

# Estudio experimental sobre un procedimiento para construir placas plegadas de concreto reforzado.

Horacio Ramírez de Alba<sup>1</sup>, Elizabeth Camacho Zepeda<sup>2</sup> y Elizabeth A. Valdez Medina<sup>3</sup>

Recibido: 7 de diciembre de 2005 - Aceptado: 14 de febrero de 2006

## RESUMEN

El sistema estructural de placas plegadas es eficiente por su alta rigidez y su baja relación peso-superficie cubierta, lo cual motivó su uso extendido en décadas pasadas, sin embargo el requerimiento de moldes y cimbras especiales lo convirtió en una alternativa cara y por lo tanto su uso es ahora escaso. En este trabajo se propone un procedimiento alternativo por medio de subensambles adheribles y se reporta el trabajo experimental sobre un modelo representativo. Se comparan los resultados experimentales con diferentes procedimientos analíticos y se concluye que el procedimiento propuesto es adecuado tanto al considerar su comportamiento estructural como su costo relativo a otros sistemas estructurales de concreto reforzado.

**Palabras Clave:** Placas plegadas, concreto reforzado, construcción modular, adhesivos epóxicos, trabajo experimental.

---

## Experimental study on a procedure to construct folded plates of reinforced concrete

## ABSTRACT

Folded plates are an efficient structural system because of its high stiffness and low weight–surface ratio; as a consequence, it was a commonly used system in the past. However, due to the high cost of form and scaffolding nowadays, it is an expensive alternative. In this paper an alternative construction procedure with adherent sub-assemblages is proposed and the experimental work on a representative model is reported, the experimental data is compared with different analytical methods and it is concluded that the proposed procedure to construct folded plates is adequate considering the structural behaviour and the relative cost to other reinforced concrete structural systems.

**Key words:** Folded plates, reinforced concrete, modular construction, epoxy adhesives, experimental work.

---

<sup>1</sup> Doctor en Ingeniería, Centro de Investigación en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, UAEM, Cerro de Coatepec S/N, Toluca, Estado de México. [hra@uaemex.mx](mailto:hra@uaemex.mx).

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Centro de Investigación en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, UAEM, Cerro de Coatepec S/N, Toluca, Estado de México. [eliza2579@yahoo.com.mx](mailto:eliza2579@yahoo.com.mx).

<sup>3</sup> Ingeniero Civil, Centro de Investigación en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, UAEM, Cerro de Coatepec S/N, Toluca, Estado de México. [eliza21381@yahoo.com.mx](mailto:eliza21381@yahoo.com.mx).

## INTRODUCCIÓN

El sistema estructural de placas plegadas de concreto reforzado tuvo un periodo de utilización importante para cubrir claros medianos, principalmente en edificios industriales, auditorios y espacios deportivos. La razón de ello es que el sistema de placas plegadas tiene una buena eficiencia estructural

al comparar con otros sistemas basados en el concreto reforzado. Por ejemplo, suponiendo que se requiera cubrir un área de 16 por 32 metros, se pueden estimar las relaciones de volumen de concreto por superficie cubierta (RL) y la masa de acero de refuerzo por superficie cubierta (RA) para diferentes soluciones estructurales. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Comparación de materiales requeridos para cubrir un área de 16 por 32 metros para diferentes sistemas estructurales.

Sistema	RC (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	RA (kg/ m <sup>2</sup> )	Observaciones
Cascarón de doble curvatura	0.08 (1.0)	7.40 (1.0)	Dos paraboloides
Bóveda cañón	0.11 (1.38)	8.80 (1.19)	Considerando cinco bóvedas con 6.4 m de ancho
Placa plegada	0.095 (1.19)	10.30 (1.39)	Considerando ocho módulos con 4.0 m de ancho
Losa plana aligerada	0.24 (3.0)	24.6 (3.32)	80 cm de espesor
Losa perimetralmente apoyada sobre trabes	0.23 (2.9)	14.1 (1.91)	Trabes principales a cada 6m y dos trabes secundarias.
Elementos presforzados prefabricados	0.143 (1.79)	10.45 (1.41)	Tipo STT
Losa nervada en 10	0.18 (2.25)	12.94 (1.75)	Nervaduras a cada metro, con peralte de 80 cm.

**Nota:** Entre paréntesis el valor relativo respecto al más pequeño.

**Fuente:** Cálculos hechos por este grupo de investigación.

De los datos de la Tabla 1 se observa que para este caso el sistema de placas plegadas es solamente superado por las estructuraciones de cascarón de doble curvatura y se tienen cantidades de material comparables al sistema de bóvedas cañón (que requiere 16% más concreto pero 17% menos acero de refuerzo), en todos los demás casos las cantidades de concreto y de acero de refuerzo son superiores. Por lo tanto al considerar las cantidades de materiales los sistemas eficientes son los cascarones y las placas plegadas, sin embargo su uso ha decrecido considerablemente debido al alto costo de la cimbra y andamiaje requeridos para su construcción (IIAS, 1999) lo cual se acusa con mayor intensidad en los cascarones curvos. Por lo tanto se ha identificado como un reto lograr sistemas constructivos que permitan aprovechar las ventajas estructurales de los cascarones y de las placas plegadas sin tener las desventajas del alto costo de las cimbras.

