

Estudio con modelos de una cubierta doblemente plegada, por el método del moiré

ALBERTO PONCE y EDI W. JURI

Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Agrimensura

ABSTRACT

In this paper, the study of a double-folded-plate, which is part of a project for the building of Escuela Industrial de Colón (Montevideo), is carried out. The prototype is a pre-fabricated reinforced brick construction.

A model, also a pre-fabricated reinforced brick construction, was built in the Instituto de la Construcción de la Universidad del Trabajo, at a scale of 1/5. Then, the Instituto de Ingeniería Civil, using perspex model, studied the moment distribution at the plate of the structure, under different load states. In this case, the Moiré's method was applied. Diagrams of the moments M_x and M_y are given for different cases.

RESUMEN

Se plantea en este trabajo el estudio de una bóveda doblemente plegada, proyectada para el edificio de la Escuela Industrial de Colón (Montevideo). El prototipo es en cerámica armada y prefabricada. En el Instituto de la Construcción de la Universidad del Trabajo se realizó un modelo, también en cerámica armada y prefabricada, a escala 1/5.

Luego, en el Instituto de Ingeniería Civil, se estudió en modelos de perspex la distribución de momentos en las placas que forman las faldas, bajo distintos estados de carga. El método usado en este caso fue el del Moiré. Se presentan curvas de momentos M_x y M_y en diferentes casos.

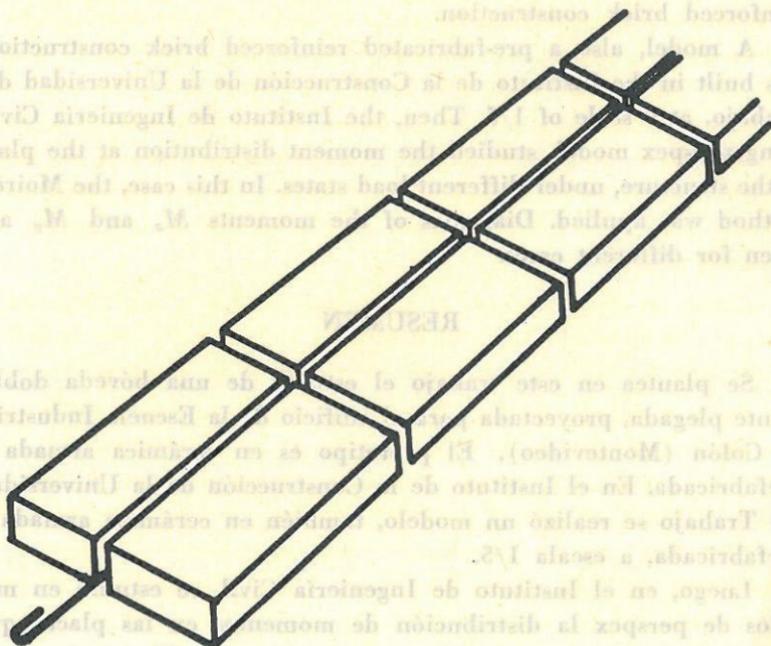
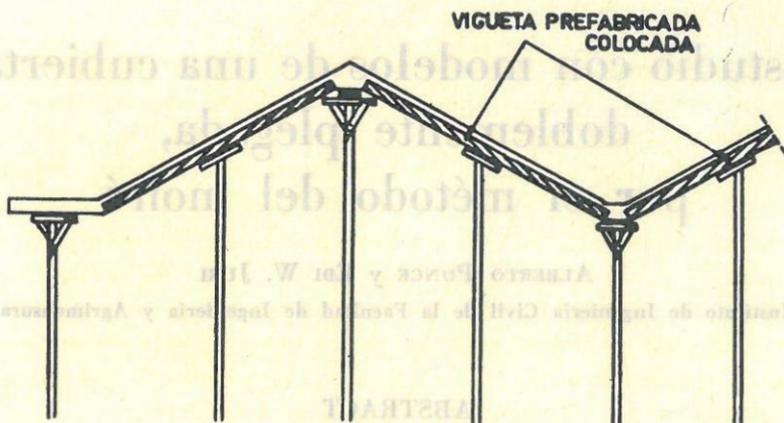


Figura 1. — Detalle del sistema de montaje y de las viguetas prefabricadas de ladrillo.

1. INTRODUCCION

Con destino a la Escuela Industrial de Colón (Montevideo), perteneciente a la Universidad del Trabajo, se proyectó una estructura tabicada doblemente plegada (proyecto arquitectónico del Arq. Walter Domingo; cálculo de estructura del Ing. Alberto Ponce), concebida en base a viguetas de ladrillo prefabricadas que luego se montaban con un sencillo apuntalado sin necesidad de encofrado. Esta estructura, de 14,40 m de luz, se ha usado como módulo un número elevado de veces, lo que justificó un estudio detallado con modelos, para un mejor conocimiento de su comportamiento estructural. En la figura 1 se ve un detalle del sistema de montaje y de la vigueta prefabricada de ladrillo.

2. ESTUDIO CON MODELOS

Para este estudio se planteó en primer lugar, la construcción de un modelo a escala 1:5, tratando en lo posible de usar idénticos materiales e iguales procedimientos constructivos que en el prototipo. Es así, que se debió buscar el procedimiento para construir ladrillos a escala 1:5. Obtenidos éstos, se construyeron las viguetas, también a escala 1:5 (figura 2), cuya armadura era de alambre que representaba a escala la armadura $\varnothing 6$ prevista para cada junta y con características resistentes similares a las usadas en el prototipo.

Como se comprenderá, este proceso obligó a múltiples ensayos para determinar las características del acero y los ladrillos, y del comportamiento conjunto bajo forma de viguetas.

Para el ensayo de las viguetas, se construyó un sencillo aparato en el Instituto de la Construcción de la Universidad del Trabajo (ver figura 3), donde también se construyó el modelo en general (figura 4) por el modelista Gerardo Fochs, bajo la dirección del Arq. Carlos Cortazzo y del Ing. Alberto Ponce, y la supervisión del Ing. Julio Ricaldoni. Luego de probado el comportamiento de las viguetas prefabricadas, se les agregó una carpeta de 8 mm. (4 cm. a escala 1:5) a un conjunto de éstas y se les sometió a ensayo.

Todo este proceso condujo al conocimiento del comportamien-

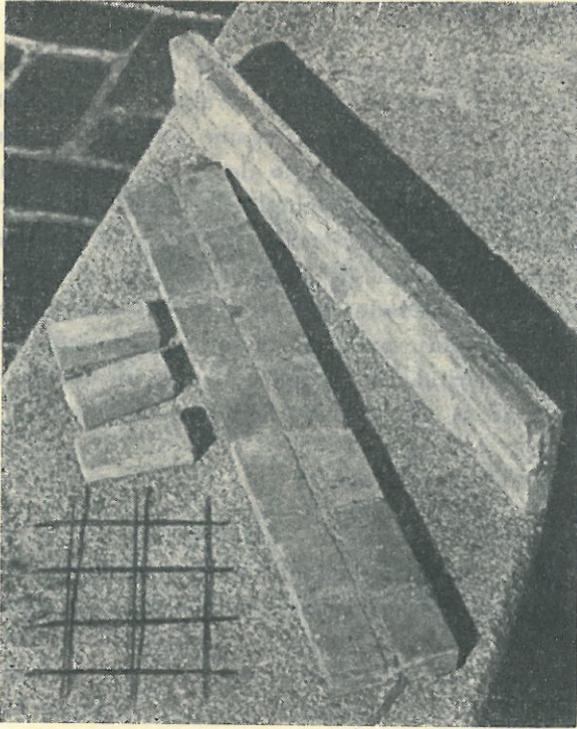


Figura 2

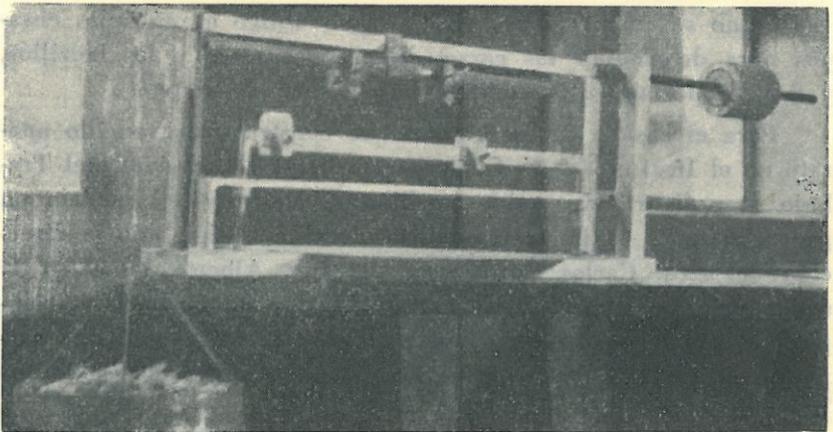


Figura 3. — Aparato para ensayo de viguetas.

