en la siguiente figura:

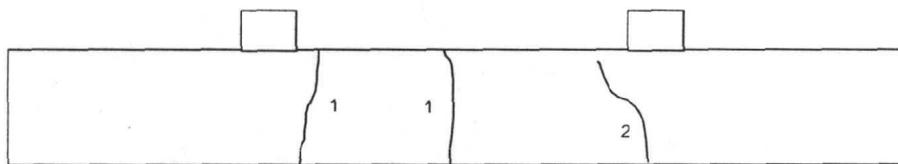


Figura 5.30. Configuración de falla para L3-24-6

16. L3-24-6 (Losa de 3m, calibre 24 y t = 6cm)



Foto 44. Agrietamiento debido a los esfuerzos por flexión

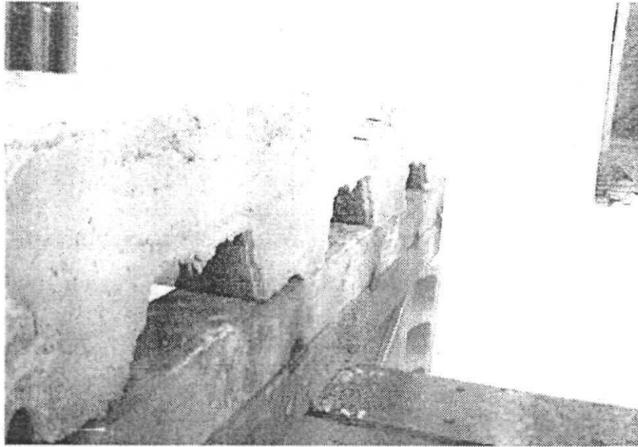


Foto 45. Deslizamiento de extremo al final de la prueba

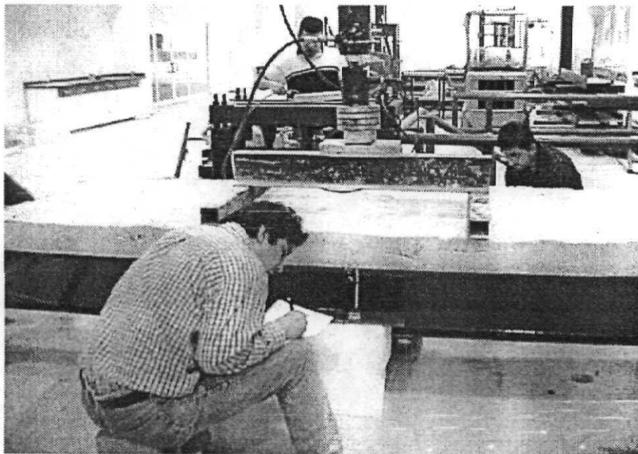


Foto 46. Registro de lecturas de deformación para los incrementos de carga

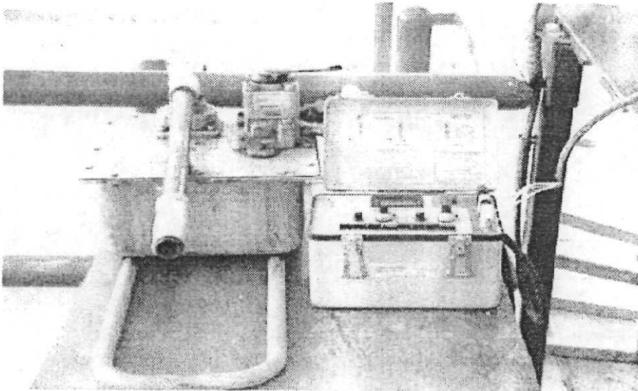


Foto 47. Dispositivo hidráulico y puente de Winston para celda de carga

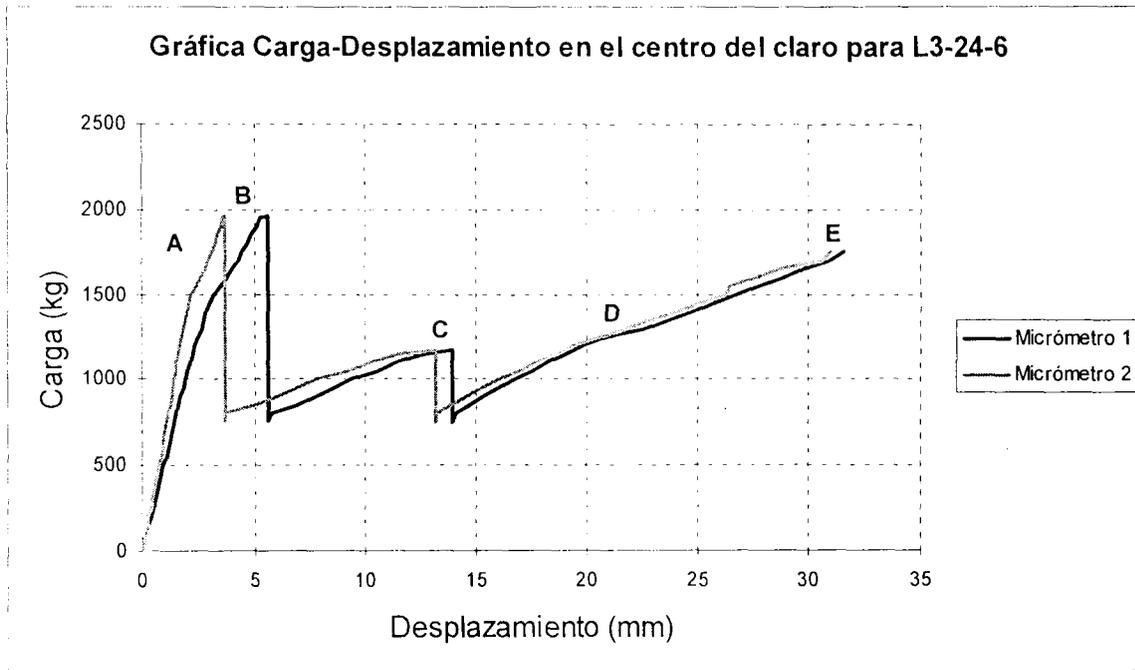


Figura 5.31. Gráfica P-Δ para L3-24-6

Bajo incrementos de carga de 50 kg, el comportamiento de la losa compuesta bajo la acción de cargas distribuidas a los tercios del claro del espécimen se describe a continuación:

La rigidez inicial se deberá obtener de la parte proporcional de la gráfica P-Δ, para este caso el valor correspondiente es de 6,566 kg/cm. Durante el proceso de carga se presenta el primer evento para una carga de 1550 kg, debido a la pérdida de adherencia entre los materiales de la losa compuesta (Punto **A**). A los 1964 kg, aparece el primer agrietamiento por flexión cerca del apoyo izquierdo, generando una caída en carga (de 1964 a 755 kg, Punto **B**) debido a la pérdida de rigidez del elemento. Siguiendo con el proceso de carga del modelo de prueba, un nuevo agrietamiento por flexión ocurre cerca del apoyo derecho del dispositivo de carga, por lo que una vez más la carga cae hasta los 750 kg (Punto **C**) debido a la pérdida de rigidez del espécimen. Partiendo de 750 kg, se observa que los desplazamientos en el sistema compuesto se incrementan de manera considerable para diferenciales de carga relativamente bajos (Punto **D**), debido a

que el sistema ha perdido adherencia y rigidez. Finalmente para una carga de 1750 kg (Punto **E**), el modelo de prueba llega a la falla ya que no existe la acción compuesta entre los materiales. El desplazamiento promedio en el centro del claro correspondiente a la carga de falla fue de 31.25 mm, de acuerdo a las lecturas de los micrómetros 1 y 2 implementados en la losa. La configuración al final de la prueba se muestra en la siguiente figura:

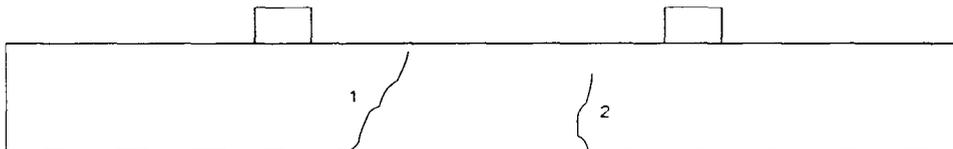


Figura 5.32. Configuración de falla para L3-24-6

5.4. Comparativa de Modelo Analítico vs. Pruebas Experimentales en la predicción del comportamiento y del desplazamiento límite del elemento compuesto.

Un modelo analítico surge de la necesidad de obtener las herramientas necesarias que nos ayude a predecir el comportamiento de un elemento compuesto y con ello establecer bases para el diseño de cualesquier elemento de este tipo. Para ello, se debe realizar un análisis detallado de todos los elementos que intervienen en el comportamiento experimental (rango elástico, agrietamiento, pérdida de adherencia, etc), y así poder relacionar los parámetros adecuados con las teorías correspondientes y obtener resultados más precisos.

Como anteriormente fue descrito, a cada uno de los especímenes probados en el laboratorio se realizó un análisis inelástico del elemento compuesto para la obtención del desplazamiento límite del elemento de manera analítica, dicho análisis considera como fuentes de contribución al desplazamiento a los esfuerzos producidos por la flexión y por la pérdida de adherencia entre los materiales que típicamente se produce en este tipo de elementos de lámina y concreto.

A continuación se presentan una serie de Figuras (5.33 a 5.48), de las comparativas de cada losa, con los diferentes modelos analíticos empleados en la predicción del comportamiento y del desplazamiento límite de elementos compuestos de lámina y concretos de anhidrita.

Posteriormente la Tabla 5.3, muestra los resultados de los desplazamientos obtenidos en la etapa experimental y analítica para el mejor modelo del proceso de investigación.

Finalmente, la Figura 5.49 muestra la dispersión de los resultados obtenidos los modelos analíticos con respecto a las pruebas experimentales:

5.4.1.- Resultados de Modelos Analíticos empleados en la predicción del comportamiento y del desplazamiento límite de los elementos compuestos.

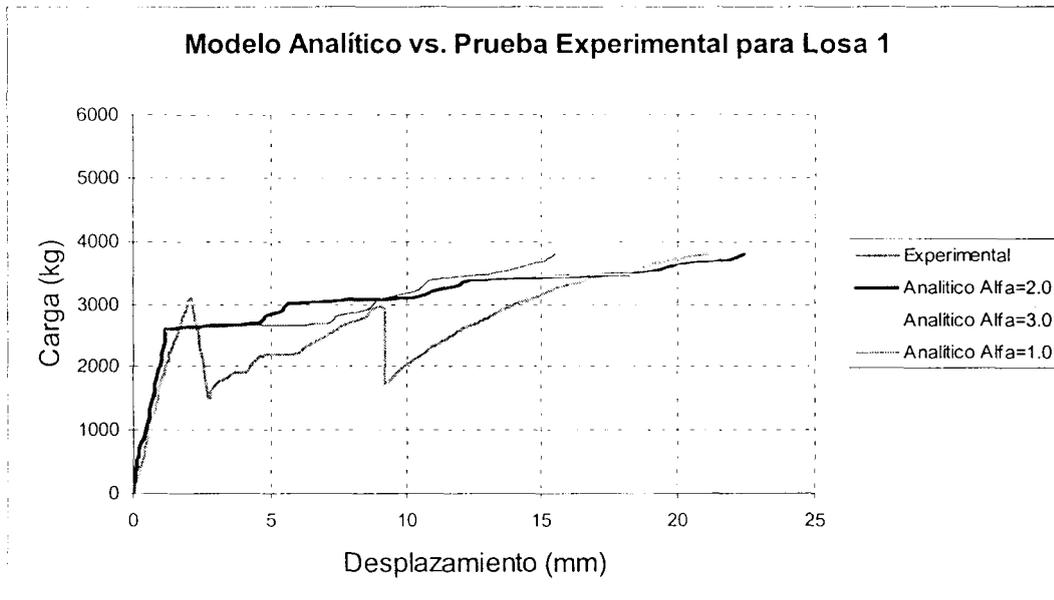


Figura 5.33.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 1.

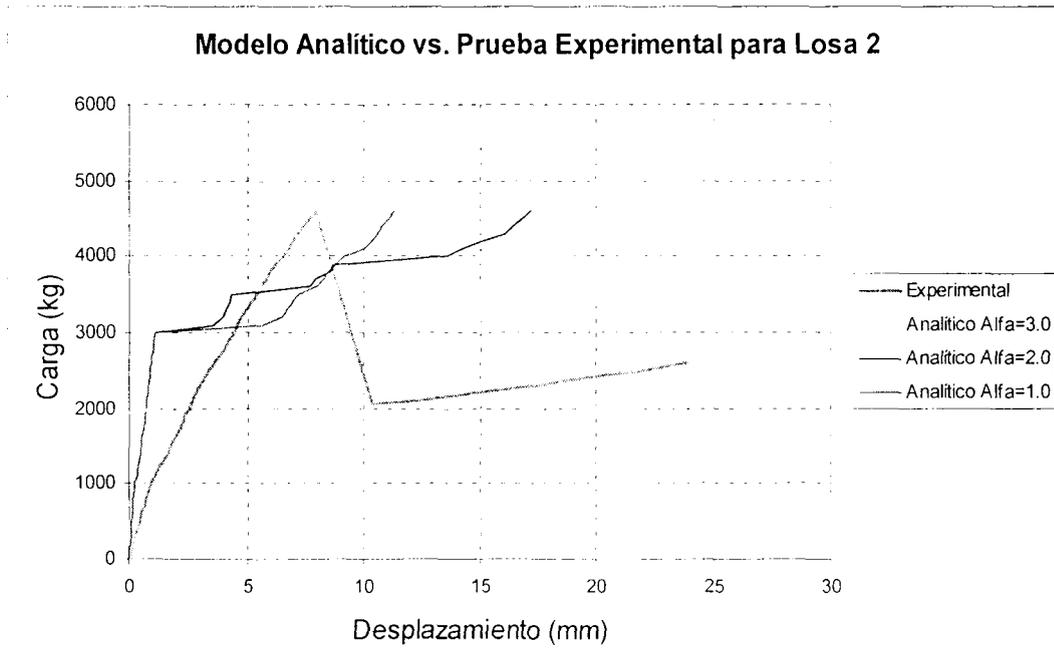


Figura 5.34.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 2.