Los elementos prefabricados de concreto presforzado representan una alternativa muy recurrida en la actualidad, pero las secciones comerciales más usadas

tienen una geometría basada en el criterio de lograr la mayor contribución del acero de preesfuerzo así como facilitar las maniobras del desmolde, por lo tanto usualmente no incluye la geometría propia de las placas plegadas. Por otro lado se sabe de sistemas de poco peso que utilizan los principios de los arcos y las bóvedas, por ejemplo utilizando moldes neumáticos (Reyes, 1999) (Huber, 1986). En la Facultad de Ingeniería de la UAEM se han hecho trabajos experimentales referentes a la construcción de arcos mediante procedimientos de construcción progresiva, en que la rigidez y la resistencia aumentan progresivamente de manera controlada a medida de que se avanza en las etapas constructivas (Rojas, 1995). Estos antecedentes permiten establecer que existen varias posibilidades para construir placas plegadas minimizando la desventaja de la cimbra. Dentro de varias posibilidades analizadas, este trabajo tiene como objetivo describir una alternativa por medio de subensambles estructurales que puede ser lograda por medio de prefabricación *in situ* o bien con un molde especial que permite varios usos y el cual se posiciona de forma progresiva para completar el

sistema. Por lo tanto se aprovecha la prefabricación parcial, así como las técnicas para lograr continuidad que han dado buen resultado en la reparación y refuerzo de estructuras existentes. (Helene, 2003)(Emmons, 1993) La alternativa propuesta se estudia experimentalmente por medio de un modelo a escala  $\frac{1}{4}$  sometido a cargas verticales. Los resultados experimentales se comparan con diferentes procedimientos analíticos. En las partes siguientes se describe la alternativa propuesta, el diseño y construcción del modelo, los resultados experimentales, así como su análisis.

## METODOLOGÍA

Teniendo como meta encontrar un procedimiento para construir placas plegadas evitando el problema de una

cimbra tradicional, se estudiaron las siguientes alternativas:

- Placas prefabricadas unidas por medio de adhesivos epóxicos y morteros especiales.
- Placas planas con elementos tipo bisagra que toman su posición por medio de dispositivos mecánico- hidráulico y logrando monolitismo por medio de adhesivos epóxicos y morteros especiales.
- Subensambles prefabricados unidos con epóxicos y morteros especiales.
- Subensambles contruidos in situ por medio de un molde multiusos que se acomoda en posición por medio de un mecanismo de movimiento vertical y deslizamiento horizontal, como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.

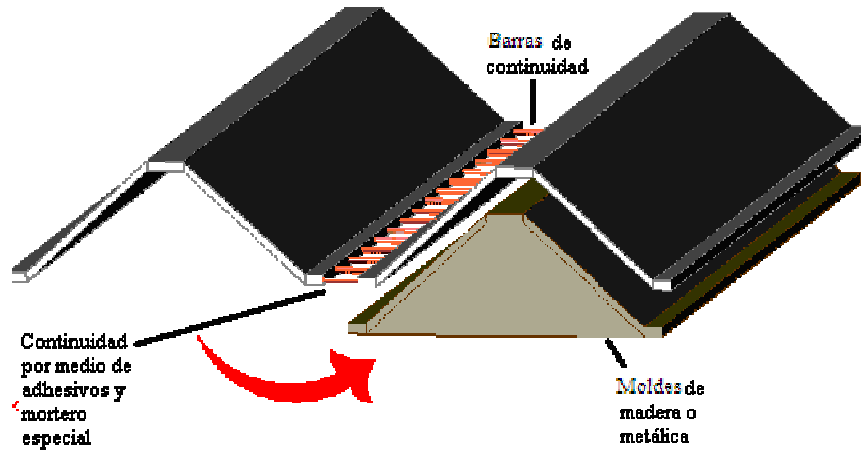


Figura 1. Representación esquemática del procedimiento constructivo propuesto.

Después de hacer un análisis aproximado de estas alternativas en cuanto a su comportamiento estructural esperado, la factibilidad constructiva y su costo, se decidió realizar el trabajo experimental con la alternativa d). Para esto se partió de un prototipo hipotético para cubrir un área de 16 por 34 metros, con elementos de placas plegadas. Este prototipo se

diseñó utilizando el método elástico propuesto por Billington, 1982 y se comprobó el comportamiento global esperado con la teoría de flexión de traves de concreto reforzado. La sección transversal resultante para dos módulos representativos se presenta en la Figura 2.



Figura 2. Sección transversal del prototipo.

Para evitar la cimbra, se propone fabricar un molde que mediante un mecanismo se pueda colocar en posiciones sucesivas respecto al eje longitudinal de la estructura, lo que permite construir por módulos (en el caso que se propone de 2.60m de ancho) que se unen por medio de una junta especial que considera hacer continuo el refuerzo transversal y lograr continuidad por medio de un adhesivo epóxico.

Una vez establecido el prototipo se procedió a diseñar un modelo representativo a la escala 1/4. Para esto se

propuso un microconcreto con propiedades mecánicas similares a las establecidas para el prototipo. El acero de refuerzo para el modelo consistió de barras corrugadas de 4.8 mm (3/16") con esfuerzo nominal de fluencia de 589 MPa (6000 kg/cm<sup>2</sup>). Esto requirió hacer algunos ajustes ya que para el prototipo se consideró acero grado 42 con esfuerzo de fluencia de 412 MPa (4200 kg/cm<sup>2</sup>). En la Figura 3 se representa la sección transversal del modelo.

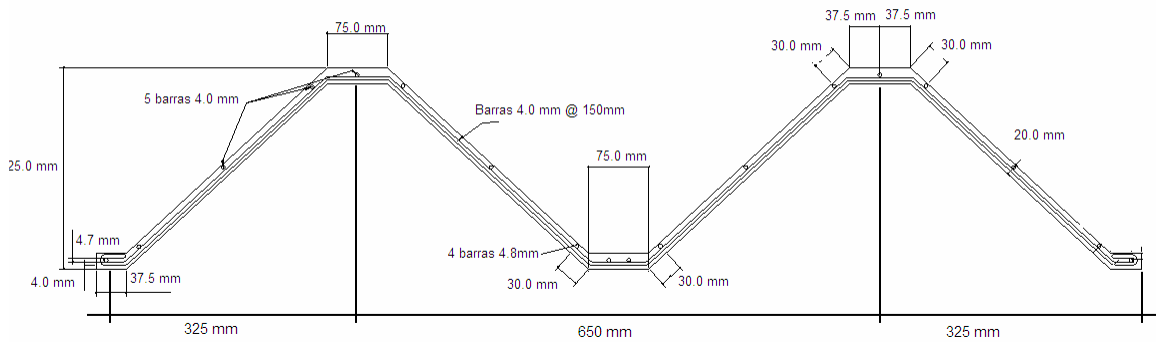


Figura 3. Sección transversal del modelo.

## CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para la secuencia constructiva y los detalles de refuerzo se siguieron los lineamientos de las referencias Tedesko, 1953 y ACI, 1992 La construcción del modelo requirió de los siguientes pasos:

1. Apoyos. Sobre la losa de pruebas del laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, se construyeron dos muros de mampostería confinada con dimensiones de 2.0m de longitud por 1.5m de altura, estos muros se desplantaron sobre zapatas de concreto reforzado de sección transversal de 300 por 300 mm que se anclaron a la losa de cimentación por medio de ocho barras roscadas de 13mm de diámetro, colocando cuatro en cada extremo. La distancia a ejes de los muros fue de 4.0m, con un claro libre de 3.85m.
2. Molde. Se preparó un molde con hojas de triplay de 19 mm de espesor con la geometría, antes descrita, del modelo. La longitud del molde se ajustó a la distancia entre los muros dejando solamente la holgura suficiente para realizar las operaciones de colocación y retiro. La superficie

del molde se impregnó con resina de uso general para proteger la madera y antes del colado se colocó una película de desmoldante.

3. Estructura de apoyo del molde. Se construyó un soporte para el molde simulando lo que se haría en una construcción real con este sistema. El soporte permite que el molde pueda ser colocado en posición para poder colar un módulo de la losa plegada (65cm en el caso del modelo, 2.60m en el caso del prototipo) y una vez que el concreto endurece, se abate el molde para liberar el módulo y se desliza por medio de rodillos a la siguiente posición, se vuelve elevar el molde para colar el siguiente módulo y así sucesivamente.
4. Continuidad. Antes de colar el módulo siguiente se hace continuo el refuerzo transversal mediante preparaciones dejadas ex profeso y se coloca un adhesivo epóxico para unir concreto endurecido con concreto fresco. El procedimiento de colocación fue el recomendado por el fabricante.
5. Curado y terminado. Una vez que se terminan todos los módulos necesarios se procede a su curado que se debe hacer secuencial, es decir curar cada módulo al completar su construcción.

Para los objetivos de este trabajo, solamente se construyeron dos módulos ya que se quiere estudiar la junta longitudinal y el comportamiento general del modelo. El modelo se instrumentó con cuatro galgas extensométricas colocadas en el refuerzo principal de las secciones transversales de ambos módulos en el centro del claro. Las deformaciones verticales se midieron con micrómetros de carátula con aproximación de 0.01 mm. En la Figura 4 se muestra una fotografía del modelo durante la etapa constructiva.



Figura 4. Fotografía del Modelo.

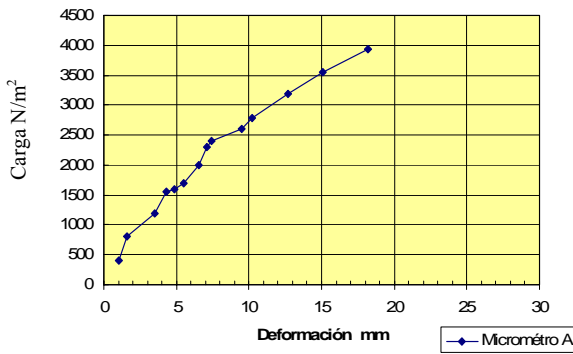
**RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Se tomaron nueve muestras del concreto y se realizaron pruebas de compresión, tensión, módulo elástico y revenimiento, con estos resultados se estableció la resistencia del concreto en compresión de 37.6 MPa (383kg/cm<sup>2</sup>), el esfuerzo de rotura en tensión de 3.6MPa (37 kg/cm<sup>2</sup>) y el módulo elástico de 28800 MPa (293605 kg/cm<sup>2</sup>). Al modelo se

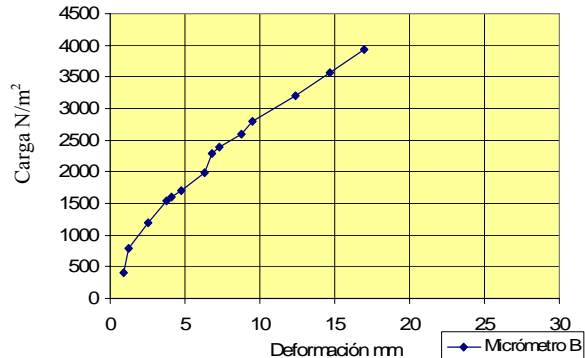
aplicaron cargas verticales mediante lastre colocado sobre una tarima de madera que permitió aplicar la carga uniformemente.

Las cargas se aplicaron en dos etapas, la primera hasta la carga teórica de primera fluencia del acero de refuerzo principal en 15 intervalos de carga, este nivel de carga corresponde aproximadamente a la carga factorizada de diseño o sea la carga muerta más la carga viva ambas multiplicadas por 1.4, esta carga se dejó sobre el modelo durante 18 horas a partir del momento en que se completó, después se procedió a la descarga en 10 intervalos. La segunda etapa de carga se inició 24 horas después de la total descarga de la primera etapa, en esta etapa se llegó hasta la carga de falla en siete intervalos, en esta etapa las deformaciones se midieron a distancia mediante un nivel con tripié que permitió observar una escala fija al modelo con aproximación de 1mm. Por medio de galgas extensométricas se midieron las deformaciones utilizando un sistema de adquisición de datos marca Vishay/Ellis-20 con aproximación de un  $\mu\epsilon$ . En la Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos en la primera etapa de carga, se registra la carga unitaria en N/m<sup>2</sup> y la deformación vertical en mm. La gráfica correspondiente a la primera etapa se muestra tanto en términos del micrómetro colocado en la parte central, como el promedio de las dos micrómetros (los dos colocados en el centro del claro, el micrómetro A ubicado en la parte central y el micrómetro B ubicado en el extremo del módulo 2). En la Figura 5 se muestran estos mismos resultados en forma gráfica.