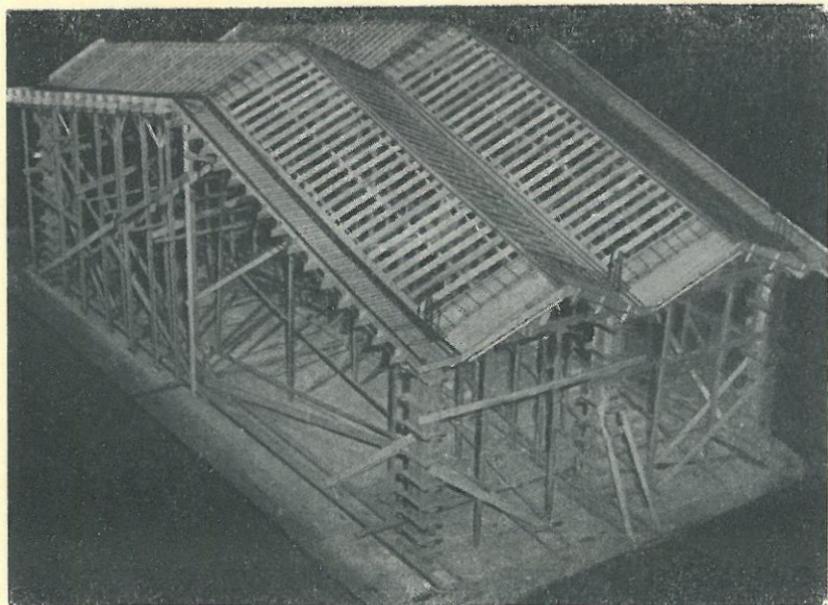


Figura 4. — Modelo a escala 1:5 (encofrados).

to de los elementos constructivos del modelo y a la seguridad de que dichos elementos tenían propiedades semejantes a las de los reales usados en el prototipo. Conseguido esto, se procedió a la construcción del modelo a escala 1:5.

En la figura 5 se muestra la forma de aplicación de la carga, que se realizaba por medio de pesas colocadas sobre tablonces a ambos lados del modelo. Los tablonces apoyaban sobre perfiles metálicos transversales, los cuales transmitían su carga por medio de sostenes elásticos a un número elevado de puntos del modelo, a los efectos de reproducir aceptablemente una carga uniforme.

Construido el modelo y su sistema de carga, se procedió a su ensayo con la colaboración del Departamento de Estructuras del Instituto de Ingeniería Civil, quien realizó la lectura de flechas, medida de deformaciones unitarias y la depuración e interpretación de esos datos.

También este Departamento se encargó de la realización de un modelo en perspex para la determinación de tensiones por análisis con tensómetros mecánicos y eléctricos.

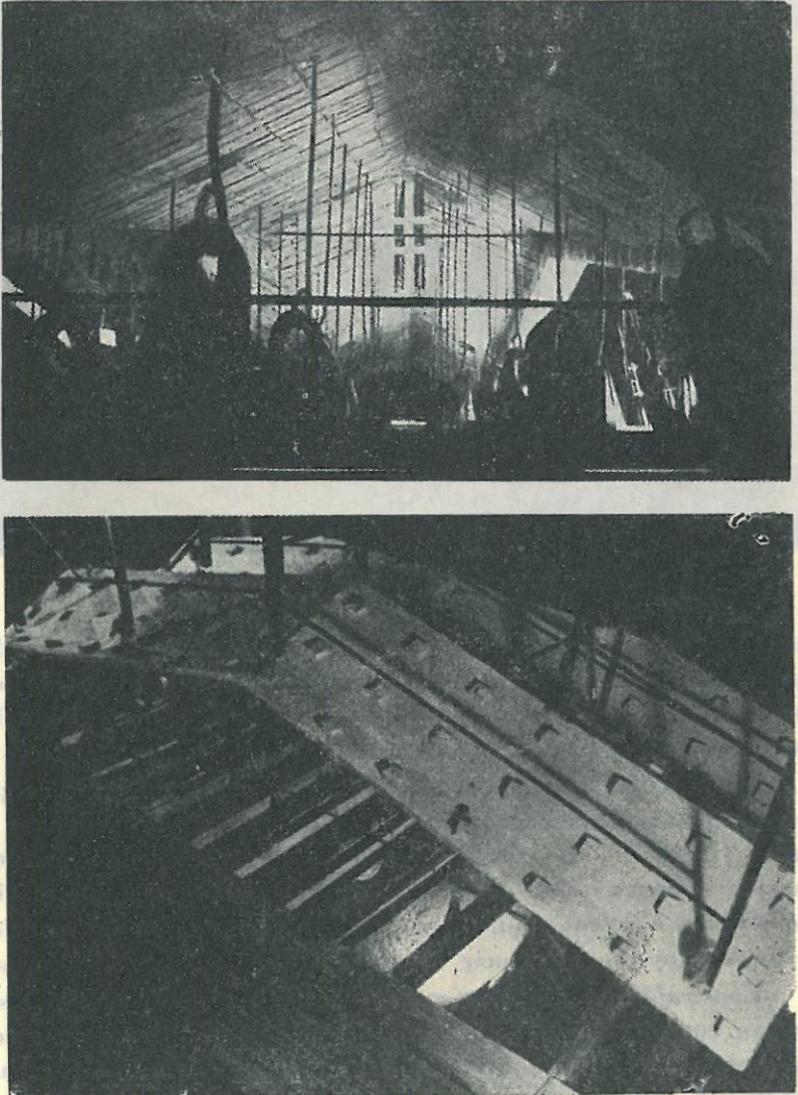


Figura 5. — Sistema de carga del modelo a escala 1:5.

3. ESTUDIO POR EL METODO DEL MOIRE

El Departamento de Elasticidad del Instituto de Ingeniería Civil tomó a su cargo la confección de un modelo en perspex negro, para la determinación de momentos en las placas que constituyen las faldas de un elemento de doble plegado (figura 6).

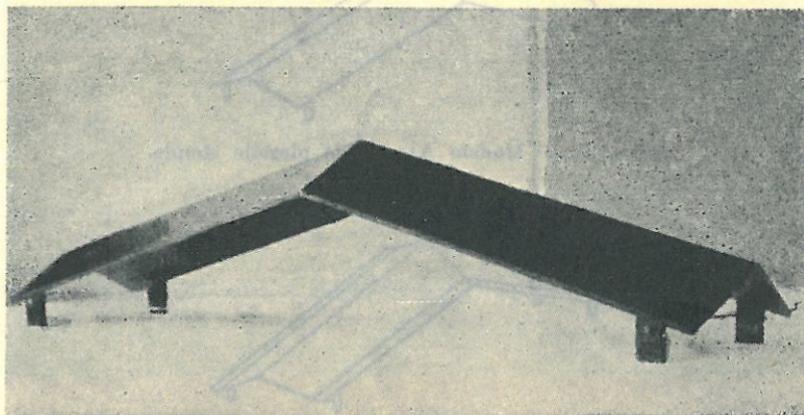


Figura 6. — Modelo en Perspex negro para estudio por el Método del Moiré.

El método usado para esto ha sido el del moiré ya que, estando la estructura formada por planos, este método parece especialmente indicado, si se trata de la determinación de momentos.

El estudio se encaró con el objeto de determinar la distribución de momentos en las faldas del doble plegado con distintos estados de carga y en dos casos que interesaba comparar:

Modelo A — El doble plegado simple (figura 7)

Modelo B — El mismo modelo con “aleros” (figura 8).