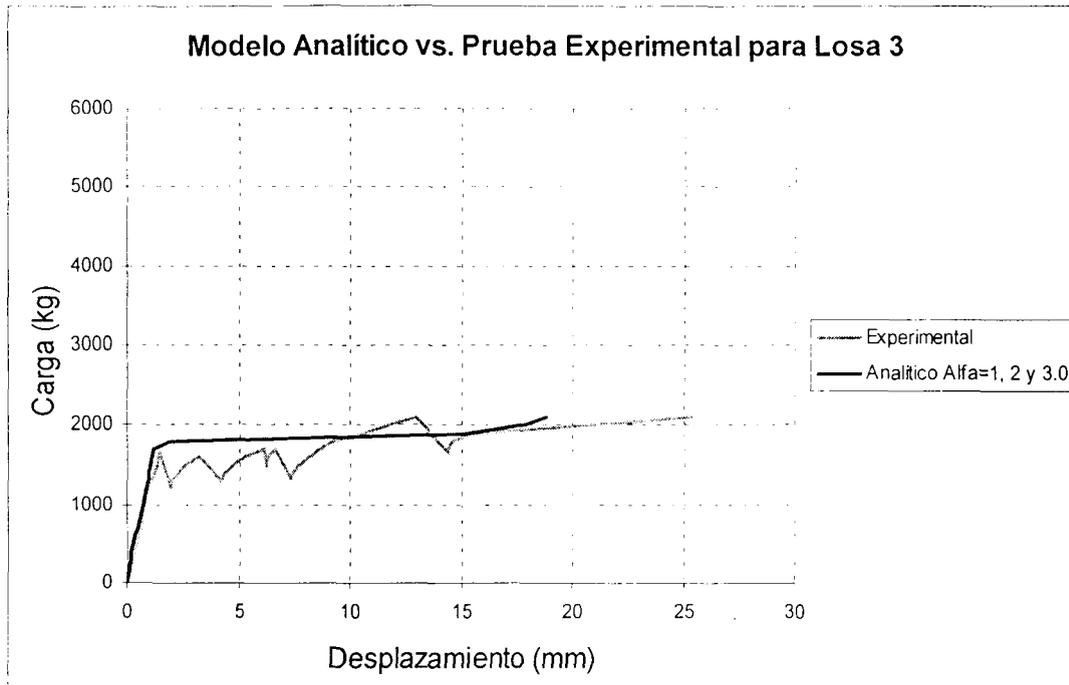


Figura 5.35.- Comparativa de modelos analíticos para losa 3.

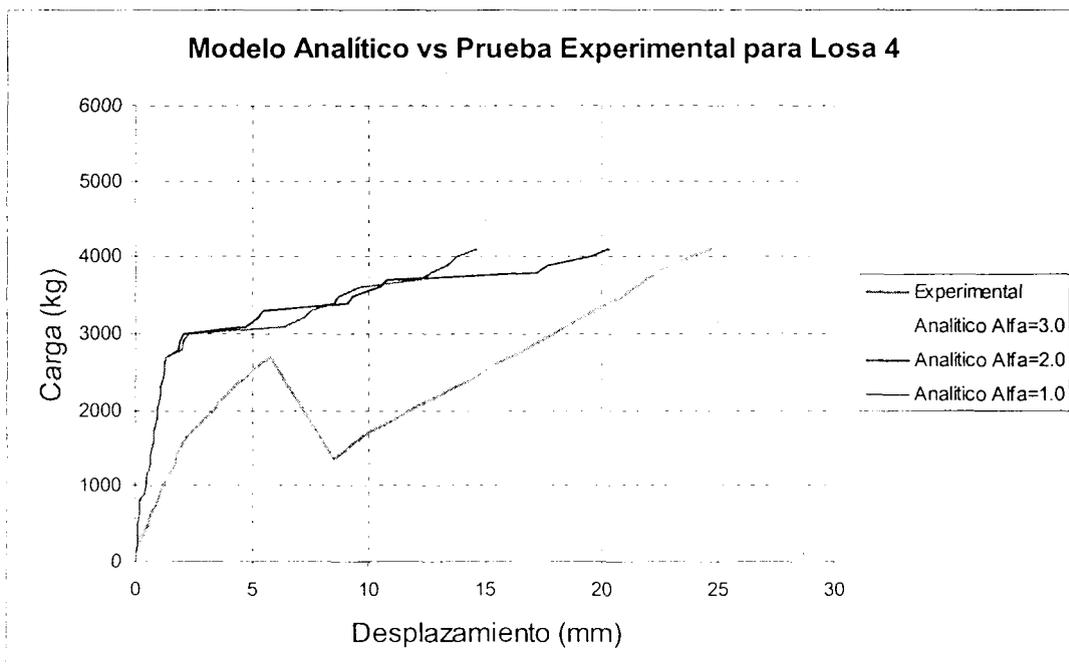


Figura 5.36.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 4.

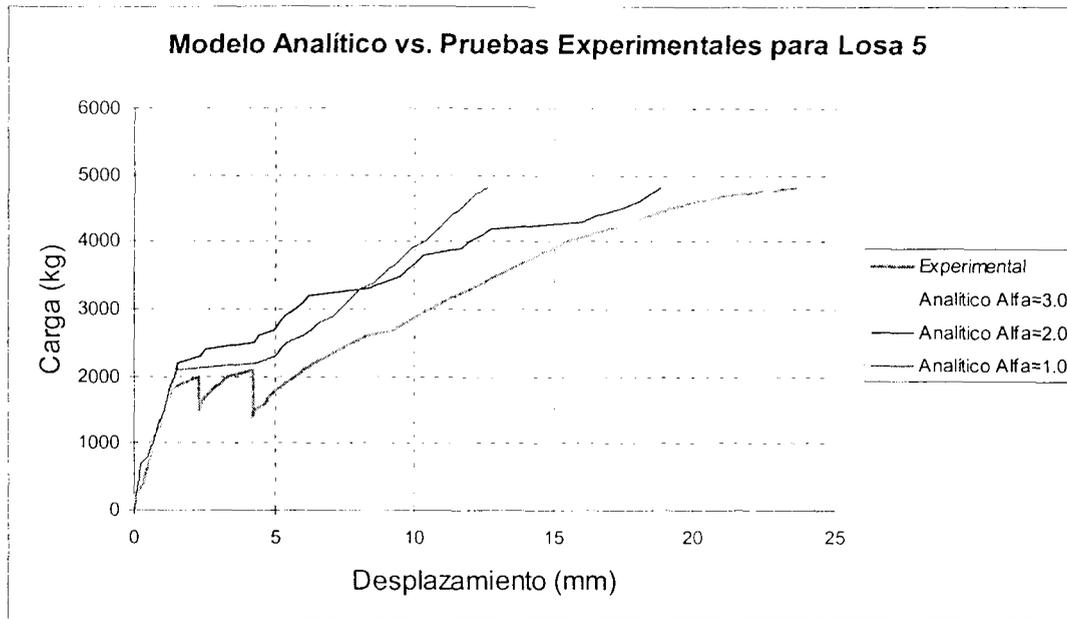


Figura 5.37.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 5.

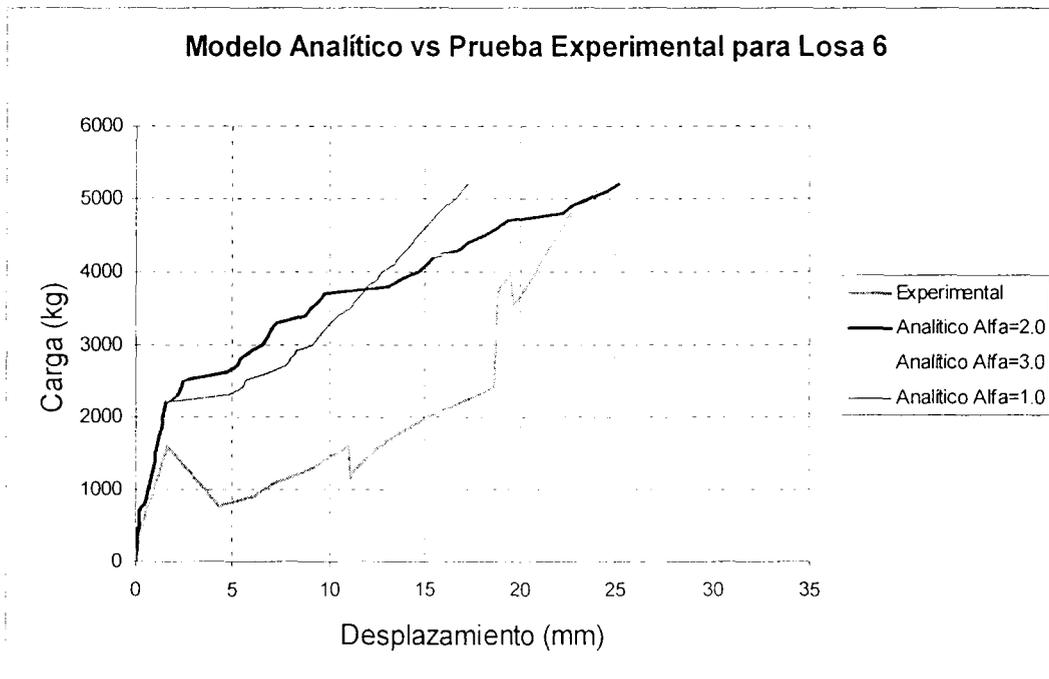


Figura 5.38.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 6.

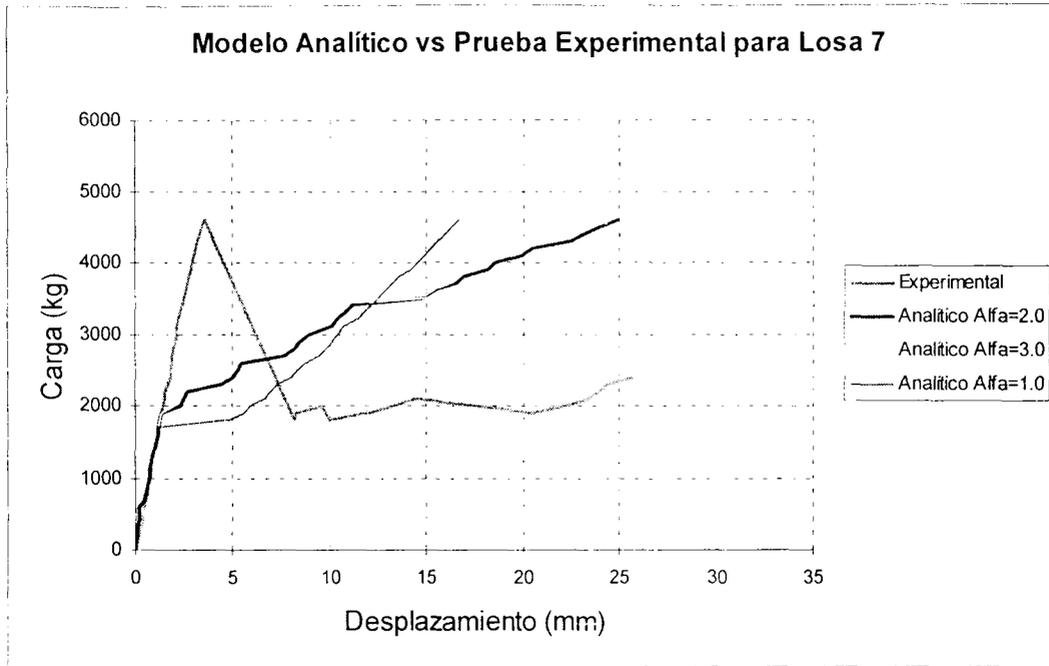


Figura 5.39.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 7.

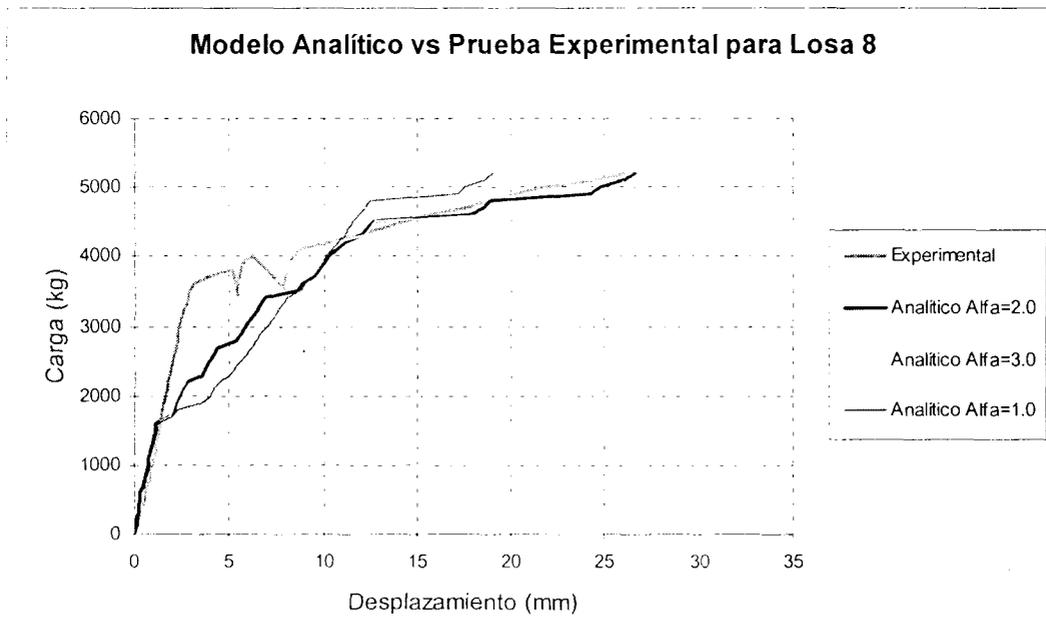


Figura 5.40.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 8.