En la Tabla 3 se muestra los resultados obtenidos en la segunda etapa de carga y de forma gráfica se presentan en la Figura 6.



a) Micrómetro A



b) Micrómetro B

Figura 5. Gráficas Carga – Deformación del modelo para la primera etapa.

**Tabla 2.** Resultados experimentales, primera etapa.

Carga distribuida en N/m <sup>2</sup>	Deformaciones registradas en mm		Lecturas en las Galgas $\mu\epsilon$			
	Micrómetro A	Micrómetro B	Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4
784.80	0.6	0.6	55.0	56.0	213.0	172.0
1184.07	1.0	0.9	-97.0	142.0	293.0	263.0
1583.33	1.9	1.2	-39.0	80.0	371.0	216.0
1982.60	3.7	2.5	26.0	288.0	1180.0	254.0
2331.84	4.3	3.8	317.0	458.0	1435.0	695.0
2381.87	4.9	4.1	334.0	472.0	1555.0	737.0
2481.93	5.5	4.8	439.0	485.0	1553.0	771.0
2781.14	6.6	6.3	622.0	537.0	1658.0	967.0
3080.34	7.0	6.8	872.0	623.0	1819.0	1113.0
3180.40	7.4	7.3	938.0	643.0	1890.0	1190.0
3379.55	9.5	8.8	997.0	878.0	2005.0	1280.0
3579.67	10.2	9.5	1147.0	1297.0	2091.0	1400.0
3978.94	12.7	12.4	1535.0	1716.0	1473.0	1670.0
4345.83	15.1	14.7	1804.0	1724.0	1836.0	1912.0
4708.80	18.2	16.9	1195.0	1711.0	1465.0	1445.0
4712.72	18.7	18.4	1302.0	1288.0	1584.0	1559.0
4712.72	18.7	18.5		1287.0		
4345.83	18.1	17.6		1282.0		
3978.94	17.3	16.6		1281.0		
3579.67	16.7	15.9		1274.0		
3180.40	15.8	15.2		1275.0		
2781.14	14.9	14.2		1297.0		
2381.87	13.9	13.3		1295.0		
1982.60	12.8	12.2		1310.0		
1583.33	11.7	11.2		1304.0		
1184.07	10.8	10.4		1302.0		
784.80	9.7	9.3	472.0	1298.0	810.0	809.0
784.80	10.4	9.5	438.0	279.0	769.0	786.0
784.80	10.4	9.5	434.0	258.0	887.0	733.0

**Tabla 3.** Resultados experimentales, segunda etapa.

Carga aplicada en N/m <sup>2</sup>	Deformación mm	Lecturas de las Galgas Extensométricas $\mu\epsilon$			
		Galga 1	Galga 2	Galga 3	Galga 4
784.80	10.4	434.0	258.0	887.0	733.0
997.68	12.9		268.0		
1996.34	15.4	495.0	276.0	1387.0	1181.0
2994.01	17.9		292.0		
3960.30	20.4	1461.0	312.0	2297.0	2039.0
4775.51	23.4		328.0		
5590.72	28.4	1589.0	1179.0		1983.0
5978.21					

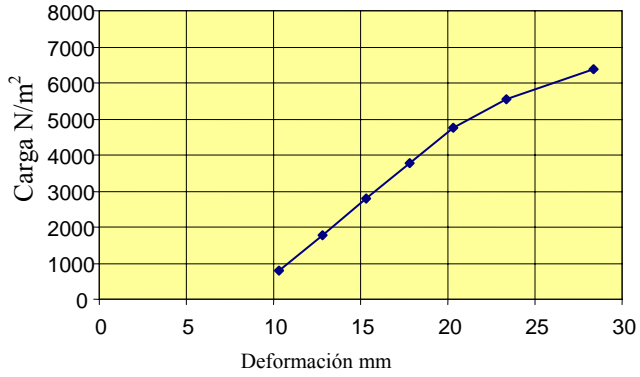


Figura 6. Gráfica Carga – Deformación, segunda etapa.

En la Figura 7 se muestra la variación de los esfuerzos (calculados con las deformaciones medidas, multiplicadas por el módulo elástico del acero) respecto a los diferentes niveles de carga para la primera etapa y en la Figura 8 se muestra la misma variación para la segunda etapa de carga.

Durante el proceso de prueba también se registraron las grietas que se fueron presentando por la parte inferior del modelo y en algunos casos representativos se midió el ancho de las grietas con una mica graduada (comparador de grietas), en la Figura 9 se muestra el patrón de grietas para cuatro etapas de carga representativas.