3.1. Escala del modelo

La escala del modelo se eligió de manera que se conservara también para el espesor del perspex disponible, lo que dio lugar al siguiente valor:

$$\text{escala del modelo} = \frac{1}{20,8}$$

Las dimensiones del modelo se ven en la figura 9.

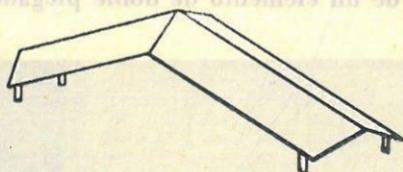


Figura 7. — Modelo A): Doble plegado simple.

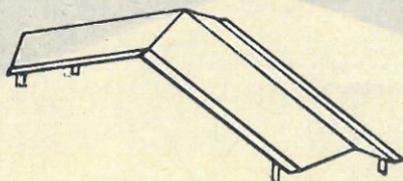


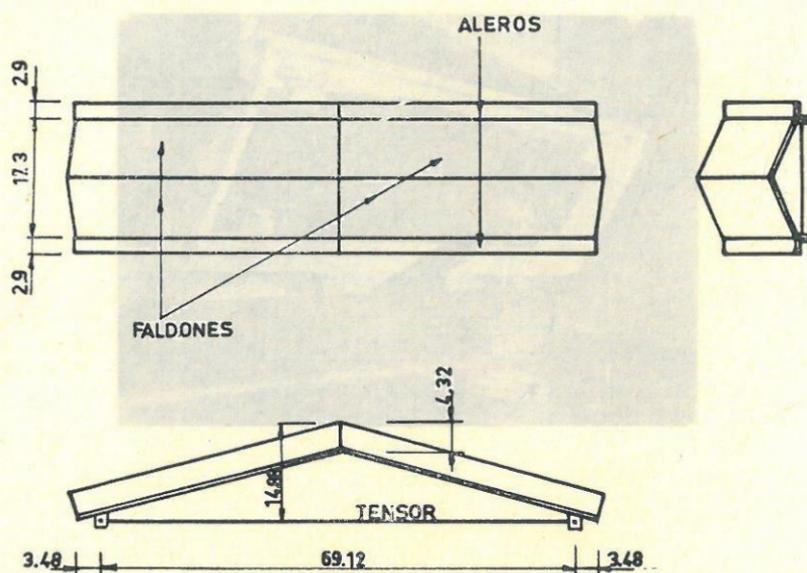
Figura 8. — Modelo B): Doble plegado con "aleros".

3.2. Disposición del modelo en el Aparato de Moiré

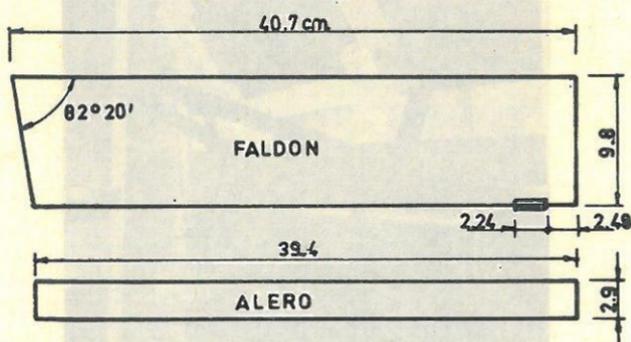
Por razones de simetría, en la geometría y en las cargas, se analizó una sola falda. Para ello, se dispuso el modelo con la falda a estudiar, perpendicular al eje óptico del aparato, según puede verse en la figura 10.

3.3. Sistema de carga

En la figura 11 se observan los sistemas de sostén y carga del modelo que se adoptaron. Se utilizó una sola carga puntual en cada falda, la cual se distribuía en todo su plano, interponiendo una placa rígida de madera y dos capas de espuma de látex, de espesor 4,8 cms. (ver figura 12), lo que nos permitió suponer la carga uniformemente distribuída en toda la placa.



PLANTA Y ALZADOS DEL MODELO



DETALLE DE 1 FALDA Y UN ALERO

Figura 9. — Dimensiones del modelo estudiado por el Método del Moiré.

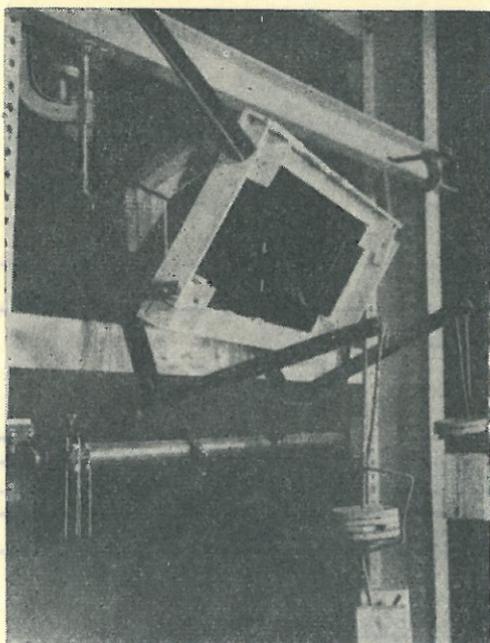
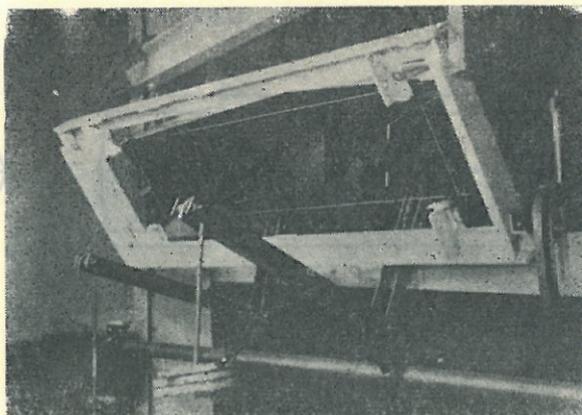


Figura 10. — Disposición del modelo en el aparato de Moiré.

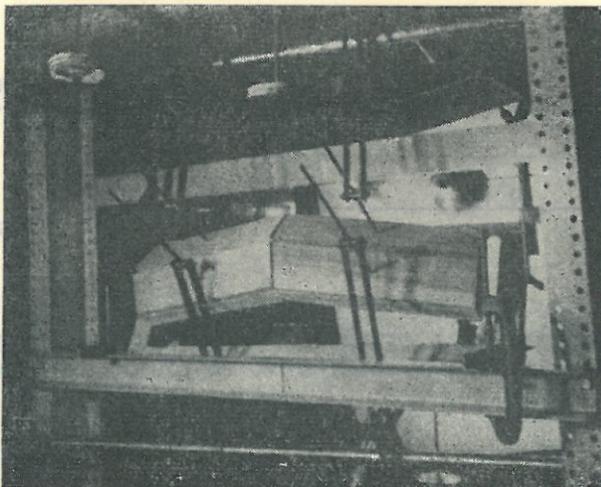
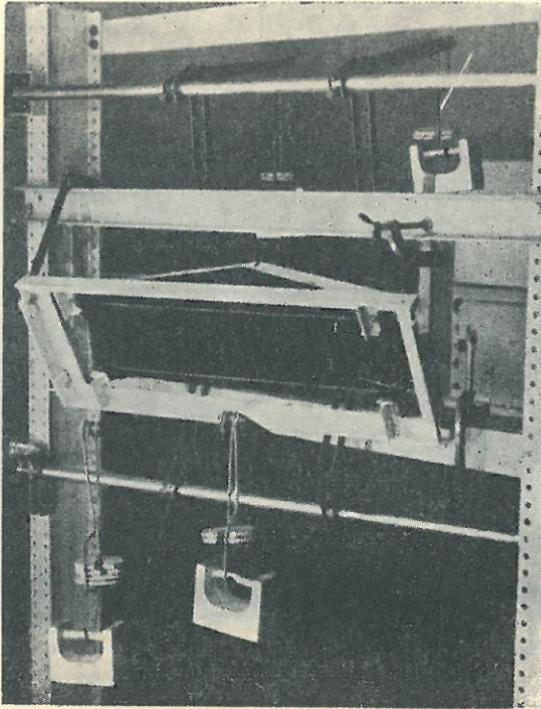