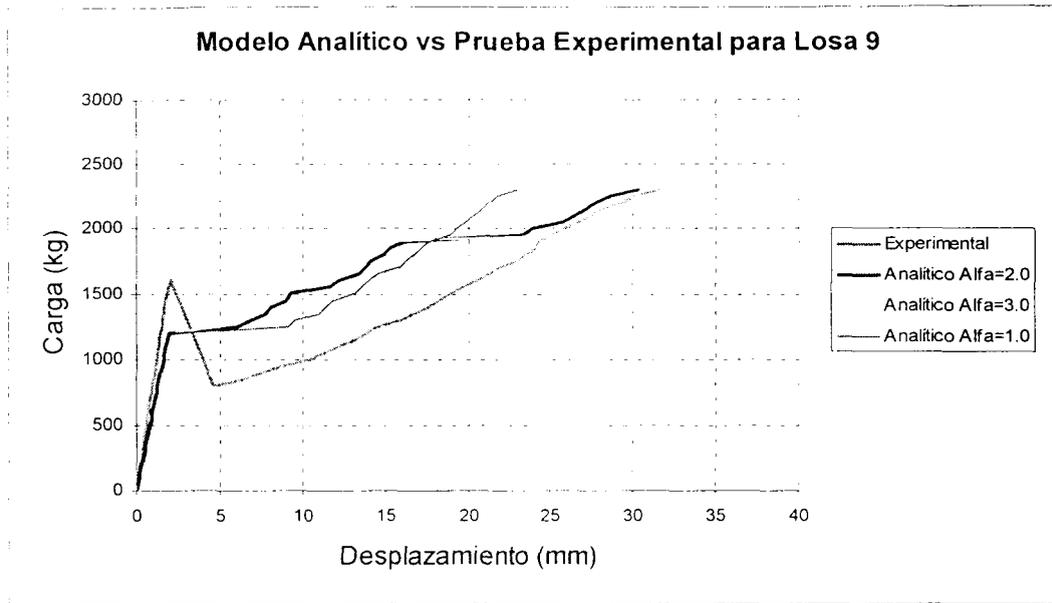


Figura 5.41.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 9.

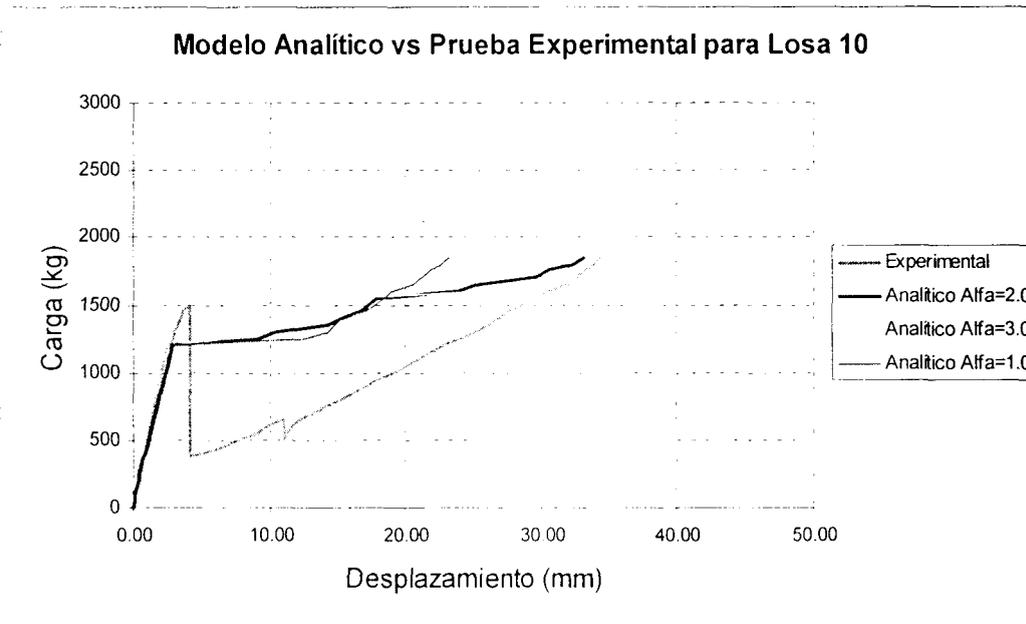


Figura 5.42.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 10.

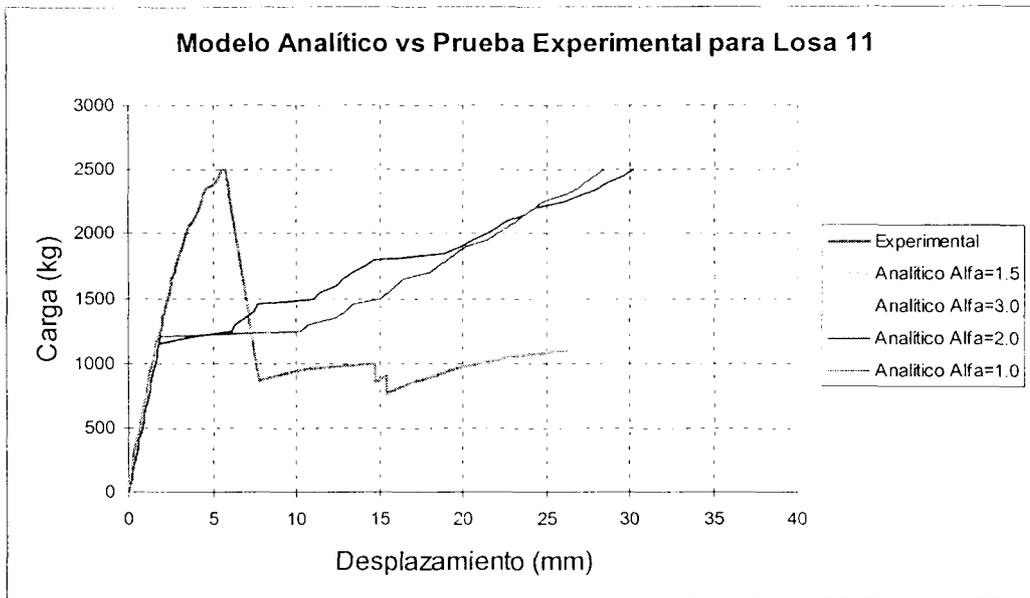


Figura 5.43.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 11.

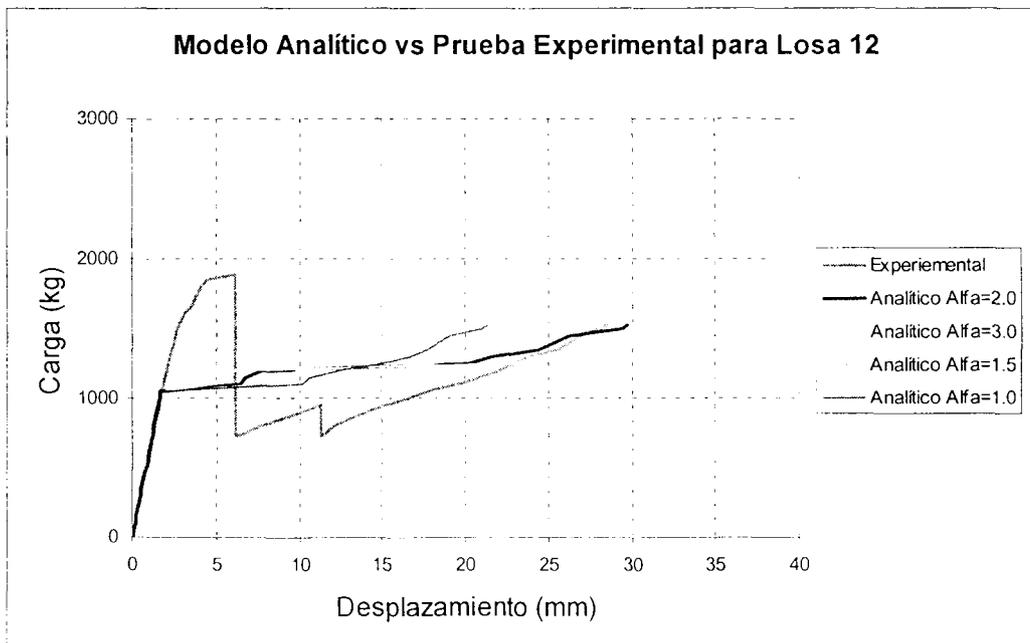


Figura 5.44.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 12.

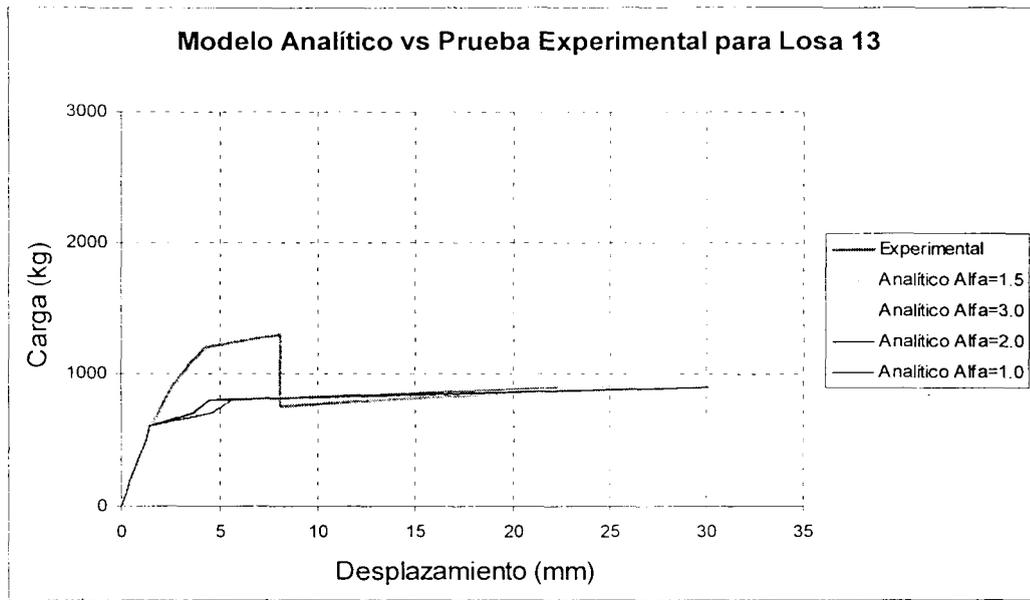


Figura 5.45.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 13.

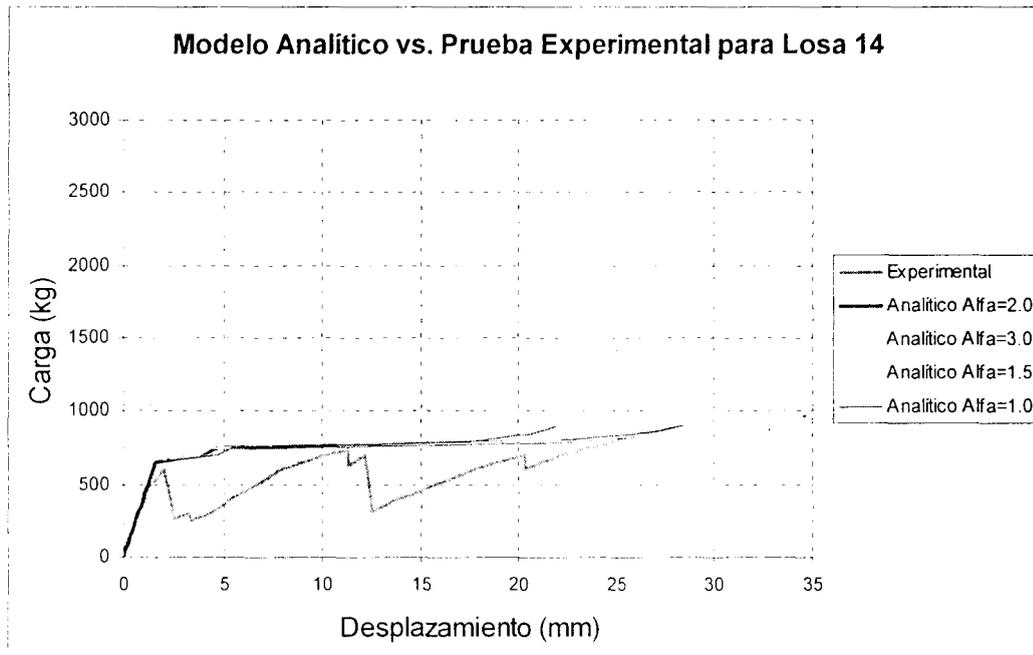


Figura 5.46.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 14.

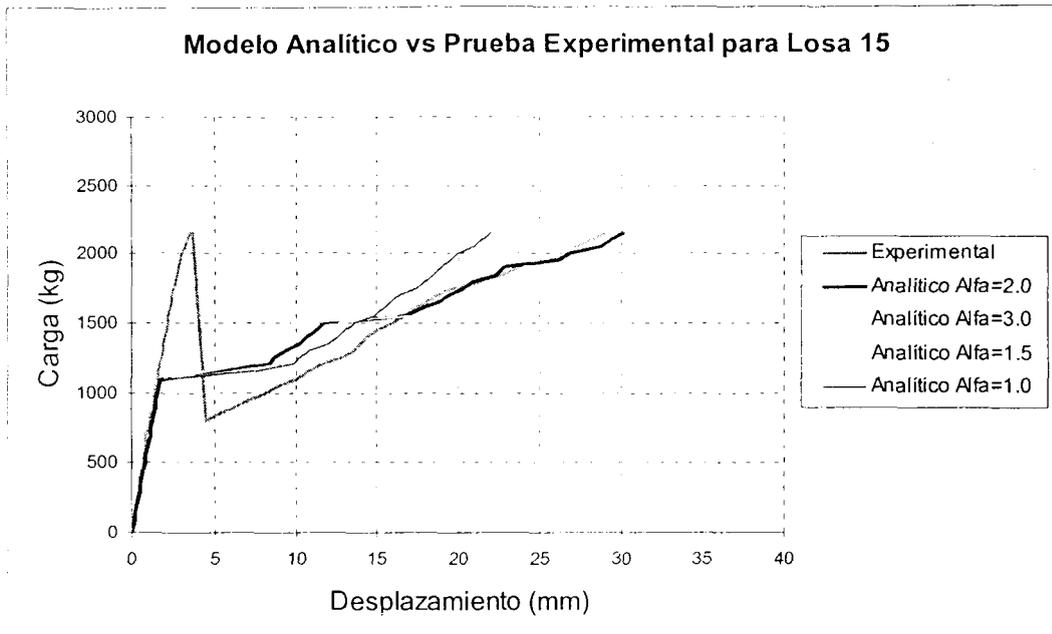


Figura 5.47.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 15.