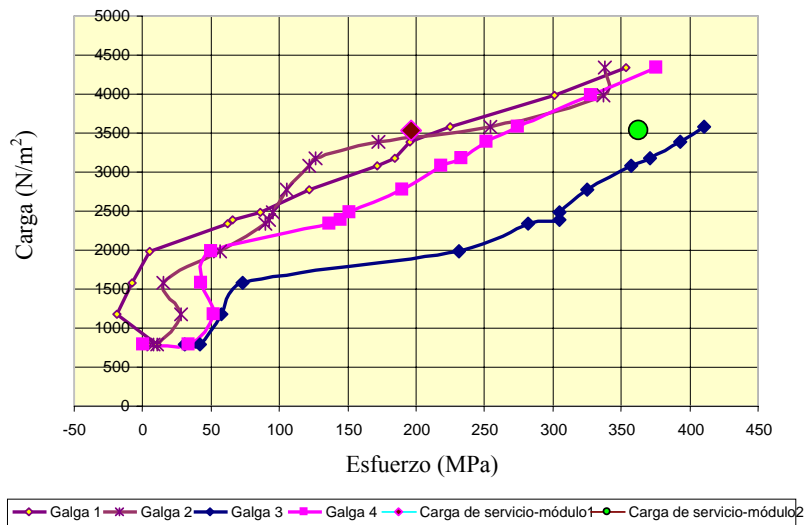


Figura 7. Gráfica resultados de la primera etapa de carga.

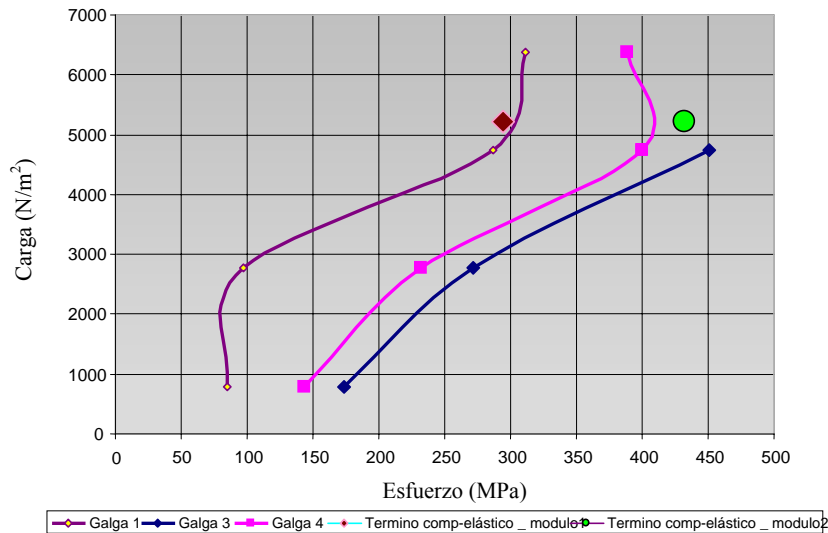


Figura 8. Gráfica resultados para la segunda etapa de carga.

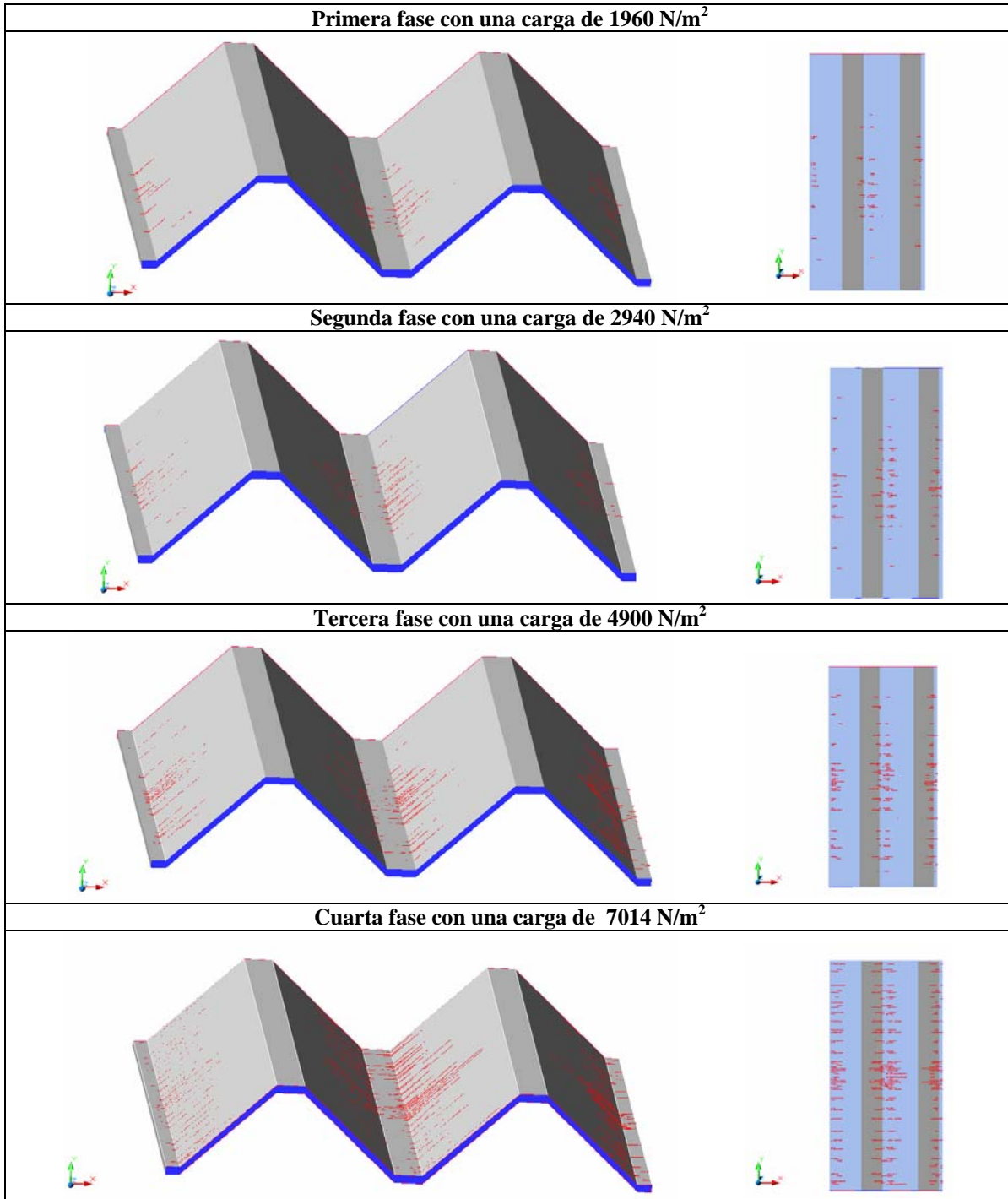


Figura 9. Patrón de grietas para las cuatro fases de carga representativas.