Figura 11. — Sistema de carga

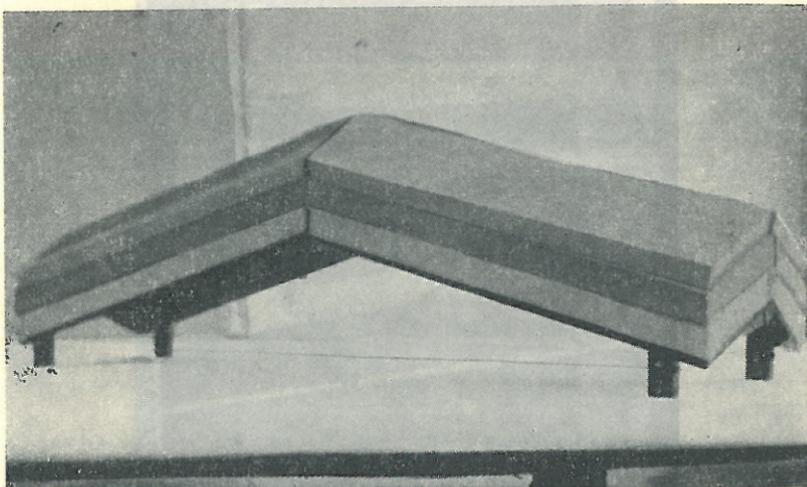
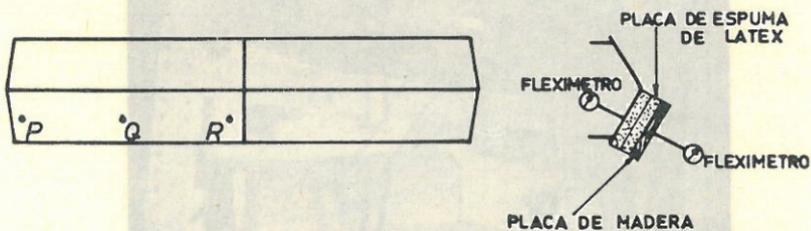


Figura 12. — Detalle del sistema de carga uniforme.



MEDIDA DE LA DEFORMACION DE LA PLACA DE ESPUMA DE LATEX EN EL DISPOSITIVO DE CARGA DEL MODELO.—

Figura 13

Para verificar la uniformidad en la distribución de la carga se hizo un ensayo que consistió en medir la deformación de las capas de espuma de látex, mediante 3 pares de flexímetros dispuestos en la forma indicada en la figura 13.

Las deformaciones medidas, en los puntos P, Q, R fueron 1,65, 1,50 y 1,59 milímetros, respectivamente. Estos valores nos aseguran suficiente uniformidad en la distribución de la carga de estudio y justifican el sistema de carga utilizado.

3.4. Estados de carga

De acuerdo al sistema de carga usado, se han elegido tres estados fundamentales:

- a) Carga uniforme en las 4 faldas.
- b₁) Carga uniforme en las 2 faldas derechas.
- b₂) Carga uniforme en las 2 faldas izquierdas.

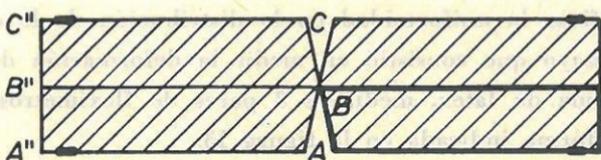
Estos estados de carga se esquematan en la figura 14. Estas cargas se han tomado verticales en todos los casos, habiéndose utilizado en el estudio una carga total uniforme de 10 kg 160 por falda, para el modelo A y de 16 kg 722 por falda en el modelo B.

Con estos estados pueden cubrirse diversos casos de cargas simétricas y antisimétricas.

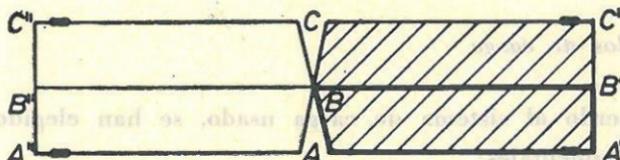
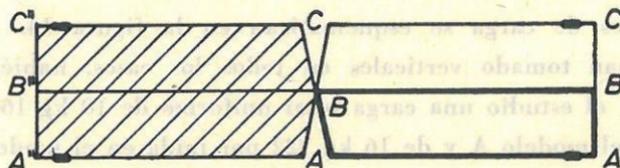
3.5. Determinación de momentos

Los diagramas de momentos se han determinado a lo largo de las líneas paralelas a los ejes Ox y Oy indicadas en la figura 15.

Como se recordará, cada franja del moiré es el lugar de los puntos en los cuales, el giro en la dirección normal a las líneas paralelas de la pantalla, es constante. El valor de ese giro está dado en función del orden que corresponde a esa franja. En otras pala-



a) CARGA UNIFORME EN LAS 4 FALDAS

b₁) CARGA UNIFORME EN LAS 2 FALDAS DERECHASb₂) CARGA UNIFORME EN LAS 2 FALDAS IZQUIERDAS

FALDA FOTOGRAFIADA A B B' A'



FALDAS CARGADAS

NOTA:

SE HA ESQUEMATIZADO LA ESTRUCTURA
SUPONIENDO DESARROLLADAS EN UN
MISMO PLANO, LAS 4 FALDAS.

Figura 14. — Estados de cargas estudiados.

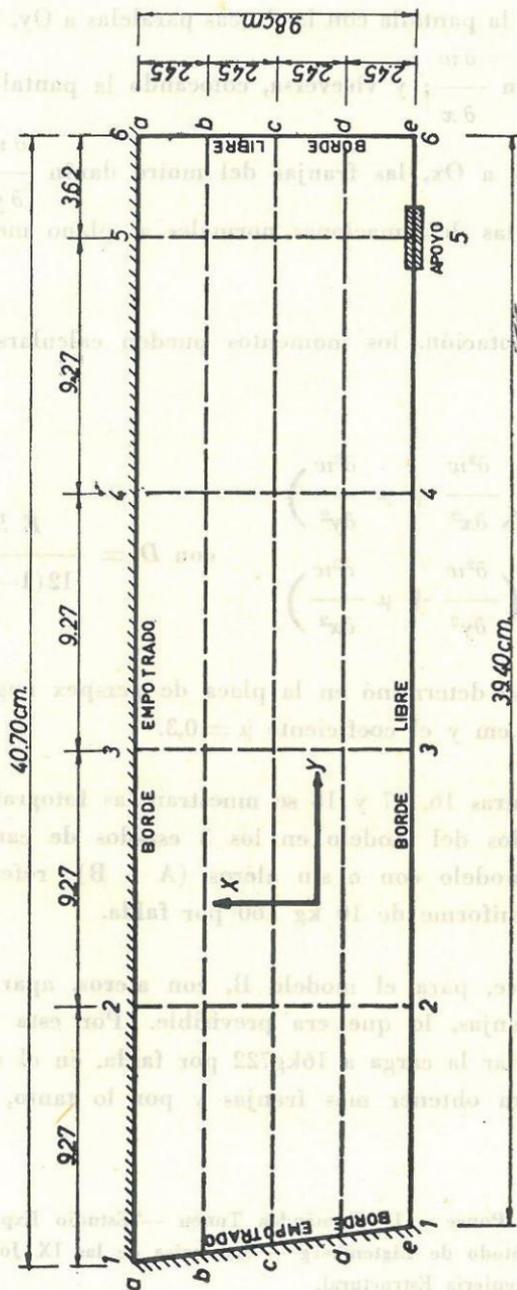


Figura 15. — Ejes y secciones de una falda del modelo en que se estudiaron los momentos.

bras, colocando la pantalla con las líneas paralelas a Oy, las franjas

del moiré darán $\frac{\partial w}{\partial x}$; y viceversa, colocando la pantalla con sus

líneas paralelas a Ox, las franjas del moiré darán $\frac{\partial w}{\partial y}$, donde w representa, las deformaciones normales al plano medio de la placa. (*)

Con esa notación, los momentos pueden calcularse con las expresiones:

$$M_x = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$M_y = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

$$\text{con } D = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)}$$

La rigidez D se determinó en la placa de perspex negro, siendo igual a 298 kg.cm y el coeficiente $\mu = 0,3$.