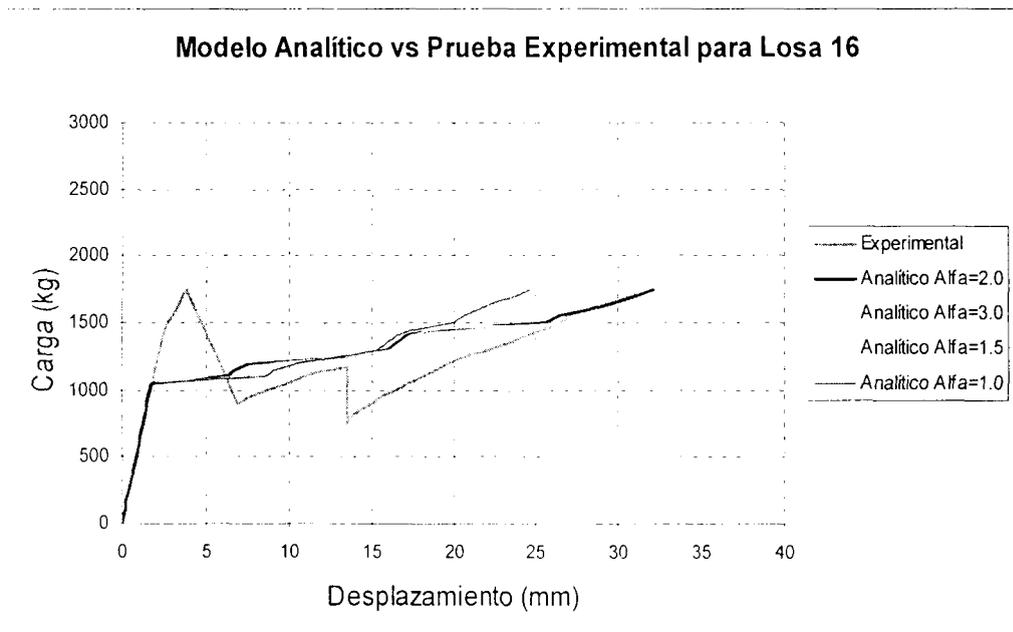


Figura 5.48.- Comparativa de los modelos analíticos para losa 16.

Losa	Calibre	f'c (kg/cm ²)	$\Delta m_{\alpha=1.0}$ (mm)	$\Delta m_{\alpha=1.5}$ (mm)	$\Delta m_{\alpha=2.0}$ (mm)	$\Delta m_{\alpha=3.0}$ (mm)	Δ_{exp} (mm)	$\Delta m / \Delta_{exp}$
1	18	177	15.49	-----	22.37	23.48	21.04	1.06
2	18	259	11.29	-----	17.20	21.85	23.43	0.93
3	20	100	18.85	-----	18.85	18.85	25.43	0.74
4	20	268	14.60	-----	20.31	27.13	24.72	1.10
5	22	130	12.62	-----	18.82	22.83	23.55	0.97
6	22	170	17.28	-----	25.13	32.64	24.43	1.03
7	24	117	16.69	-----	24.89	32.19	25.70	0.97
8	24	105	18.97	-----	26.58	32.72	26.15	1.02
9	18	284	22.92	26.54	30.24	36.07	31.58	0.96
10	18	276	23.14	27.37	33.11	43.62	34.32	0.96
11	20	303	28.45	26.45	30.21	36.94	26.22	1.01
12	20	303	21.30	26.17	29.78	34.21	28.49	1.05
13	22	136	22.28	27.05	30.09	32.68	25.34	1.07
14	22	120	21.89	26.08	28.39	28.59	28.42	1.00
15	24	313	21.99	26.56	30.17	36.36	28.99	1.04
16	24	301	24.55	28.88	32.08	36.19	31.25	1.03

Tabla 5.3. Desplazamientos Límites Analíticos vs Experimentales

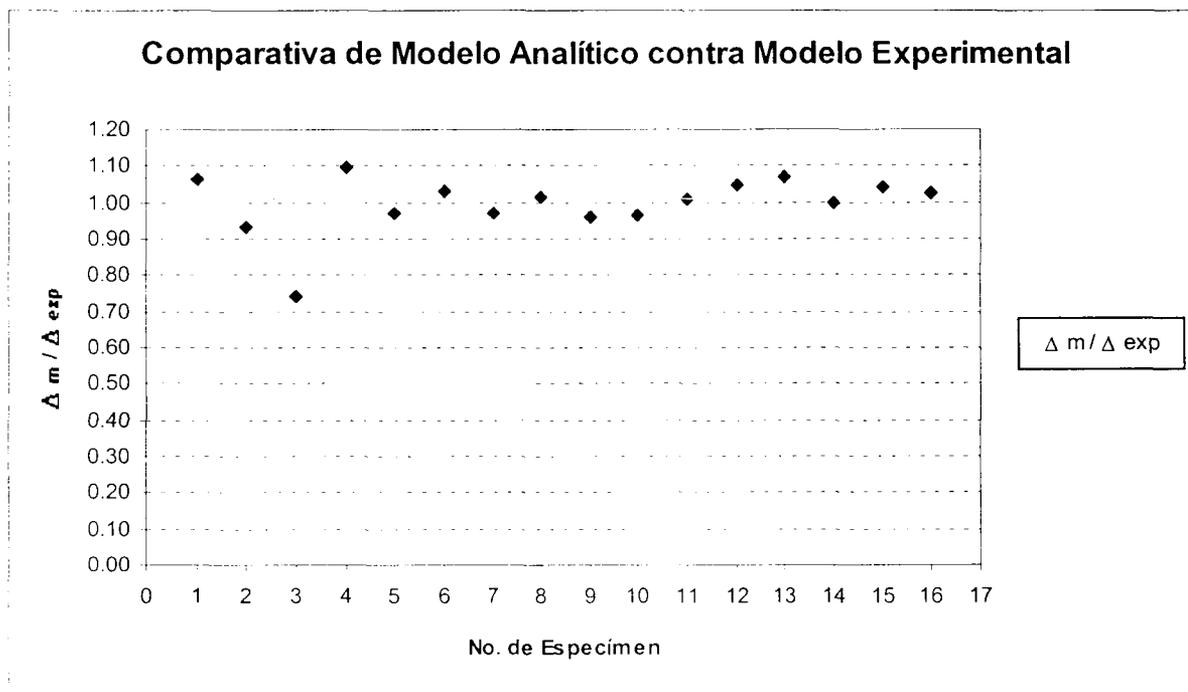


Figura 5.49. Comparativa de Modelo Analítico contra Modelo Experimental

Como podemos observar el Modelo Analítico propuesto predice de manera adecuada en valor del desplazamiento límite del elemento compuesto teniendo un porcentaje de error menor a $\pm 10\%$ para la mayoría de los casos en estudio.

5.5. Comparativa de Cortantes Experimentales contra Cortantes Teóricos basados en el reglamento de la ASCE.

Las pruebas de adherencia por corte son importantes, ya que a partir de ellas obtenemos los coeficientes de diseño "m" y "k" para la predicción de la capacidad de carga por corte de un elemento compuesto a base de lámina y concreto.

Para cada calibre de lámina empleado (18, 20, 22 y 24) en la etapa experimental, se deberá realizar la gráfica que típicamente la ASCE propone para elementos compuestos. En esta gráfica "m", quedará definido por el valor de la pendiente de la recta producto de la regresión lineal para los valores de las regiones A y B. El valor de "k", queda definido por el intercepto de la gráfica. Los resultados de cada uno de los calibres se muestran a continuación:

1. Obtención de "m" y "k" para Calibre 18

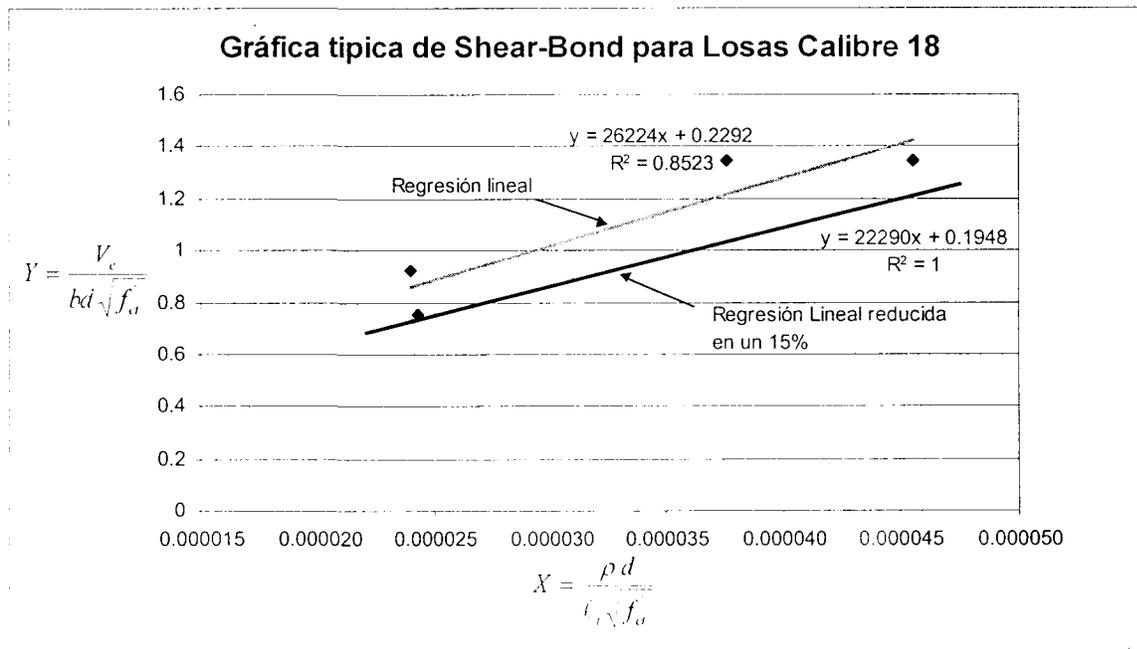


Figura 5.50.-Gráfica típica de Shear-Bond para especímenes calibre 18

2. Obtención de "m" y "k" para Calibre 20

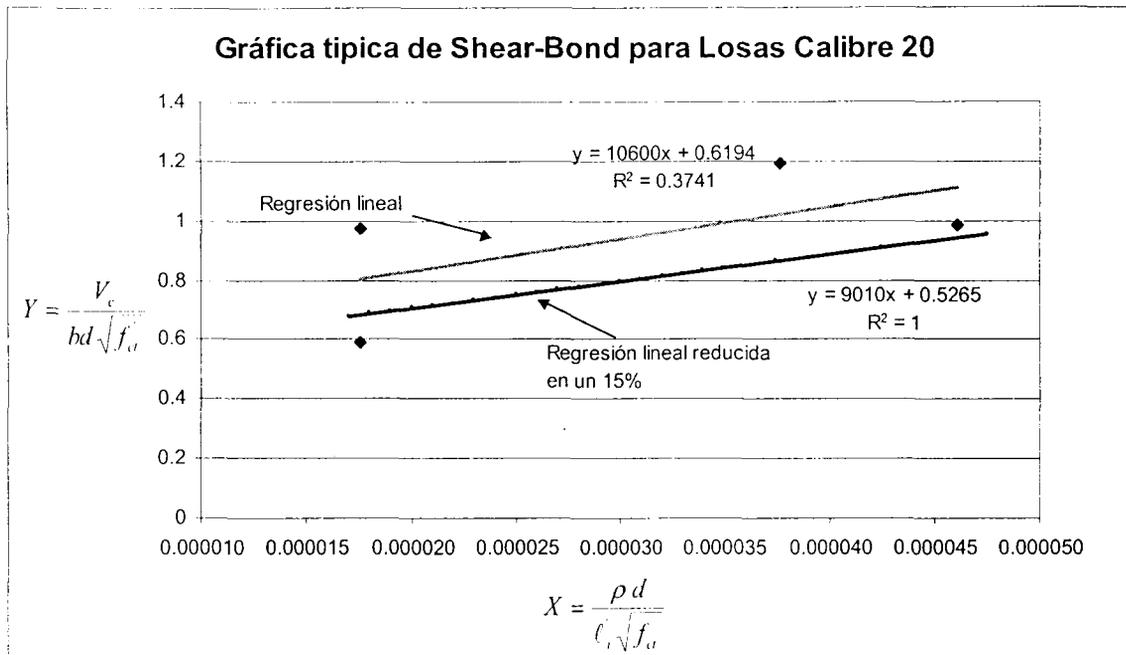


Figura 5.51. Gráfica típica de Shear-Bond para especímenes calibre 20

3. Obtención de "m" y "k" para Calibre 22

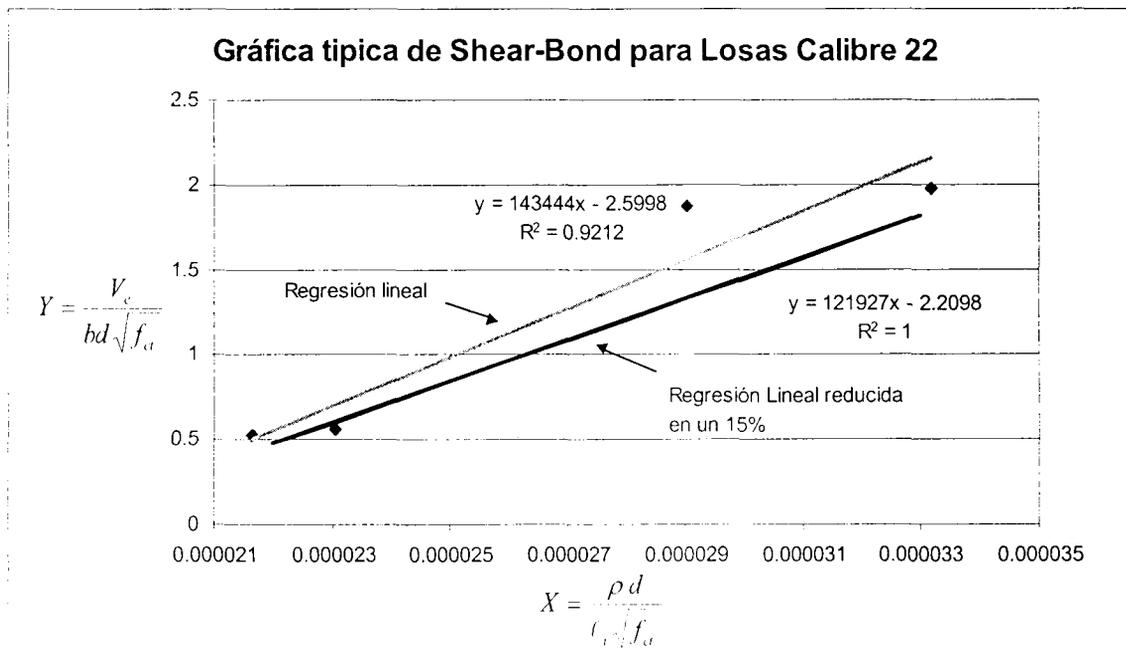


Figura 5.52. Gráfica típica de Shear-Bond para especímenes calibre 22

4. Obtención de "m" y "k" para Calibre 24

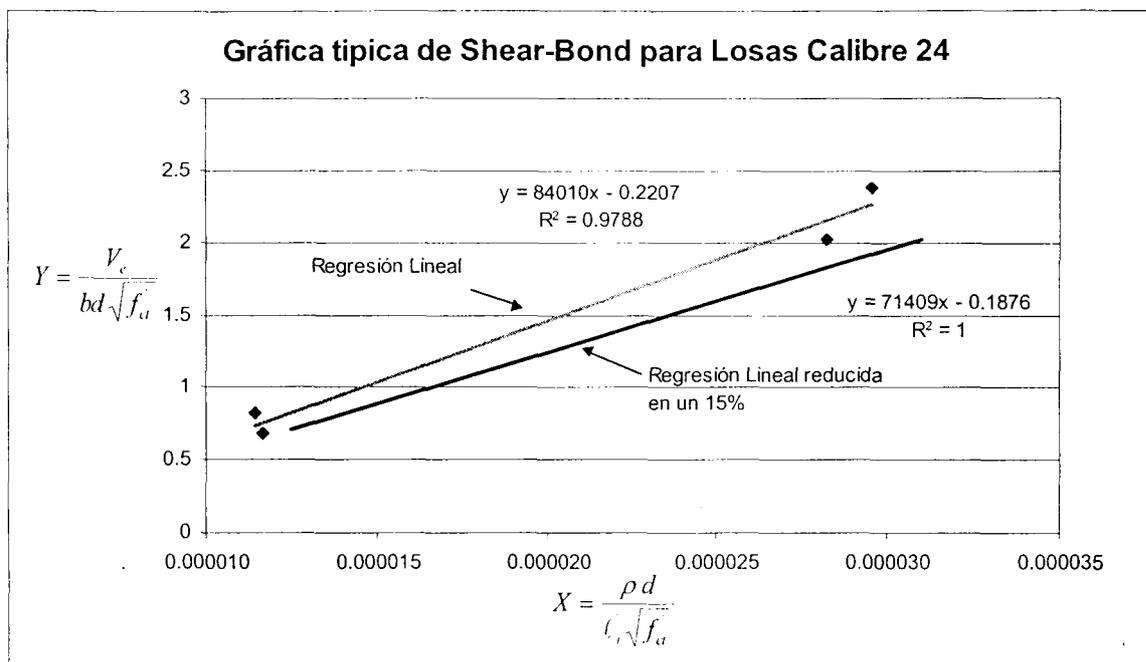


Figura 5.53. Gráfica típica de Shear-Bond para especímenes calibre 24

A continuación se muestran los resultados para cada calibre en la Tabla 5.4:

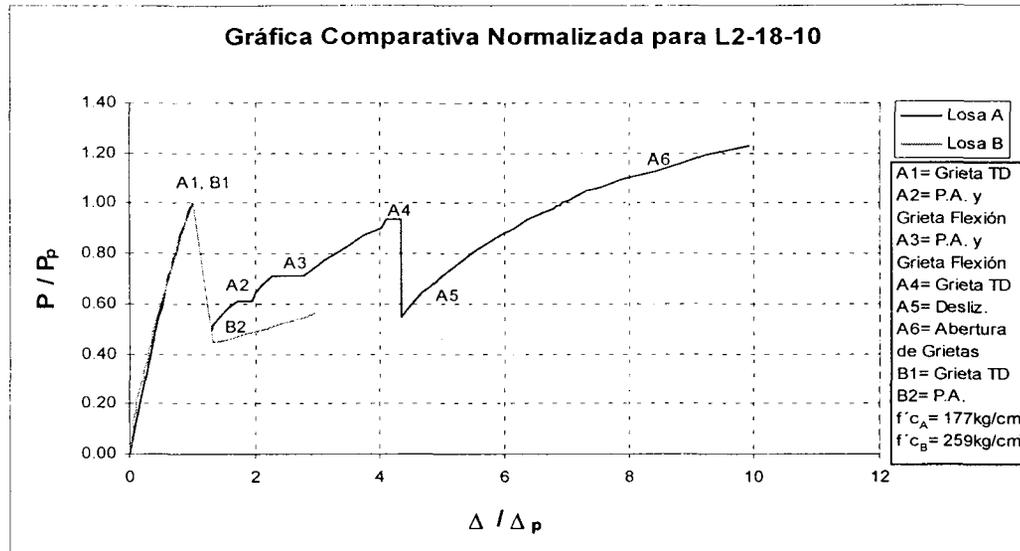
Calibre	m	k
18	26224	0.229
20	10600	0.619
22	143444	-2.600
24	84010	-0.221

Tabla 5.4. Coeficientes para el cálculo de ϕV_n de elementos compuestos

Los valores de la tabla anterior, muestran una tendencia similar a los obtenidos de pruebas de concreto reforzado [24], donde se observa que los valores de "k", pasan a de signo positivo a negativo y los valores de "m", van aumentando en cierta manera con respecto el calibre disminuye.

5.6. Comparativa de Comportamientos en Especímenes de Prueba

Losas 2m, calibre 18 y 10 cm sobre la cresta



5.54.- Gráfica Comparativa Normalizada para L2-18-10.

En la etapa inicial de la prueba experimental, sea esta desde $P = 0$ hasta $P = P_p$, el comportamiento entre los dos especímenes de prueba se muestra muy similar. En ambos casos, se presenta un agrietamiento en tensión diagonal bajo el apoyo derecho del dispositivo transmisor de carga y con ello una fuerte caída en la rigidez es acompañada en el elemento compuesto.

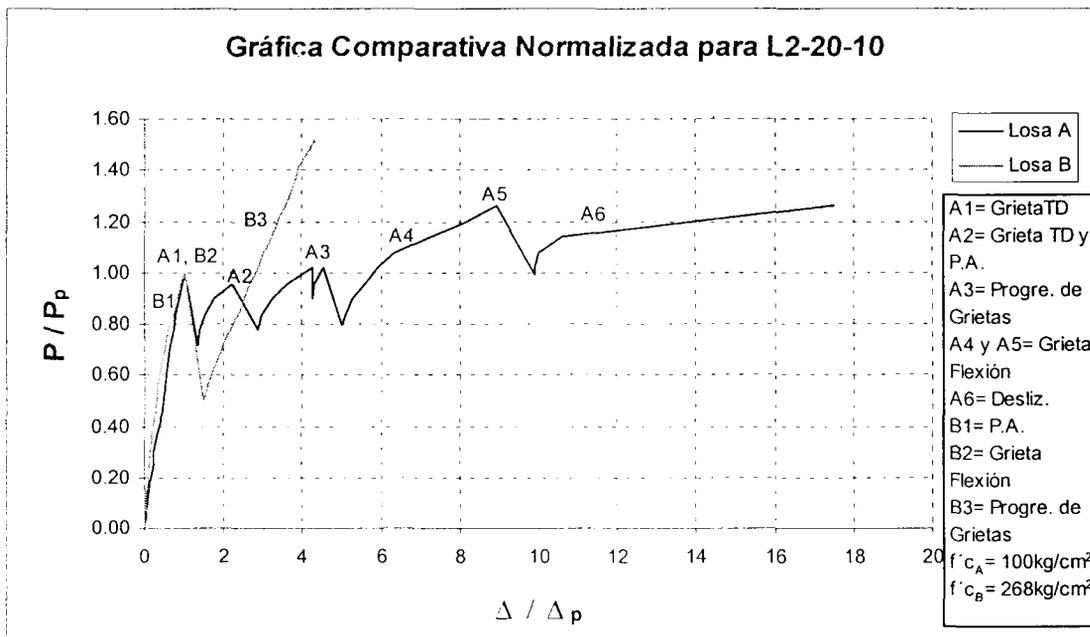
Una vez agrietados los elementos compuestos, producto de los esfuerzos cortantes debido a las cargas, el anclaje mecánico-químico entre los materiales (acero y concreto) se convierte en una fuente importante de resistencia del elemento compuesto y permite que el elemento continúe tomando las acciones impuestas. En el elemento **A** se puede observar que la buena adherencia entre los dos materiales permite que el elemento continúe tomando carga a pesar de estar agrietado. A diferencia del elemento **B**, donde la pérdida de adherencia generada en el agrietamiento ocasionó que el elemento no sea capaz de tomar grandes cantidades de carga posteriores al agrietamiento.

El esfuerzo que provocó el agrietamiento en tensión diagonal para el elemento **B**, también excedió los esfuerzos límites de adherencia entre los materiales y con ello

el corrimiento entre los materiales se hace presente, deformándose el elemento considerablemente para incrementos de carga pequeños hasta llegar a la falla producto de la pérdida de acción compuesta entre la lámina y el concreto.

Por otro lado el elemento **A**, después del agrietamiento en tensión diagonal se genera una pérdida de adherencia en la parte central del elemento y con ello aparecen grietas en flexión al no existir la acción compuesta entre los materiales, el concreto trabaja por si solo y cualquier esfuerzo que excede al M_{cr} , originará una grieta en flexión. Una vez agotada la resistencia en la parte central del elemento los esfuerzos debido a las cargas generan un agrietamiento en tensión diagonal bajo el apoyo izquierdo y con ello una pérdida de rigidez en el elemento. Finalmente, el anclaje mecánico debido a la resistencia del concreto sobre el estampado de la lámina permite que el elemento compuesto continúe tomando cargas hasta que los esfuerzos exceden a los permisibles por adherencia y se pierda la acción compuesta.

Losas 2m, calibre 20 y 10 cm sobre la cresta



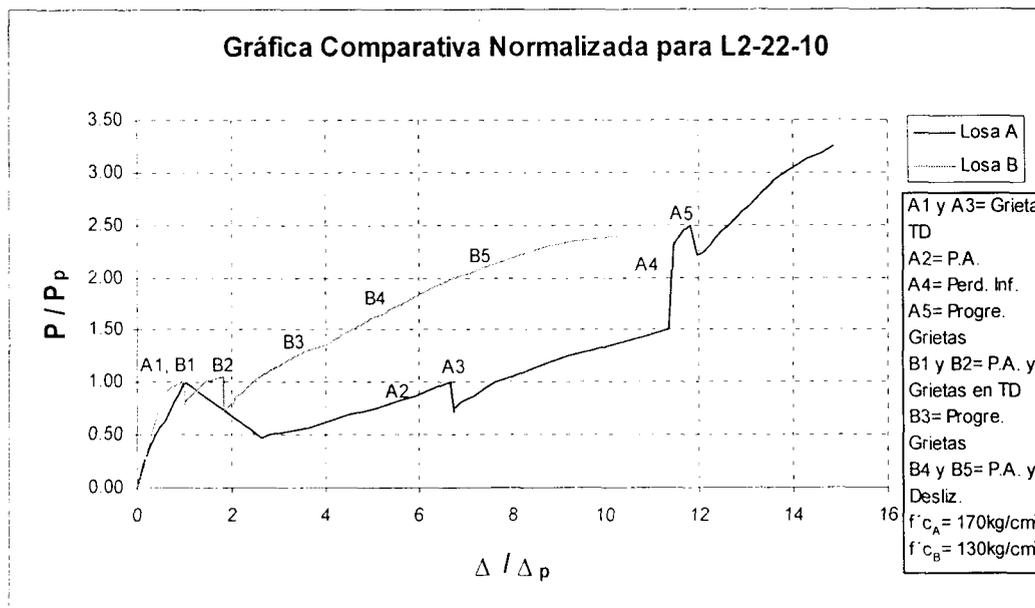
5.55.- Gráfica Comparativa Normalizada para L2-20-10.

Las diferencias en la etapa inicial entre los especímenes **A** y **B**, se debe a las pequeñas pérdidas de adherencia en el elemento **B** antes de llegar a P_p . El PEP

(Primer suceso de importancia sobre la losa) en el elemento **B** experimenta una caída más grande en la rigidez del elemento debido a que P_p fue mucho mayor que para el elemento **A** y existía una mayor concentración de energía antes del agrietamiento.