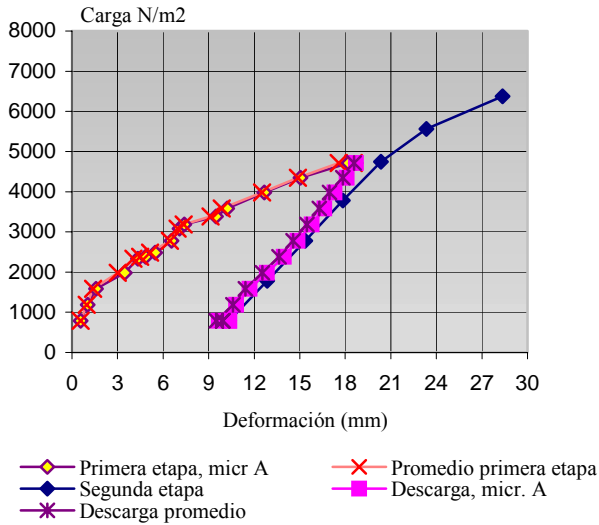
## DISCUSIÓN

En la Figura 10 se muestran los resultados experimentales de las dos etapas, de esta figura se

observa que las gráficas para el micrómetro de la parte central y del promedio son muy próximas lo cual indica que el trabajo de conjunto de los dos módulos es adecuado, o sea que la junta longitudinal presentó un comportamiento estructural satisfactorio. Lo anterior se corrobora al observar la Figura 9 que



muestra que no se presentó ninguna grieta longitudinal en la junta hasta niveles de carga próximos a la falla. De la Figura 10, también se observa que al descargar el modelo se presenta una deformación permanente de 9.4mm que aumentó a 10.4 mm en 18 horas pero este valor se estabilizó antes de transcurrido ese tiempo, en la segunda etapa de carga se mantuvo aproximadamente la rigidez del modelo respecto a la que presentó en la descarga, pero al llegar al nivel máximo de carga de la primera etapa se presentó una tendencia similar a la correspondiente a la primera etapa hasta que se alcanzó la falla para una carga aproximada de 7000 N/m<sup>2</sup> que es 2.07 veces la carga de servicio y 1.48 veces la de diseño. Esto indica que el sistema tiene un margen de seguridad adecuado.



**Figura10.** Gráfica Carga-Deformación experimental del modelo.

A fin de contrastar los resultados experimentales respecto a la teoría, se realizaron cálculos mediante tres modelos analíticos:

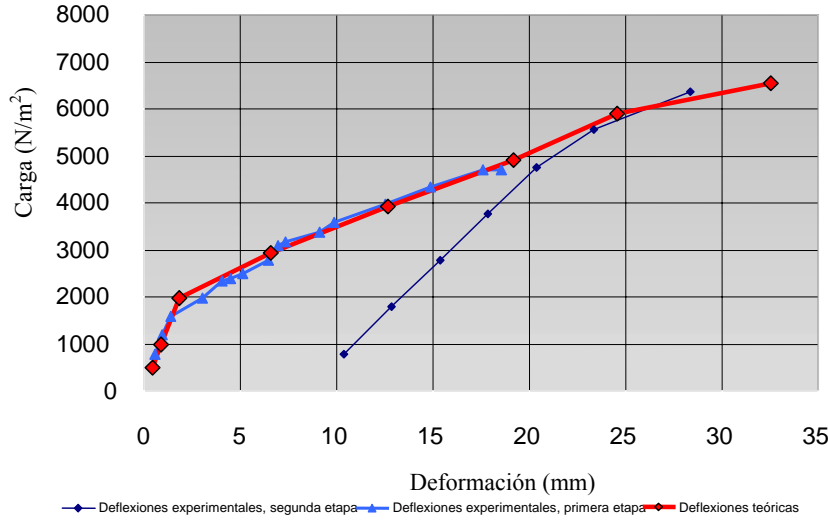
1. Método elástico (Billington, 1982) (Timoshenko, 1983). Consiste en sobre-imponer el trabajo transversal y longitudinal de las placas para obtener los esfuerzos transversales mismos que se pueden utilizar para calcular el momento y la deformación para la carga de servicio.
2. Analogía con la trabe de concreto. Utilizando las hipótesis de la flexión de trabes de concreto reforzado se calculó el momento flexionante para diferentes etapas como son: agrietamiento  $M_{CR}$ ,

comportamiento elástico  $M_E$ , de fluencia  $M_y$  y último o de falla  $M_N$ . También se calcularon las curvaturas para estas mismas etapas así como el diagrama momento curvatura. Con este resultado se calcularon las deformaciones para diferentes niveles de momento flexionante, tanto en la etapa elástica como en la inelástica.