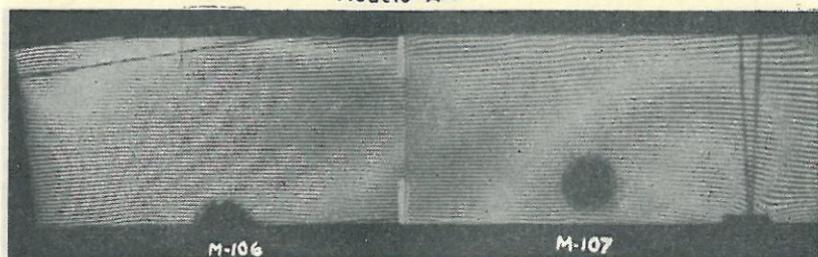
En las figuras 16, 17 y 18 se muestran las fotografías de los moirés obtenidos del modelo en los 3 estados de carga y considerando el modelo con o sin aleros (A ó B), referidos a la misma carga uniforme de 10 kg 160 por falda.

Como se ve, para el modelo B, con aleros, aparece menor número de franjas, lo que era previsible. Por esta razón, fue necesario ampliar la carga a 16kg722 por falda, en el estudio del modelo B, para obtener más franjas y por lo tanto, resultados

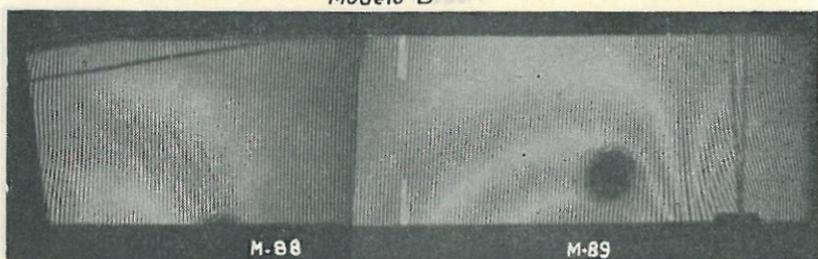
(*) Alberto Ponce y H. Fernández Tuneu —“Estudio Experimental de Placas por el método de Ligtemberg”— Memorias de las IX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural.



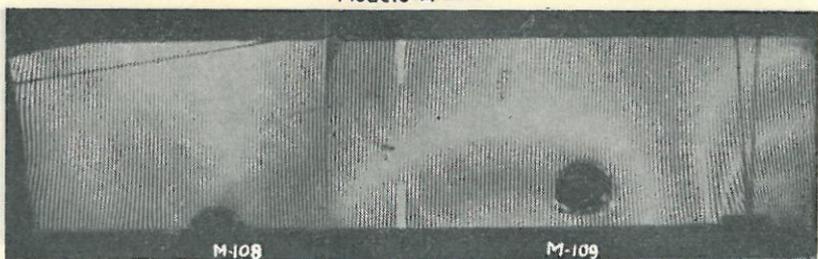
Modelo A



Modelo B



Modelo A



Modelo B

Figura 16. — Comparación de los moirés para los modelos A y B con el estado de carga a): "carga uniforme en las cuatro faldas".

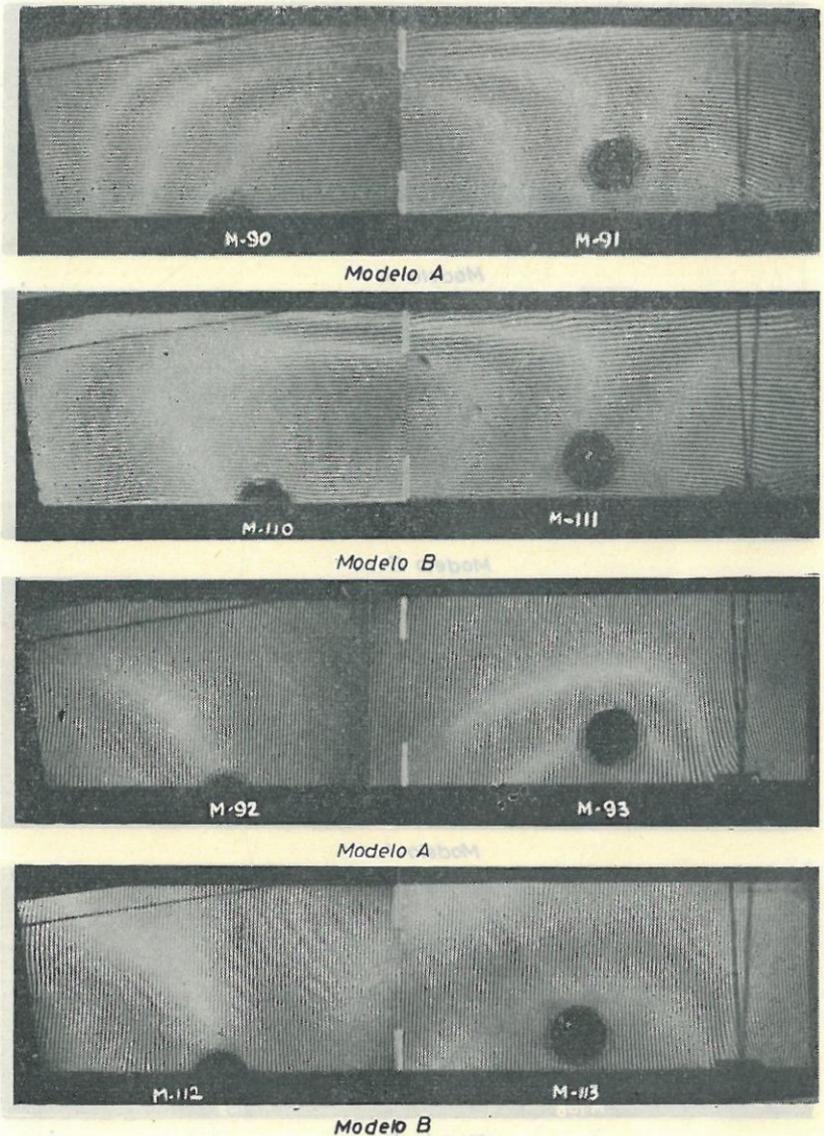
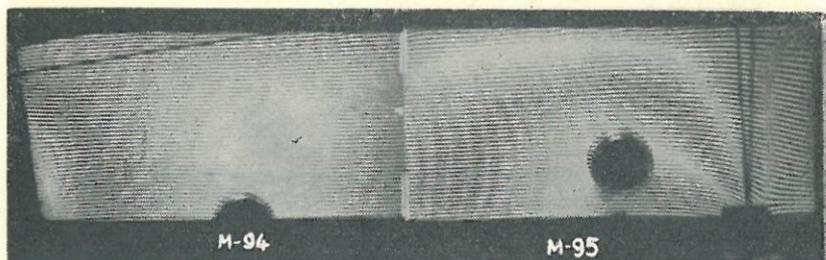
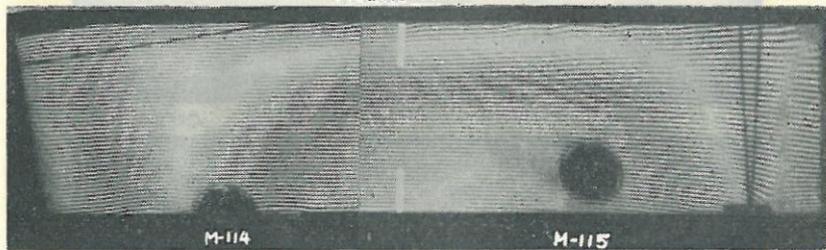


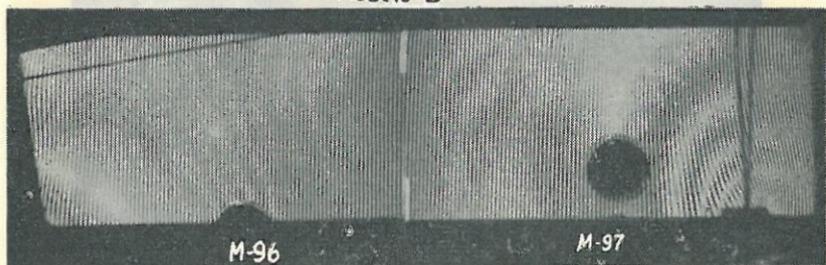
Figura 17. — Comparación de los moirés obtenidos para los modelos A y B con el estado de carga b_1 : "carga uniforme en las dos faldas derechas".