Posteriormente al PEP, sucede algo similar que en el calibre 18, pero en este caso la adherencia entre los materiales para la losa **B** permite que el elemento continúe tomando cargas hasta presentarse una progresión del agrietamiento y corrimiento entre los materiales. Aquí se vuelve a notar la importancia de la adherencia mecánica-química entre los materiales, lo cual contribuyen a tomar acciones en el elemento compuesto de manera considerable después del agrietamiento. Dicho fenómeno es función del $f'c$, de la cantidad de masa de concreto sobre la superficie del refuerzo principal y de la densidad del estampado del acero de refuerzo. A diferencia del elemento **A**, que debido al comportamiento mostrado gráficamente indica que la adherencia mecánica-química entre los materiales no fue tan resistente respecto al elemento **B** debido al bajo $f'c = 100\text{kg/cm}^2$. Esto genera zonas débiles y potenciales para el agrietamiento.

Losas 2m, calibre 22 y 10 cm sobre la cresta



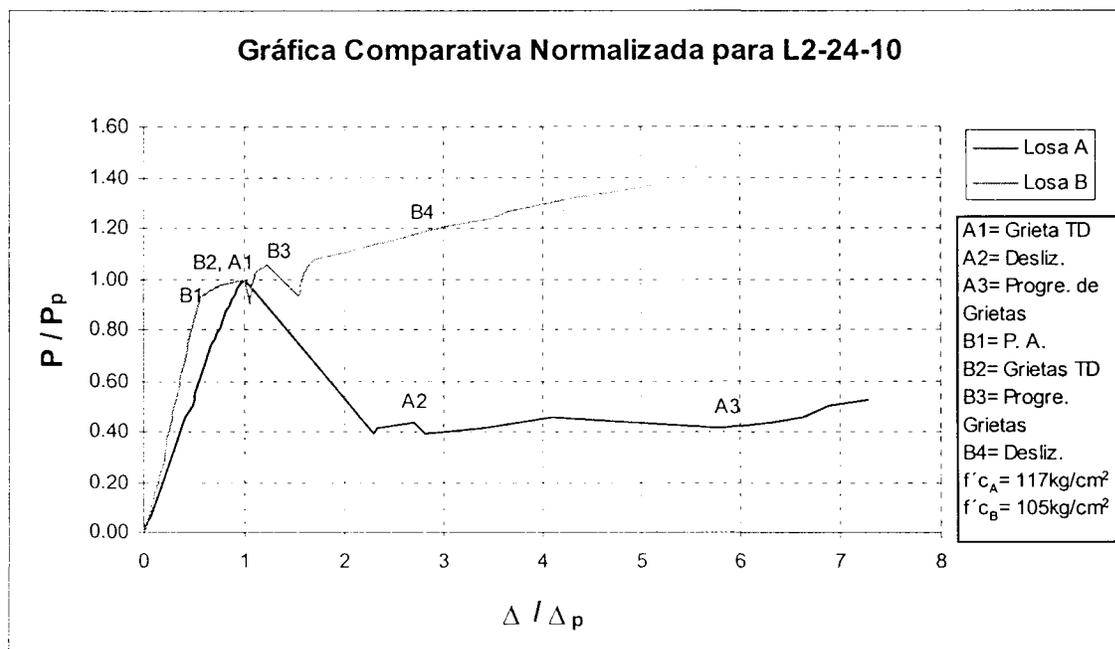
5.56.- Gráfica Comparativa Normalizada para L2-22-10.

Las diferencias en la primera etapa se deben a pequeñas pérdidas de adherencia entre los materiales del elemento **B**.

El PEP trae para la losa **A** una caída más grande en la rigidez del elemento debido a la pérdida de adherencia química entre los materiales al ocurrir el agrietamiento en tensión diagonal. También se observa un mayor desplazamiento en el elemento debido a las mismas causas. Después del PEP, ambos elementos continúan tomando carga y se vuelven agrietar, solo que en la losa **A**, se registra una mayor deformación debido a la pérdida de adherencia entre los materiales, algo que no ocurre en la losa **B**.

Después del segundo agrietamiento en la losa **B**, al anclaje mecánico le proporciona una resistencia al elemento compuesto lo que permite que el elemento se deforme y siga tomando carga hasta llegar a la falla. En el caso de la losa **A**, también este anclaje le proporciona la rigidez necesaria para continuar con el proceso de carga hasta llegar a la falla producida por el corrimiento entre los materiales.

Losas 2m, calibre 24 y 10 cm sobre la cresta



5.57.- Gráfica Comparativa Normalizada para L2-24-10.

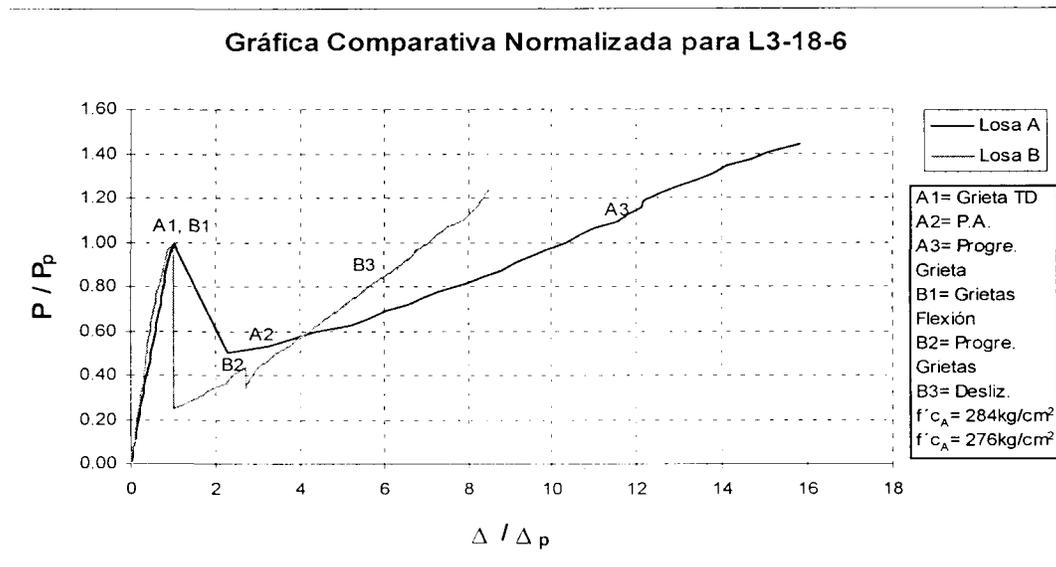
La diferencia entre los comportamientos de la primera etapa se deben a que la losa **B**, se observaron pequeñas pérdidas de adherencia entre los materiales.

Ambos agrietamientos en la primera etapa fueron producto de la tensión diagonal generado por el cortante y el momento flector.

Para el elemento **A**, al agrietamiento en tensión diagonal fue seguido por una pérdida de adherencia entre la lámina y el concreto, lo cual provocó que se perdiera el anclaje mecánico y por lo tanto la acción compuesta entre ellos, para estas condiciones del elemento para incrementos pequeños de carga se observa grandes deformaciones y progresiones en el agrietamiento, ya que la única fuente de unión entre los materiales es la fricción entre los mismos para transmitir los esfuerzos cortantes que se generan debido a las cargas.

Para el elemento **B**, una vez agrietado se observa una serie de agrietamientos en la masa de concreto la cual se debió como anteriormente fue descrito a los problemas que se tuvieron en la elaboración de este espécimen, creando zonas potenciales de falla pero a la vez, estas sirvieron para distribuir la energía impuesta por las acciones. Tal efecto reflejo un buen comportamiento en cuanto a carga se refiere, pero obviamente para condiciones de servicio son inadecuados.

Losas 3m, calibre 18 y 6 cm sobre la cresta



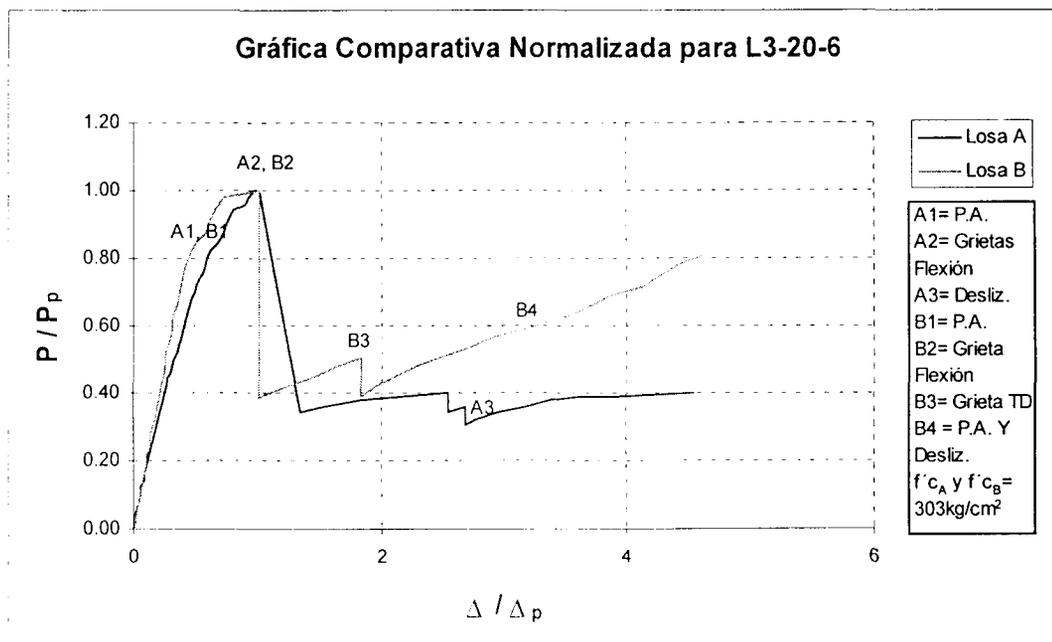
5.58.- Gráfica Comparativa Normalizada para L3-18-6.

En la etapa inicial del comportamiento no se muestran cambios apreciables en los especímenes **A** y **B**.

Cuando ocurre el PEP, para la losa **B**, existe una mayor caída en la rigidez en el elemento compuesto y esto es debido se presentaron 2 agrietamientos por flexión en el elemento compuesto lo cual generó una mayor pérdida en la rigidez del elemento. Caso contrario para la losa **A**, en la cual hubo un agrietamiento en tensión diagonal y por tanto no se vio afectada la rigidez de manera tan significativa como para la losa **B**.

En ambos casos después del agrietamiento, la adherencia mecánica-química entre los materiales es la fuente principal de resistencia en el elemento compuesto. Se observa en el elemento **A** pequeñas pérdidas de adherencia entre los materiales después del agrietamiento y posterior a ellos las deformaciones incrementan de manera considerable para incrementos de carga pequeños. Finalmente se presentan deslizamientos entre los materiales de la losa para los elemento **A** y **B**, ocurriendo la falla de los elementos al no existir la acción compuesta entre los materiales.

Losas 3m, calibre 20 y 6 cm sobre la cresta

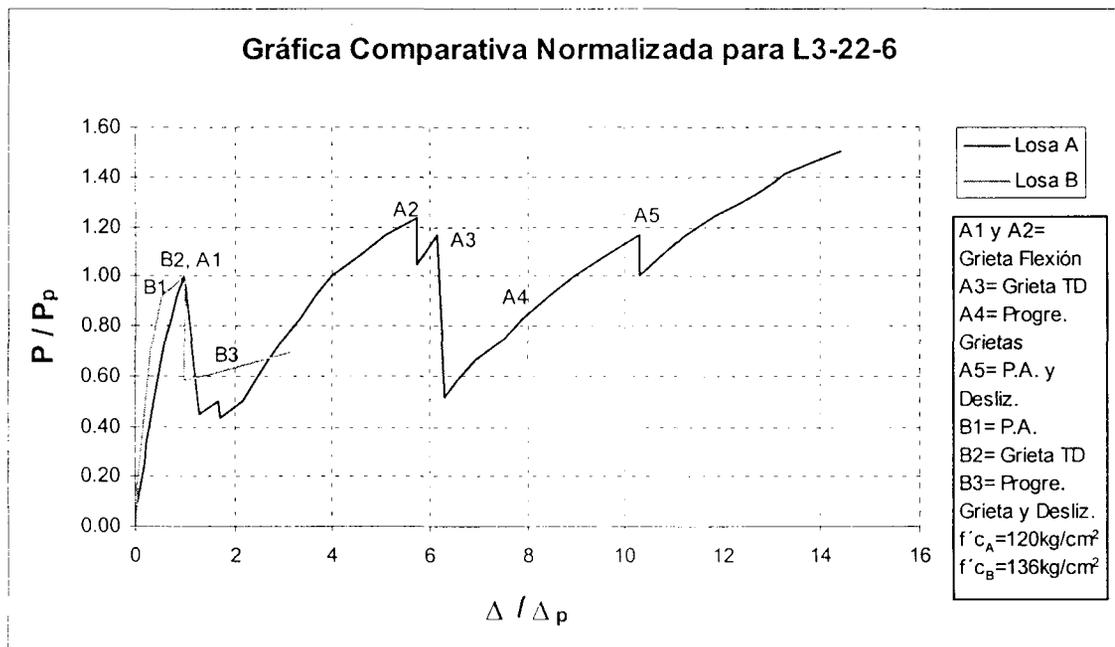


5.59.- Gráfica Comparativa Normalizada para L3-20-6.

Para este calibre las diferencias entre comportamientos se debió a los pequeños deslizamientos en los materiales de ambos elementos, es decir la adherencia química que existe entre los materiales se va perdiendo.

Debido a que el espécimen **A**, acepta mayor carga respecto al espécimen **B**, se espera que la caída en la rigidez de este elemento sea mayor por la concentración de energía en los materiales producto de las cargas, es por ello la diferencia entre los puntos donde existe una caída en la rigidez de los elementos después de ocurrir el PEP. Adicionalmente en el elemento **A** se observaron mayores pérdidas antes del PEP respecto a la losa **B**, motivo por el cual al agrietarse el elemento **A**, la acción compuesta entre la lámina y el concreto es afectada considerablemente, y con ello ya no sea capaz de seguir soportando mas carga, registrándose grandes deformaciones para ΔP pequeños hasta llegar a la falla. En cambio para el elemento **B**, la pérdida de adherencia entre los materiales no fue de gran aprecio, ya que después del agrietamiento el elemento pudo seguir aceptando carga debido al anclaje mecánico entre el concreto y el estampado de la lámina de acero.