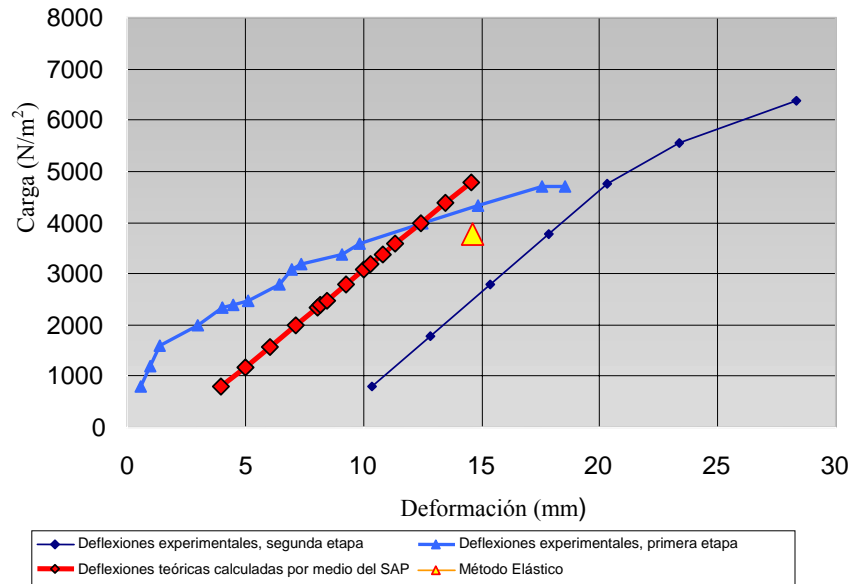
3. Modelo de placas con programa SAP. Se realizó un modelo analítico por medio del programa SAP 2000 que permitió calcular la carga y la deformación para diferentes niveles de carga, éste solamente predice el comportamiento en un rango elástico.

Los resultados del trabajo analítico se compararon de forma gráfica con los resultados experimentales como se muestra en la Figura 11. En la Figura 11a) se presenta la comparación con la analogía de la trabe, en la cual se aprecia que existe suficiente aproximación entre los resultados analíticos y experimentales. Respecto a la etapa de primer agrietamiento se predice una carga 11 % mayor a la medida y a una deformación 15% mayor a la medida, sin embargo para niveles mayores de carga, próximos a la primera fluencia del acero, se predicen cargas y deformaciones que no difieren en más de 5% respecto a las medidas. En la etapa final de prueba las cargas calculadas siguen teniendo buena correlación en las medidas pero se predicen deformaciones más grandes, en el último punto de carga la deformación calculada es 15 % mayor que la medida.

De forma global, se concluye que el comportamiento experimental se puede estimar razonablemente considerando la analogía con la trabe, además esto resulta otro indicador importante de que la junta entre los dos módulos tuvo un trabajo estructural satisfactorio. En la Figura 11b) se presenta la comparación con el método elástico y los resultados obtenidos por medio del programa SAP, donde se observa buena correlación en la etapa elástica, por lo tanto, el análisis anterior indica que el sistema propuesto para construir losas plegadas presenta un comportamiento estructural que se puede predecir razonablemente con los métodos usuales para el diseño de este tipo de estructuras tanto considerando el criterio de esfuerzos de trabajo como el de resistencia. En este ultimo caso con la analogía de la trabe que predice una carga de diseño de  $F_{RW_N} = 7050 \text{ N/m}^2$  que es muy próxima a la carga observada de falla de  $7000 \text{ N/m}^2$  ( $713 \text{ kg/m}^2$ ).



a) Comportamiento experimental- Método de la viga equivalente.



b) Comportamiento experimental- SAP – Método Elástico.

Figura 11. Gráfica comparativa del comportamiento experimental con el teórico.

Por otro lado, de las Figuras 7 y 8 se puede observar que los esfuerzos en el acero principal de refuerzo siguieron una tendencia ascendente hasta cerca de la carga calculada correspondiente a la fluencia.

El esfuerzo calculado para la carga de servicio es de 353 MPa (3600 kg/cm<sup>2</sup>) y el esfuerzo calculado para la carga correspondiente al fin del comportamiento elástico después del agrietamiento es de 521 MPa (5310 kg/cm<sup>2</sup>), estos valores están marcados en las Figuras 7 y 8, se tiene que para el esfuerzo en la carga de servicio el promedio medido en el módulo 1 fue de

196 MPa (2000 kg/cm<sup>2</sup>) y en módulo 2 de 363 MPa (3700 kg/cm<sup>2</sup>). Para el esfuerzo correspondiente al fin del comportamiento elástico se midió en promedio para módulo 1 un esfuerzo de 294 MPa (3000 kg/cm<sup>2</sup>) y para el módulo 2 un esfuerzo de 432 MPa (4400 kg/cm<sup>2</sup>). Se puede observar también una tendencia similar en los esfuerzos en los módulos 1 y 2 al comparar las Figuras 7 y 8, esto hasta cerca de la carga teórica de primera fluencia ya que posteriormente el comportamiento es muy variable atribuido a la fluencia del acero de refuerzo.

Se concluye que los esfuerzos medidos permiten confirmar que el sistema propuesto tiene un comportamiento estructural apropiado que puede ser predicho razonablemente con las técnicas usuales para el diseño de estructuras de concreto reforzado.

Trasladando los resultados experimentales del modelo al prototipo, se puede establecer que es correcta la solución estructural para el caso representando en la Figura 1. La placa plegada para este caso requiere 0.101 metros cúbicos de concreto por unidad de superficie y un peso de acero de refuerzo por unidad de superficie de 111 N/ m<sup>2</sup> (11.3 kg/m<sup>2</sup>) (incluyen el refuerzo por temperatura). Con estos datos, se procedió a realizar un cálculo del costo de materiales y mano de obra por unidad de superficie en dos casos:

a) construcción siguiendo la propuesta aquí reportada y cuyo comportamiento se estudió experimentalmente, y b) construcción tradicional con una cimbra de madera completa. Los resultados son los que se muestran en la Tabla 4, se debe aclarar que no se incluyen los soportes ni los diafragmas externos, así como tampoco los acabados y el sistema de impermeabilización que serían constantes en los dos casos analizados.