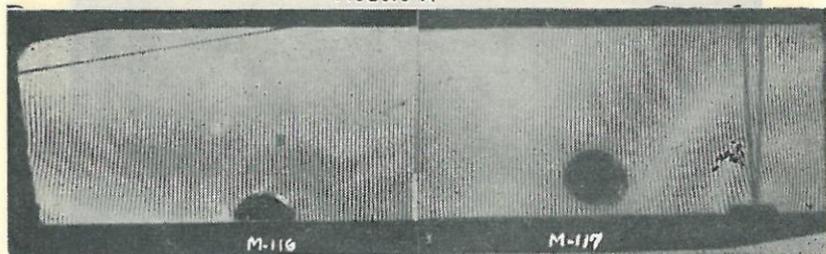
Modelo A



Modelo B



Modelo A



Modelo B

Figura 18. — Comparación de los moirés obtenidos para los modelos A y B con el estado de carga b_2): "carga uniforme en las dos faldas izquierdas".

Figura 19. — Moirés del modelo B para la carga de 10 Kg. 722 por faldas

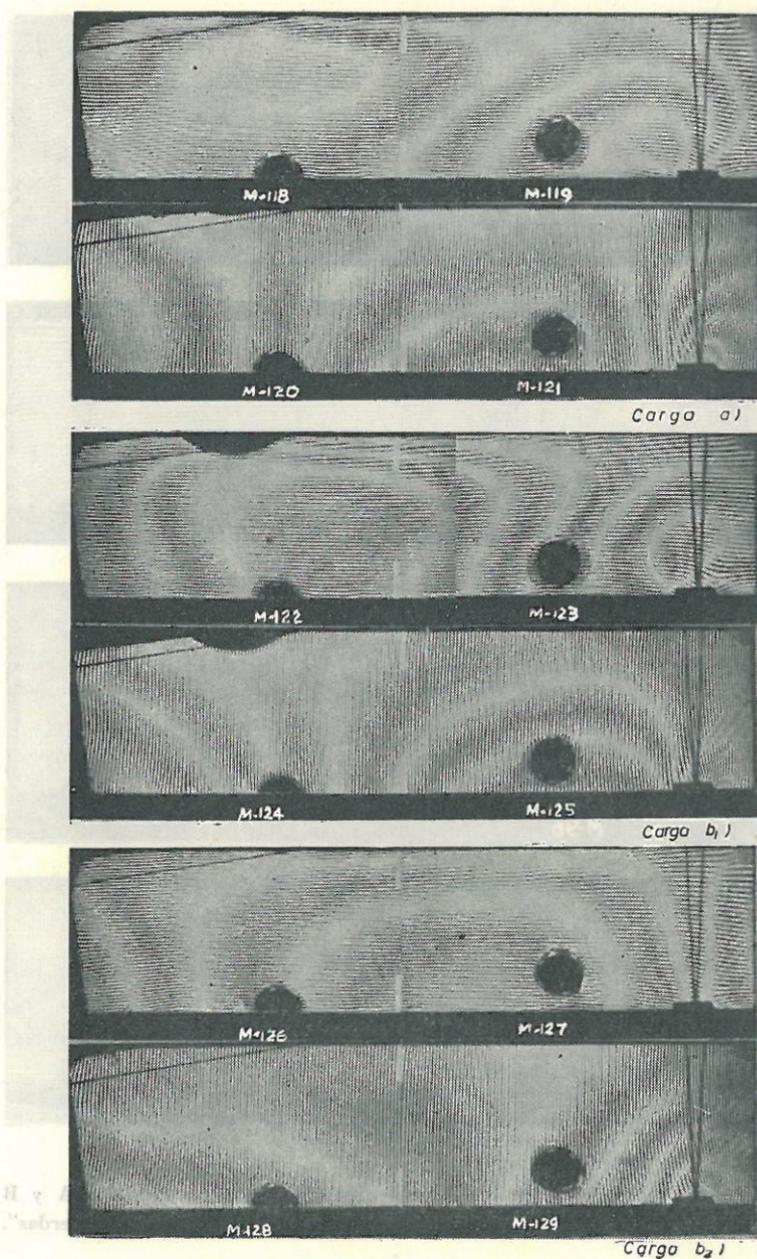


Figura 19. — Moirés del modelo B, para la carga de 16 Kgs. 722 por falda.

más exactos. Los moirés del modelo B, para la carga de 16kg/22 por falda, pueden verse en la figura 19.

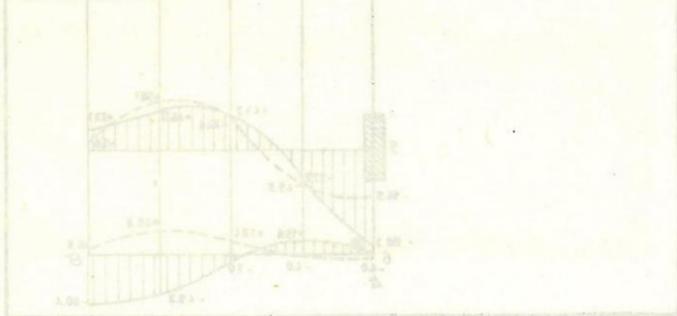
Derivando gráficamente, se obtuvieron las derivadas segundas $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ y $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ y luego, mediante las fórmulas de M_x y M_y , antes indicadas, se determinaron los valores que dieron lugar a los diagramas de momentos representados en las figuras 20, 21, 22, 23, 24 y 25 para los distintos estados de carga.

Los valores de los momentos correspondientes al prototipo, que son los expresados en los diagramas, se obtuvieron suponiendo una carga permanente de 300 kg/m² de superficie de falda para el estado de carga a), y de 100 kg/m² en los estados de carga b₁) y b₂). Estos valores se han elegido para tener los elementos necesarios para realizar diferentes combinaciones de cargas permanentes y viento, afectándolos en cada caso con los coeficientes correspondientes.

Como puede verse, los valores de los momentos son pequeños, lo que justifica la baja cuantía de acero empleada en el proyecto de la estructura.

3.6. Conclusiones

El conjunto de determinaciones realizadas en los modelos, ha permitido juzgar que este tipo de solución en doble plegado, de cerámica armada, es adecuado para salvar luces del orden de los 30 mts. o más, sin problemas de comportamiento ni de mayores refuerzos para la armadura transversal, y con el mismo procedimiento constructivo.