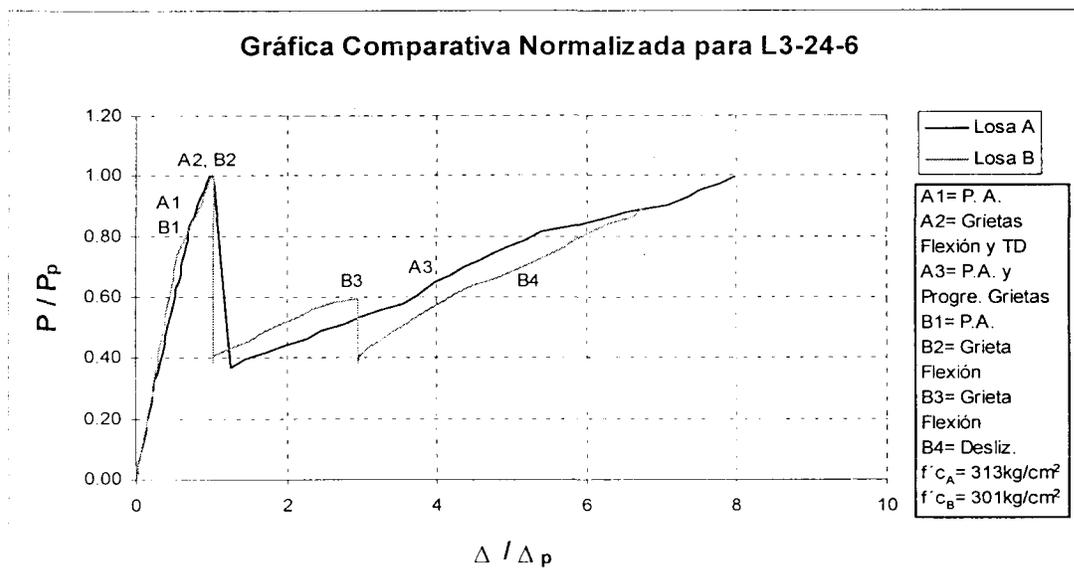
Losas 3m, calibre 22 y 6 cm sobre la cresta



5.60.- Gráfica Comparativa Normalizada para L3-22-6.

De igual manera las diferencias entre los comportamientos en la etapa inicial, se deben a las pequeñas pérdidas de adherencia entre los materiales de la losa **B** y esto nos da la explicación a dos cosas, la primera es debido a que la carga del PEP es mayor que para la losa **A**, se podría esperar una mayor caída en la rigidez del elemento. Sin embargo, los deslizamientos observados antes del PEP fueron una fuente de disipación de energía del elemento compuesto y por ellos no hubo tan drástica caída en la carga del elemento como se esperaba. La segunda cuestión es que debido a que los deslizamientos son seguidos por el agrietamiento en el elemento origina que la losa pierda casi en su totalidad la acción compuesta. Esto se ve reflejado en la poca capacidad de carga que el elemento es capaz de soportar y los grandes incrementos de deformaciones para incrementos de carga pequeños. Posterior al agrietamiento en el elemento **A**, el anclaje mecánico empieza a realizar su función como fuente de absorción de energía y por tal motivo el elemento continúa aceptando carga hasta que aparece una nueva grieta por flexión, seguido por otro mas en tensión diagonal y pérdidas de adherencia entre los materiales de la losa. Finalmente, se presenta la pérdida de acción compuesta en el elemento llegando así a la falla.

Losas 3m, calibre 24 y 6 cm sobre la cresta



5.61.- Gráfica Comparativa Normalizada para L3-24-6.

Para este calibre el comportamiento de los elementos **A** y **B** siguió un patrón muy similar. En ambos existieron pequeñas pérdidas de adherencia entre los materiales antes de ocurrir el PEP, también aparecen agrietamientos por flexión en ambos elementos debido a que el concreto en la zona central trabaja de manera independiente de la lámina y debido a las tensiones generadas por las cargas se presenta tal evento. Y por tensión diagonal para el elemento **A**.

Posterior al PEP, el elemento **B** se agrieta debido a los esfuerzos flexionantes, y a la pérdida de adherencia en la zona central del elemento, en cambio en el elemento **A**, el anclaje mecánico permite que el elemento continúe tomando mas carga permitiendo que se deforme hasta llegar a la falla debido a la pérdida de acción compuesta entre los dos elementos de la losa.

5.7. Cálculo de los esfuerzos de adherencia teóricos.

Basados en la teoría, los esfuerzos de adherencia entre los materiales se pueden calcular mediante la siguiente expresión producto del análisis de la siguiente sección transversal del elemento.

Para una sección 1-2 cualesquiera, tenemos que el diagrama de cuerpo libre es:

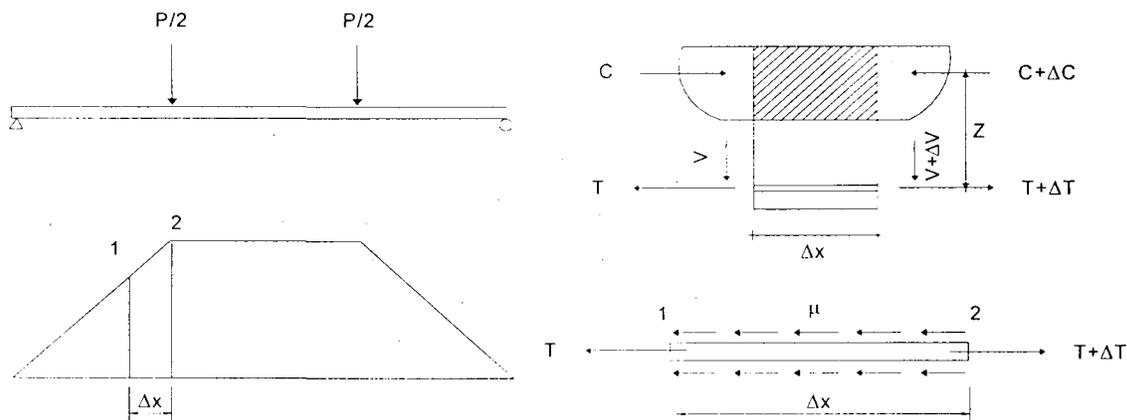


Figura 5.62.- Modelo de Cargas Experimental y Diagrama de Cuerpo libre de la Sección 1-2.

De la figura anterior:

$$\sum F_x = 0$$

$$(\mu)(P)(\Delta x) = \Delta T \quad \therefore$$

$$\mu = \frac{(\Delta T)}{(\Delta x)(P)} = \frac{\Delta M}{(Z_{prom})(P)(\Delta x)} \tag{5.1}$$

Donde:

- μ – Esfuerzos de adherencia entre la lámina y el concreto de anhidrita.
- ΔT = Diferencial de Fuerza de Tensión entre los puntos 1 y 2.
- P = Perímetro del área de contacto entre los materiales (lámina y concreto).
- Δx = Diferencial de longitud para la cual se calculan los esfuerzos μ .
- ΔM = Diferencial de Momentos entre los puntos 1 y 2.
- Z_{prom} = Brazo de palanca promedio entre los puntos 1 y 2.

Basados en la gráfica M- ϕ , se obtienen los elementos de la fórmula 5.1 y con ello los esfuerzos de adherencia promedio para cada elemento estructural compuesto, como lo muestra la Tabla 5.5:

Losa	f'c (kg/cm2)	raiz f'c	T ₁ (kg)	T ₂ (kg)	μ_1 (kg/cm2)	M ₁ (kg'cm)	Z _{prom} (cm)	M ₂ (kg'cm)	μ_2 (kg/cm2)	Coef.
1	177	13.30	7174	10750	4.61	77500	10.78	103333	3.09	0.346
2	259	16.09	12310	15179	3.70	115000	11.29	153333	4.38	0.230
3	100	10.00	4216	5544	1.71	41750	10.43	55667	1.72	0.171
4	268	16.37	6371	8496	2.74	67500	10.77	90000	2.69	0.167
5	130	11.40	4659	7157	3.22	50000	10.74	66667	2.00	0.282
6	170	13.04	3751	5002	1.61	40000	10.63	53333	1.62	0.124
7	117	10.82	10906	13674	3.57	115000	11.41	153333	4.33	0.330
8	105	10.25	9081	11687	3.36	95000	11.33	126667	3.60	0.328
9	284	16.85	9463	10869	1.81	68000	7.75	80000	2.00	0.108
10	276	16.61	8852	10363	1.95	63750	7.70	75000	1.88	0.117
11	303	17.41	13459	15818	3.04	106250	8.03	125000	3.01	0.175
12	303	17.41	10928	12638	2.20	80283	7.96	94450	2.29	0.127
13	136	11.66	7442	8405	1.24	55250	7.72	65000	1.63	0.107
14	120	10.95	3065	3606	0.70	25500	7.16	30000	0.81	0.064
15	313	17.69	11417	13406	2.56	91545	8.21	107700	2.54	0.145
16	301	17.35	10371	10806	0.56	74375	8.17	87500	2.07	0.032

Tabla 5.5.- Esfuerzos de Adherencia para cada Sistema Compuesto.

Los esfuerzos de adherencia μ_1 y μ_2 fueron obtenidos de datos de la gráfica momentos curvatura, empleando la expresión 5.1, la primera parte corresponde a μ_1 y la segunda parte a μ_2 .

Analizando los datos estadísticamente de las columnas 6,10 y 11, se obtienen los valores de tendencia de los esfuerzos de adherencia y el valor que lo relaciona con la resistencia del concreto mostradas para elementos compuestos de lámina y concretos de anhidrita. Los resultados se muestran en las Tablas 5.6, 5.7 y 5.8.

μ_1 (kg/cm ²)		μ_2 (kg/cm ²)	
Media	2.411	Media	2.478
Error típico	0.284	Error típico	0.249
Mediana	2.384	Mediana	2.182
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	1.136	Desviación estándar	0.994
Varianza de la muestra	1.291	Varianza de la muestra	0.989
Curtosis	-0.586	Curtosis	-0.045
Coefficiente de asimetría	0.093	Coefficiente de asimetría	0.632
Rango	4.047	Rango	3.566
Mínimo	0.561	Mínimo	0.810
Máximo	4.608	Máximo	4.376
Suma	38.581	Suma	39.647
Cuenta	16	Cuenta	16

Tablas 5.6 y 5.7.- Análisis Estadístico de los esfuerzos de adherencia entre la lámina y el concreto de anhidrita, calculados con la ecuación 5.1.

Coef.	
Media	0.160
Error típico	0.024
Mediana	0.135
Moda	#N/A
Desviación estándar	0.089
Varianza de la muestra	0.008
Curtosis	0.764
Coefficiente de asimetría	1.026
Rango	0.314
Mínimo	0.032
Máximo	0.346
Suma	2.241
Cuenta	14

Tabla 5.8.- Coeficiente que relaciona a μ y $\sqrt{f'c}$

Algunos investigadores han realizado pruebas de pull-out, con la finalidad de evaluar los esfuerzos de adherencia límite experimental en elementos de lámina y concreto normal. Resultados de pruebas hechas por Michael Yam, "*Composite beams and slabs with profiled steel sheeting*" y por Byron Daniels en conjunto con

Michel Crisinel "Composite Slabs Behavior and Strength Analysis Part II", muestran que los esfuerzos de adherencia entre lámina y concretos de anhidrita son muy similares a los obtenidos de pruebas en elementos compuestos de concreto normal. La Tabla 5.9, muestra una comparativa entre los resultados obtenidos en ambos casos:

Tipo de concreto	L.I. para μ (kg/cm ²)	L.S. para μ (kg/cm ²)	Investigadores
Normal	0.510	3.060	Michael Yam
Normal	0.765	5.100	Byron and Crisinel
Anhidrita*	0.560	4.610	Yeomans and López

* Evaluación indirecta basada en resultados experimentales

Tabla 5.9.- Comparativa de los esfuerzos de adherencia para losas de concreto normal y de anhidrita.

Las diferencias entre los valores mostrados, son debido al empleo de distintos tipos de estampado de lámina, lo cual influye en la adherencia entre los materiales del sistema compuesto. Sin embargo, podemos decir que la tendencia mostrada para elementos con concretos de anhidrita es muy similar a las observados experimentalmente en los sistemas compuestos de concreto normal. Por lo tanto las teorías empleadas para el cálculo de los esfuerzos de adherencia entre la lámina y concreto normal, pueden ser aplicados a elementos compuestos de lámina y concreto de anhidrita.

5.8. Modelo para la predicción del comportamiento de elementos compuestos de lámina y concretos de anhidrita.

Uno de los objetivos de la investigación es establecer un modelo de comportamiento, con la finalidad de caracterizar los sistemas compuestos de lámina y concretos de anhidrita. La idea, es proporcionar una gráfica que contenga los parámetros necesarios mínimos para la predicción del comportamiento de elementos compuestos, basados en las características geométricas-mecánicas.