De los datos presentados en la Tabla 4 se puede observar que el sistema propuesto representa menor costo que el sistema tradicional, esta diferencia puede ser mayor en el caso de que se construyeran varios edificios del mismo tipo, por ejemplo almacenes o auditorios escolares en diferentes partes del país.

**Tabla 4.** Costos por metro cuadrado para placas plegadas: propuesta y tradicional.

Concepto	Propuesta con subensambles (\$)	Construcción tradicional (\$)	Observaciones
Concreto	303	290	Incluye mezclado, transporte, colocación compactación y curado.
Acero de refuerzo	226	205	Habilitación y colocación.
Encofrado (cimbra)	-	118	Cimbra completa comprada o rentada considerando 5 usos
Andamiaje	-	90	Soporte de cimbra completa comprada o rentada
Molde autoportante	21	-	Molde de 2.6 por 16 metros, a un modelo.
Mecanismo posicionador	25	-	Diseño y fabricación, utilización múltiple
Tratamiento de la junta	13	-	Con adhesivo epóxico
SUMA	588	703	Diferencia 20%

El análisis de los resultados experimentales permitió establecer que:

- 1) La junta longitudinal presentó un comportamiento estructural satisfactorio, los dos módulos se comportaron como una unidad, además no se observaron grietas o deterioro en la junta.
- 2) El sistema presenta un margen de seguridad suficiente puesto que la carga de falla resultó dos veces la carga de servicio y 1.48 veces la de diseño.
- 3) El comportamiento estructural hasta el nivel de carga que provoca la fluencia de acero se puede predecir razonablemente con los procedimientos usuales de diseño. En este trabajo se incluyeron el método elástico que considera el trabajo transversal y longitudinal de las placas, la analogía con una trabe de concreto reforzado y el modelo de placas con el programa SAP 2000.
- 4) Los esfuerzos calculados con las deformaciones unitarias medidas siguen una trayectoria que permite confirmar que el sistema propuesto tiene un comportamiento similar al de la construcción monolítica.

- 5) El diseño se puede basar ya sea en el criterio de esfuerzos de trabajo con los métodos de análisis elástico o el de resistencia considerando la analogía de la trabe.

Se realizó un análisis de costos que aunque es aproximado permite establecer que el sistema propuesto representa menor costo (20% según el análisis hecho) que el sistema tradicional, la diferencia puede ser mayor en caso de construcción sistemática.

De esta manera se comprobaron los supuestos planteados en el trabajo:

- a) La construcción modular o de subensambles se comporta como un sistema monolítico.
- b) La junta tratada con los procedimientos aquí expuestos permite un comportamiento integral.
- c) El modelo experimental consistente de dos módulos permitió estudiar el comportamiento estructural de conjunto.
- d) El comportamiento estructural observado permite establecer que el sistema propuesto

puede ser diseñado con los métodos de diseño convencionales.

- e) El comportamiento del modelo se puede extender al de una construcción escala uno a uno.
- f) El sistema propuesto tiene ventajas económicas respecto a la construcción tradicional.

Finalmente para dar continuidad a esta investigación se puede recomendar realizar un estudio experimental con un modelo representativo de un sistema de placa plegada con acero de preesfuerzo. También se podrá explorar la posibilidad de hacer elementos prefabricados con la geometría y armados similar a los del modelo aquí estudiado con el objeto de ser utilizados en vivienda y otras construcciones para diferentes usos, como clínicas, oficinas así como también en entresijos a los que se agregaran un relleno ligero o un sistema de tabletas, también

prefabricadas, para tener una superficie superior plana.

---

## RECONOCIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero a la UAEM a través de la Secretaría de Investigación. El trabajo aquí reportado forma parte del proyecto intitulado "Propuesta para construir losas plegadas de C/R a partir de placas solas y en subsambles; análisis y diseño de la conexión y estudio experimental de un modelo" con clave 1954/2004-2. El trabajo experimental se realizó en el laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería, se agradece a todo el personal su valiosa asistencia en particular a los Ingenieros María Esther Antonio Salinas y Sergio Alejandro Díaz Camacho.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACI Committee 334. (1992). "Concrete Shell Structure- Practice and Commentary (ACI 334 IR-92)" American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 14pp
2. Billington, D.P. (1982). "Thin Shell Concrete Structures", 2º Edition, McGraw-Hill Book Co, New York ,373pp
3. Huber, R.W. (1986). "Air Supported Forming-Will it work?" Concrete International, V.8, No1, pp13-17
4. IIAS Working Group No5. (1999). "Recommendations for Reinforced Concrete Shells and Folded Plates", International Association for Shell and Spatial Structures, Madrid, Spain,66pp
5. Luis Rojas Alonso. (1995). "Introducción al Sistema de Arcos Progresivos (AP) Aplicado a Puentes: Estudios Analíticos", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería UAEM, Toluca, México
6. Meter H. Emmons. (1993). "Concrete Repair and Maintenance Illustrated ", RS Means USA,295 pp
7. Paulo Helene, Fernando Pereira, Editores. (2003). "Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón", Rehabilitar CYTED, Bandeirantes, Brasil 741pp
8. Rogelio Reyes Rosales. (1998). "Estructuras Neumáticas", Fundación ICA, México,130pp
9. Tedesko, A. (1953). "Construction aspects of Thin Shell Structure", ACI Journal, Proceedings V. 49, No.6, pp. 505-520.
10. Timoshenko and Young. (1983). "Theory of Plates and Shell", 3º Edition McGraw-Hill Book Co, New York, 520pp

---

Este documento se debe citar como:

Ramírez de Alba, H. Camacho Zepeda, E. y Valdez Medina, E. A. (2006). **Estudio experimental sobre un procedimiento para construir placas plegadas de concreto reforzado**. *Revista Ingeniería*, 10-1, pp.5-16 ISSN: 1665-529X