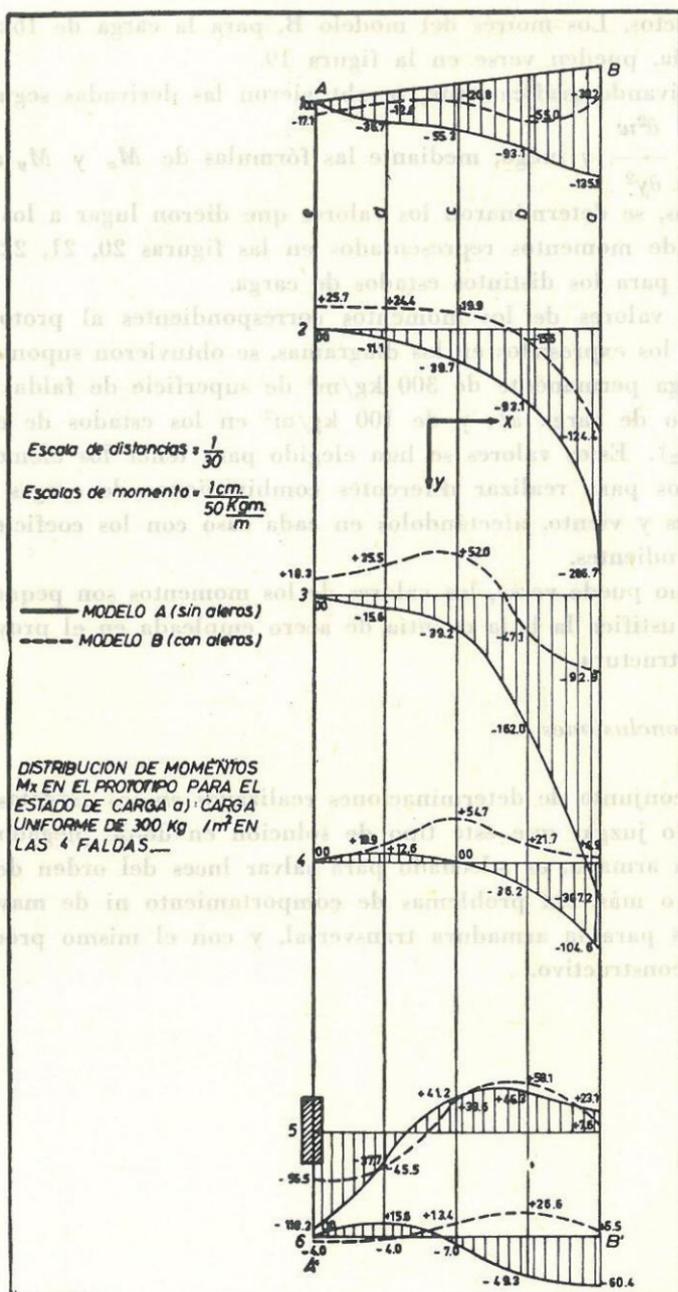


Figura 20

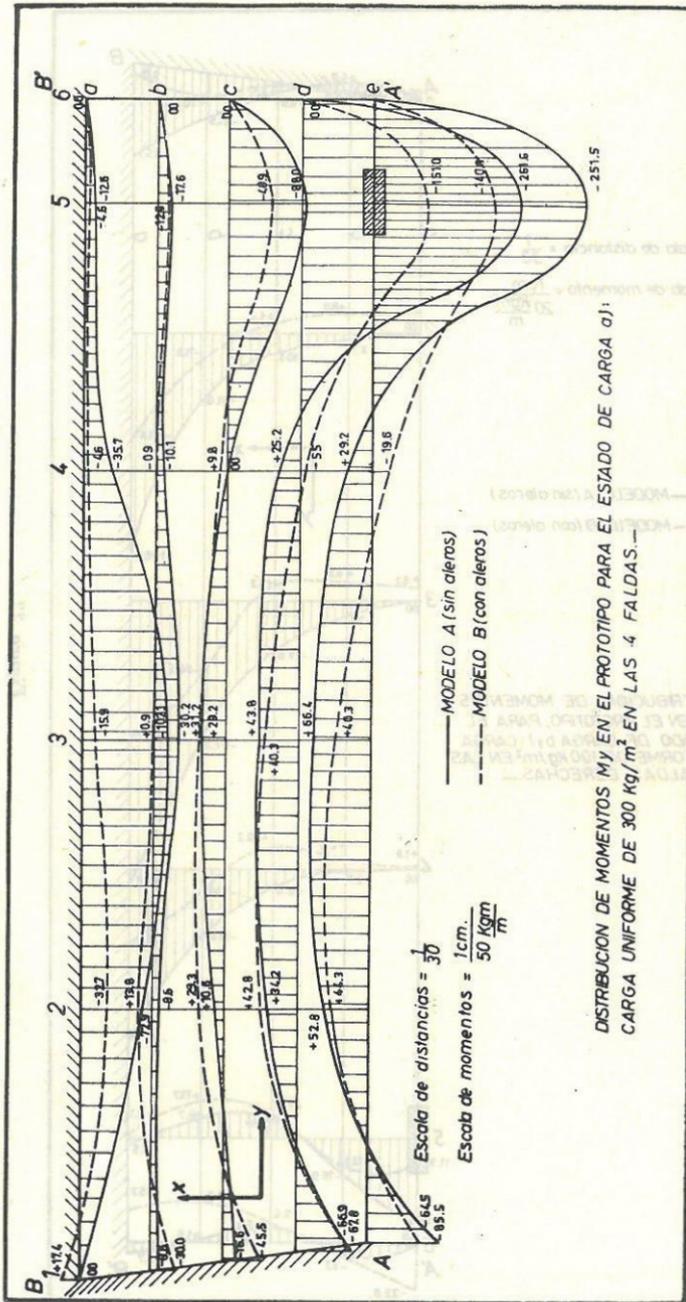


Figura 21

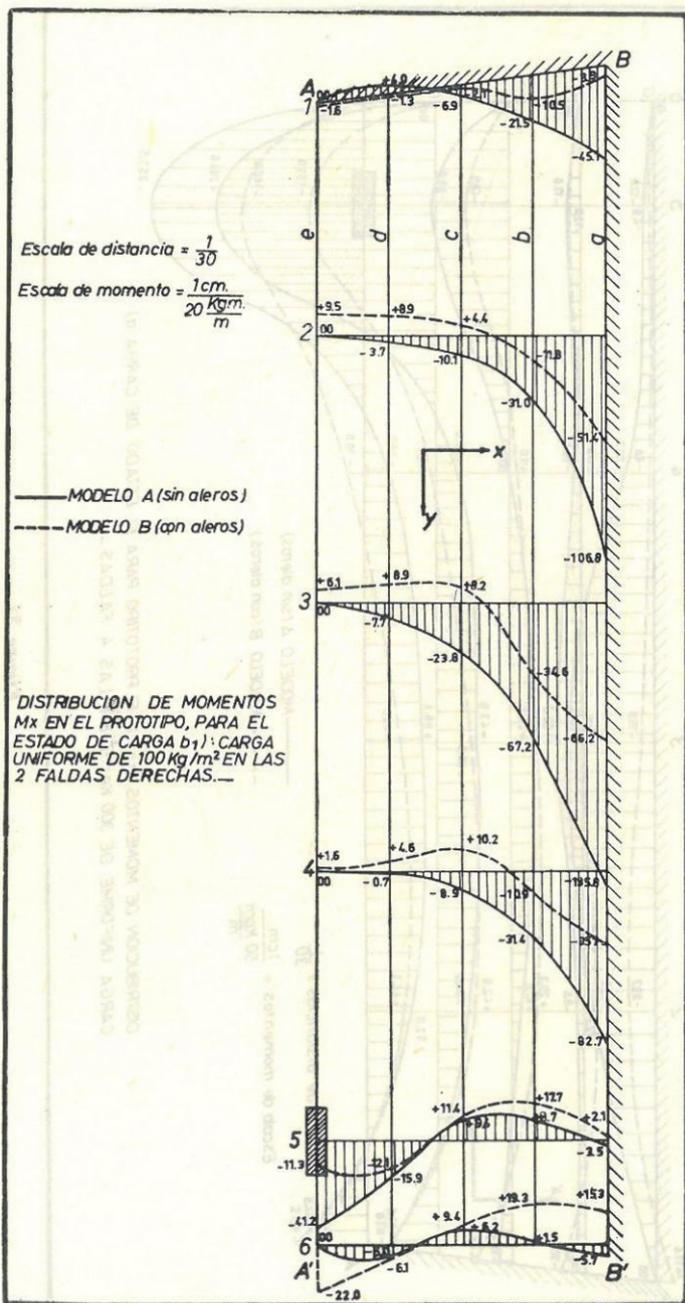


Figura 22