Para ello, se realizó un análisis de estadística descriptiva para las pruebas experimentales, cuyos resultados se muestran en las Tablas 5.5, 5.6 y 5.7:

Mp	Mcr	Mmax _(crack)	Mmax _(crack) /Mp	Mp/Mcr	E _{I1}	E _{I2}	E _{I2} /E _{I1}	Δexp(max)	Δep
103333	89777	50000	0.48	1.15	4.00E+09	3.72E+08	0.09	21.04	2.75
153333	104022	68667	0.45	1.47	5.50E+09	7.23E+08	0.13	23.43	10.38
55667	67644	43333	0.78	0.82	2.50E+09	4.00E+08	0.16	25.43	1.95
90000	100134	46667	0.52	0.90	5.50E+09	9.31E+08	0.17	24.72	8.52
66667	71887	50000	0.75	0.93	4.00E+09	7.20E+08	0.18	23.55	2.30
53333	80225	25000	0.47	0.66	3.50E+09	5.53E+08	0.16	24.43	4.34
153333	66152	60000	0.39	2.32	3.00E+09	4.56E+08	0.15	25.70	8.11
126667	63251	116667	0.92	2.00	2.50E+09	5.09E+08	0.20	26.15	5.40
80000	60701	40000	0.50	1.32	3.00E+09	5.57E+08	0.19	31.58	4.57
75000	60046	18750	0.25	1.25	2.50E+09	3.28E+08	0.13	34.32	4.05
125000	58695	43000	0.34	2.13	3.00E+09	6.27E+08	0.21	26.22	7.78
94450	58695	36450	0.39	1.61	3.00E+09	3.99E+08	0.13	28.49	6.17
65000	41057	37800	0.58	1.58	2.00E+09	3.84E+08	0.19	25.34	8.03
30000	39123	13500	0.45	0.77	2.00E+09	3.82E+08	0.19	28.42	2.55
107700	55650	40000	0.37	1.94	3.00E+09	4.89E+08	0.16	28.99	4.48
87500	54717	45000	0.51	1.60	3.00E+09	3.80E+08	0.13	31.25	6.95

Tabla 5.5.- Parámetros analizados estadísticamente

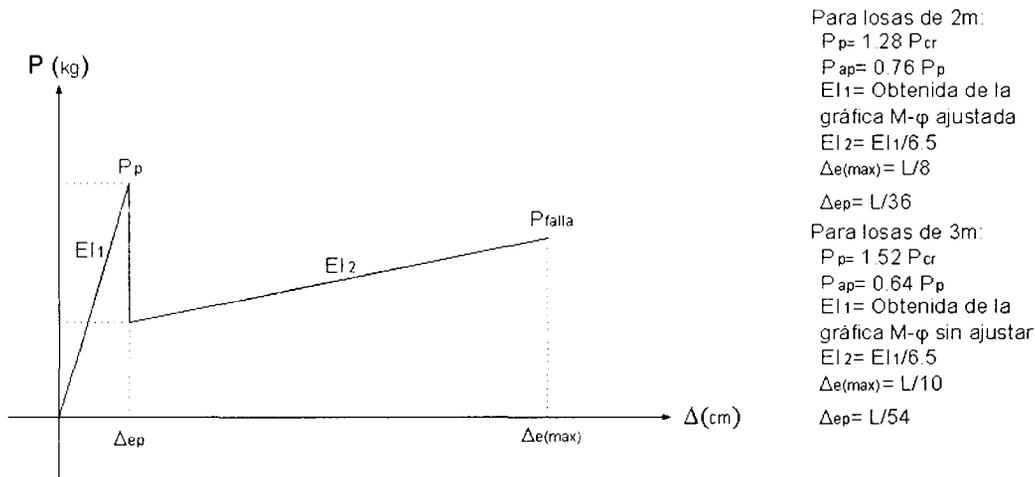
Estadística (2m)	Mp/Mcr	Mmax(crack)/Mp	Δep	Δexp(max)	E _{I2} /E _{I1}
Media	1.282	0.760	5.469	24.306	0.156
Error típico	0.212	0.167	1.130	0.579	0.012
Mediana	1.039	0.650	4.870	24.575	0.159
Moda	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.599	0.471	3.196	1.639	0.033
Varianza de la muestra	0.359	0.222	10.214	2.686	0.001
Curtosis	-0.508	5.054	-1.523	1.360	1.331
Coefficiente de asimetría	0.935	2.093	0.399	-1.103	-0.736
Rango	1.653	1.533	8.430	5.110	0.111
Mínimo	0.665	0.312	1.950	21.040	0.093
Máximo	2.318	1.845	10.380	26.150	0.204
Suma	10.259	6.082	43.750	194.450	1.247
Cuenta	8	8	8	8	8

Tabla 5.6.- Análisis de Estadística Descriptiva para losas de 2m

Estadística (3m)	Mp/Mcr	Mmax(crack)/Mp	Δep	Δexp(max)	E _{I2} /E _{I1}
Media	1.524	0.641	5.573	29.326	0.166
Error típico	0.149	0.076	0.692	1.043	0.011
Mediana	1.591	0.689	5.370	28.740	0.174
Moda	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.422	0.214	1.957	2.949	0.032
Varianza de la muestra	0.178	0.046	3.831	8.699	0.001
Curtosis	0.523	-0.569	-1.275	-0.332	-1.977
Coefficiente de asimetría	-0.432	-0.634	-0.128	0.359	-0.158
Rango	1.363	0.608	5.480	8.980	0.082
Mínimo	0.767	0.312	2.550	25.340	0.127
Máximo	2.130	0.921	8.030	34.320	0.209
Suma	12.190	5.132	44.580	234.610	1.332
Cuenta	8	8	8	8	8

Tabla 5.7.- Análisis de Estadística Descriptiva para losas de 3m

A continuación se muestra la gráfica para fines de conocer el comportamiento de una losa compuesta.



5.63.-Modelo de Comportamiento para Sistemas Compuestos

5.9.- Gráficas comparativas de comportamiento entre losas de concreto normal y losas concretos de anhidrita.

En 1993, los investigadores Daniels and Crisinel hicieron un estudio sobre el comportamiento y la resistencia de elementos compuestos de lámina y concreto normal. Algunos de los resultados de esta investigación, muestra que en sistemas compuestos podemos tener típicamente dos tipos de comportamiento, una de tipo dúctil y otro tipo frágil.

La Figura 5.64 [23], muestra la forma de los comportamientos encontrados para elementos de concreto normal.

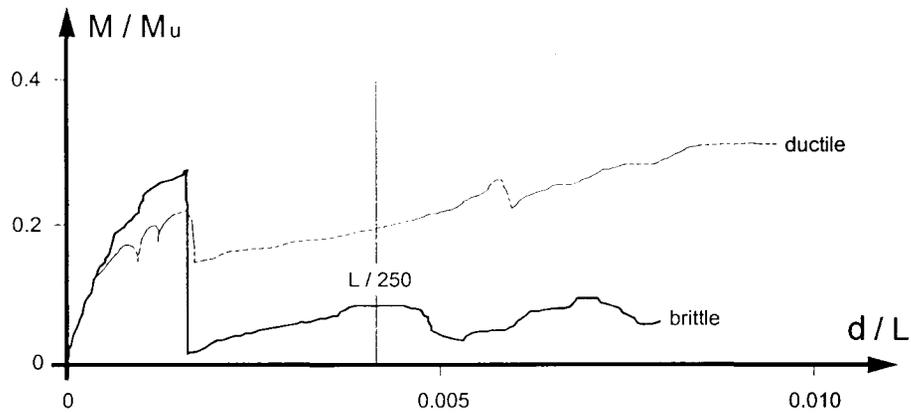


Figura 5.64.- Comportamientos dúctil y frágil, típicos en especímenes de pruebas [23]

Observando la Figura anterior, y comparando con los resultados mostrados para pruebas de losas con concreto de anhidrita, podemos decir que los comportamientos encontrados en ambos casos son de la misma naturaleza (Dúctil y Frágil) y con ello decir que la aplicación de las teorías de losas de concreto normal es válida para losas de concreto de anhidrita.

6. Conclusiones y Recomendaciones.

6.1 Conclusiones

Después de un análisis de cada una de las pruebas experimentales, a continuación se describen las conclusiones más importantes obtenidas del proyecto de investigación sobre el Comportamiento de Sistemas Compuestos de Lámina y Concretos de Anhidrita bajo Cargas Gravitacionales.

- 1.- Los Sistemas de Lámina y Concretos de anhidrita, nos ofrecen una buena opción como sistema estructural en cuanto a resistencia y comportamiento bajo cargas gravitacionales.
- 2.- Las mezclas obtenidas con concretos de anhidrita, alcanzaron resistencias mayores a $f'c=250$ kg/cm² incluyendo en algunos casos por encima de $f'c=300$ kg/cm², lo cual indica que este concreto puede ser usado de manera estructural.
- 3.- Las teorías y metodologías empleadas para predecir el comportamiento en sistemas compuestos de lámina y concreto normal, pueden ser aplicadas para sistemas compuestos de lámina y concretos de anhidrita.
- 4.- Las tendencias de los coeficientes "m" y "k", necesarios para la predicción de la fuerza cortante última del elemento, son similares a las obtenidas en elementos compuestos de lámina y concreto normal.
- 5.- Las muestras de Anhidrita para la elaboración de los especímenes de prueba, se obtuvieron de distintos lugares ubicados en los Estados de San Luis Potosí y Chihuahua. Las diferencias en las características químico-mecánicas de la anhidrita, debido al proceso de obtención del cementante, proceso de molienda, proceso de estabilización, temperaturas de proceso, etc., generan variabilidad en el producto, esto nos reduce el número de especímenes de pruebas de las mismas características y por tanto, los modelos de comportamiento propuestos para sistemas compuestos no son aplicables de manera general.
- 6.- Los tipos de falla observados en los elementos de lámina y concretos de anhidrita fueron los mismos que se presentaron en investigaciones

realizadas en elementos compuestos de lámina y concreto normal. Por lo tanto, el comportamiento de elementos compuestos de concretos de anhidrita es similar a los sistemas de concreto normal.

6.2 Recomendaciones para Investigaciones posteriores de Elementos Compuestos de Lámina y Concreto de Anhidrita.

- 1.- Hacer un mayor número de especímenes de las mismas características para corroborar los resultados obtenidos en esta investigación y hacer un estudio estadístico más confiable.
- 2.- Instrumentar el modelo de prueba, de tal manera que podamos obtener la historia de los desplazamientos relativos entre la interfase de los materiales. Esto será de gran utilidad para el modelo analítico en la predicción del comportamiento del elemento compuesto, como lo estipula la ASCE.
- 3.- Realizar pruebas del tipo pull-out, para cada uno de los calibres de lámina y diferentes resistencias, con el fin de evaluar los esfuerzos de adherencia entre los materiales y corroborar la relación mostrada en esta investigación entre los esfuerzos de adherencia (μ) y la raíz cuadrada de la resistencia del concreto ($f'c$) empleada.
- 4.- Cuidar las condiciones de montaje del espécimen de prueba, ya que ello puede llegar a alterar la prueba en cuanto a comportamiento y resistencia se refiere.
- 5.- Emplear en la elaboración de los especímenes de prueba, un solo tipo de cementante (Anhidrita).
- 6.- Estudiar el comportamiento de este tipo de elementos empleando conectores de corte.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] American Society of Civil Engineers, "*Standard for Structural Design of Composite Slabs and Standard Practice for Construction and Inspection of Composite Slabs*", New York, December 11, 1992.
- [2] Arthur H. Nilson and George Winter, "*Diseño de Estructuras de Concreto*", 11ª. Edición, Mc Graw Hill, p. 6-10, 1994.
- [3] Hibbeler, R. C., "*Análisis Estructural*", Tercera Edición, Prentice Hall, p. 9-19, 1998.
- [4] Mc Gregor, James, "*Reinforced Concrete Mechanics and Design*", Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- [5] Park R. And Gamble W. L., "*Losas de Concreto Reforzado*", Primera Edición, Limusa, p.19-29, 1987.
- [6] Steel Deck Institute, "*Design Manual for Composite Decks, Form Decks and Roof Decks*", Publication No. 30, 2000.
- [7] Yeomans F. S. and Dávila F.E., "*Diseño de mesa de carga y prueba de diafragma testigo*", Reporte final, Instituto Tecnológico de Monterrey, Febrero 1997.
- [8] Wei-Wen Yu, "*Cold-Formed-Steel Design*", Second edition, Wiley Interscience, 1991.

-
- [9] Porter M. L. and Ekberg C.E. Jr, "*Behavior of Steel- Deck- Reinforced Slabs*", Journal of the Structural Division, Vol. 103, No. 3, March 1977, pp. 633-677.
- [10] W. Samuel Easterling and Craig S. Young, "*Strength of Composite Slabs*", Journal of the Structural Division, Vol. 118, Nos. 9-10, September-October 1992.
- [11] ACI 318-95, "*Building code requirements for structural concrete*", Farmington Hills, Mich., American Concrete Institute, 2000.
- [12] R. M. Schuster, "*Strength and Behavior of the 636 Keydeck Composite Slab System (Normal Density Concrete)*", Universidad de Waterloo, Ontario, Mayo 1999.
- [13] Galvak, "*Ficha técnica Galvadeck 25 para sistemas compuestos*", Monterrey, Nuevo León, Mayo de 2001.
- [14] Charles W. Roeder, "*Composite and Mixed Construction*",
- [15] Joseph J. Waddell y Joseph A. Dobrowolski, "*Manual de la Construcción con Concreto II*", México D. F., McGraw Hill, Tercera Edición, 1997
- [16] A. M. Neville y J. J. Brooks, "*Tecnología del Concreto*", Trillas, México, D. F., 1era. Edición, Enero de 1997.
- [17] Jack C. McCormac, "*Diseño de Concreto Reforzado*", Alfaomega, México D. F., 4ta. Edición, 2002.
-

-
- [18] American Society of Civil Engineers, "*Commentary on ASCE Standard for the Structural Design of Composite Slabs*", New York, December 11, 1992.
- [19] Council on Tall Buildings and Urban Habitat, "*Cold- Formed Steel in Tall Buildings*", McGraw Hill, U.S.A., 1993.
- [20] Ferdinand P. Beer y E. Russell Johnston Jr., "*Mecánica de Materiales*", McGraw Hill, México D. F., 1993.
- [21] R. M. Schuster, "*Strength and Behavior of the 636 Keydeck Composite Slabs System*", University of Waterloo Research Institute, Ontario, 1990.
- [22] Francisco S. Yeomans Reyna, "*Seismic Modeling of Structures with steel deck reinforced concrete diaphragms*" Thesis, Iowa State University 1993
- [23] Byron J. Daniels, Michel Crisinel, "*Composite Slab Behavior and Strength Analysis Part II: Comparisons with Test Results and Parametric Analysis.*" Journal and Structural Engineering, Vol.119, January, 1993.
- [24] Gabriel Barraza Enríquez, Carlos Nungaray Pérez, "*Determinación de la Resistencia de un Sistema de Losa Compuesta*", ITESM,
- [25] R. Park and T. Paulay, "*Estructuras de concreto reforzado*", Limusa, México D.F., 1999.
- [26] Michael Yam, "*Composite beams and slabs with profiled steel sheeting*" , Canadá, 1984.
-