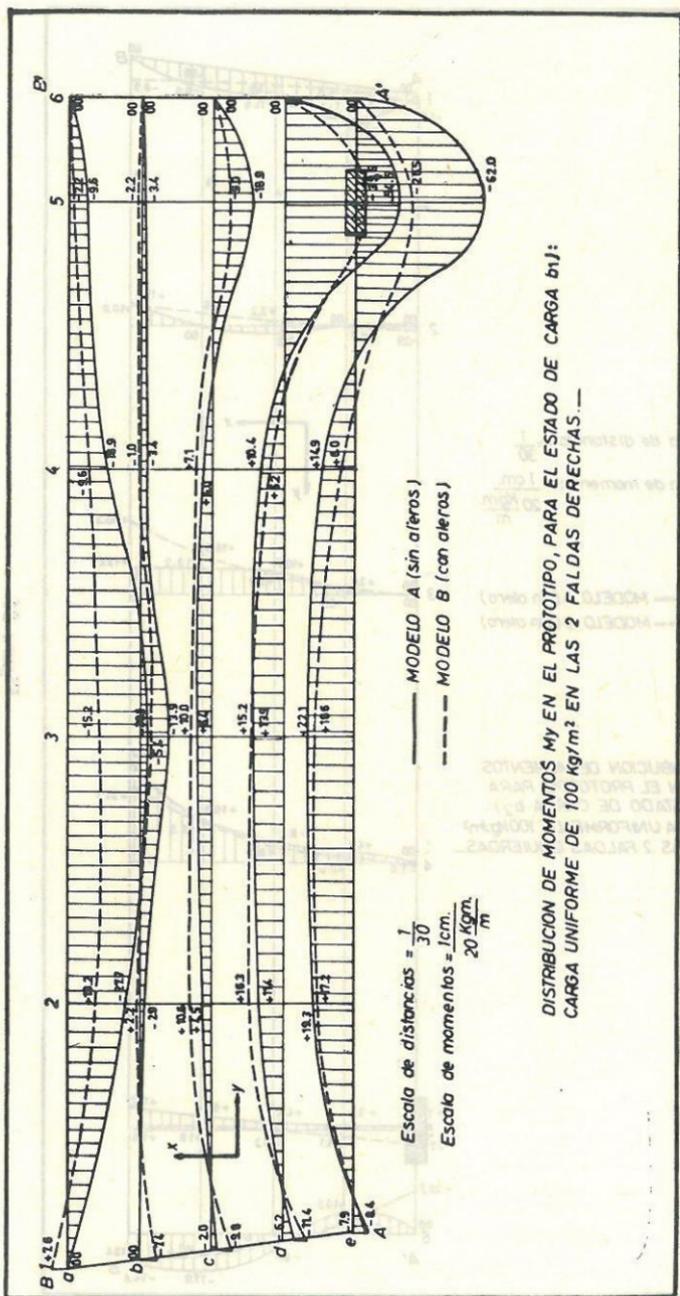


Figura 23

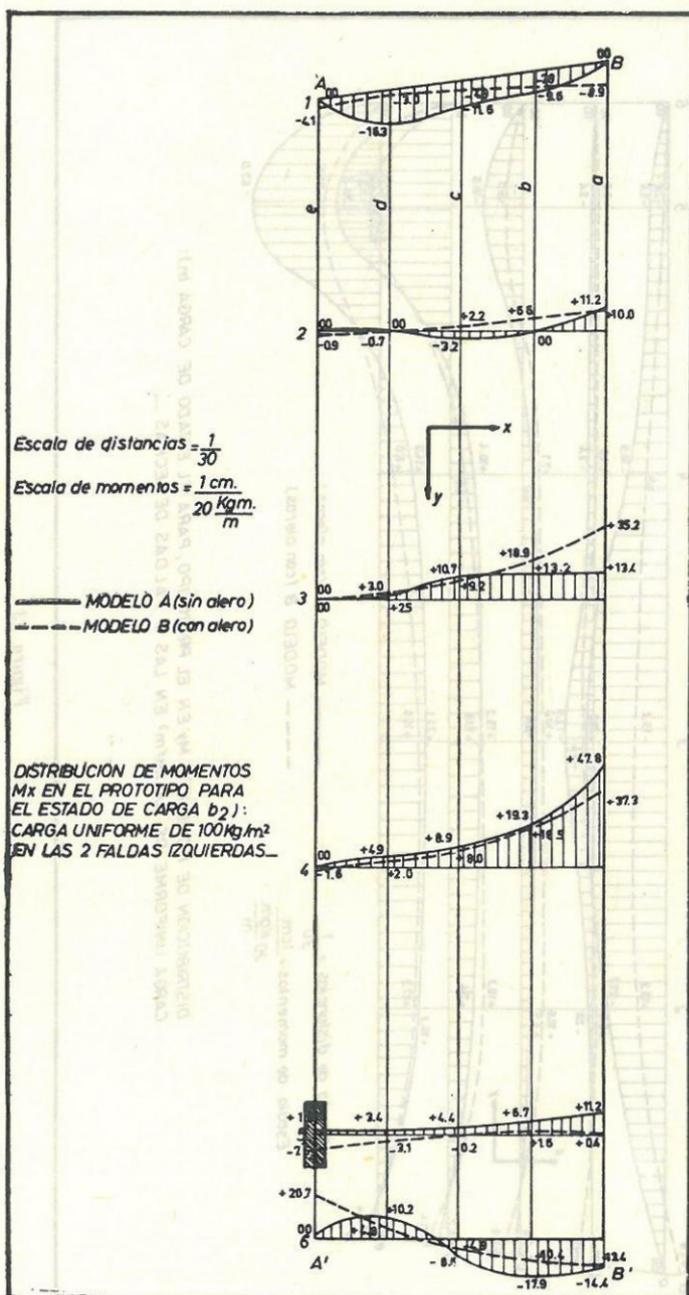


Figura 24

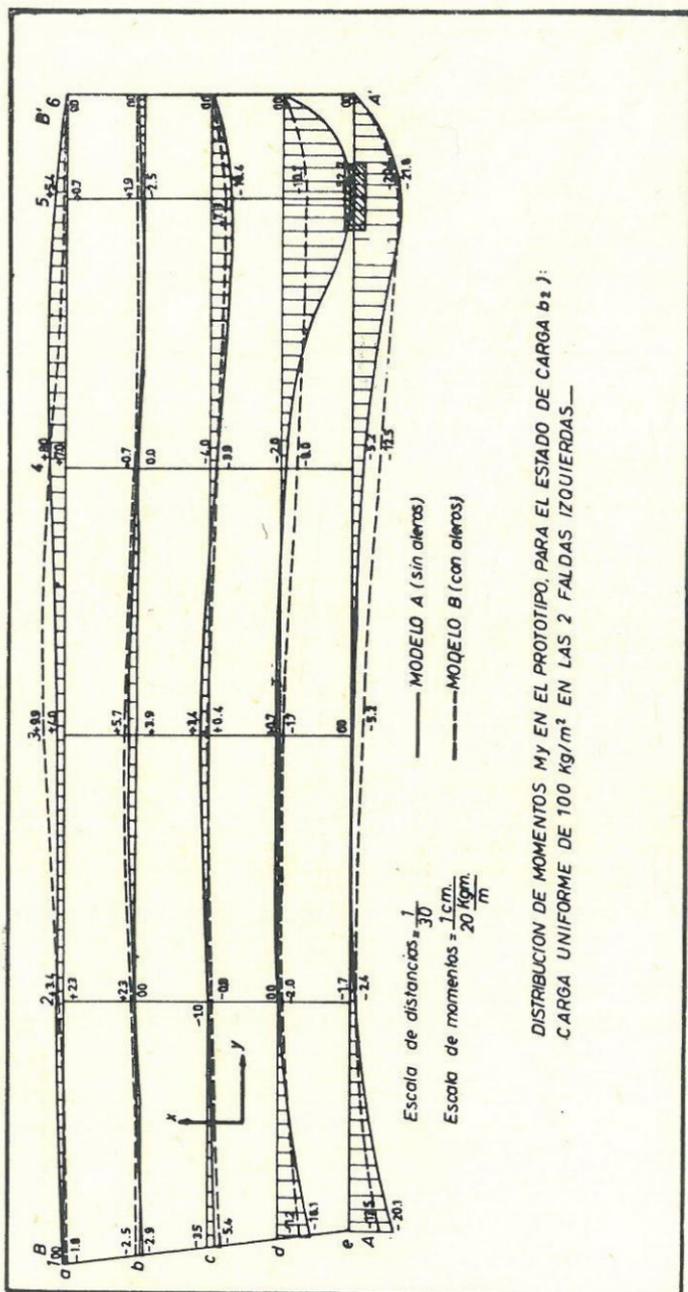


Figura 25

