

diseño experimental de estructuras laminares

OSCAR A. ANDRÉS

Profesor titular del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina

sinopsis Esencialmente la técnica de **diseño** propuesta consiste en obtener la forma del modelo —y de la estructura, consecuentemente— por las posiciones que toman los nudos de una retícula de hilos de goma sometida a la acción de las cargas.

Simultáneamente con la forma se puede reconocer el **plexo tensional**: midiendo la longitud de cada lado de la retícula y la fuerza que lo solicita (alargamiento del hilo de goma) es posible obtener, en forma aproximada, las direcciones y esfuerzos principales.

Toda modificación en la forma produce modificación en los lados (longitudes y alargamientos) de la retícula, o sea, **todo cambio en la geometría tiene una respuesta en términos de fuerzas**.

Como verificación, se aplica la técnica propuesta —que denominamos «retícula elástica»— a una cúpula esférica.

445-10

Se analizan las limitaciones y posibilidades de dicha técnica.

1 Diferentes técnicas de estudio de estructuras por modelos

Teniendo en cuenta sus objetivos, las técnicas de estudio experimental de estructuras mediante modelos pueden clasificarse en dos grupos:

- a) técnicas cuyo objetivo es la *verificación* de una estructura de forma definida (o al menos tentativamente definida);
- b) técnicas cuyo objetivo es el *diseño* de una estructura donde la forma es una de las incógnitas a determinar.

Las diferencias entre ambas técnicas son bien notorias:

- 1.º En las técnicas de verificación, el modelo constituye un instrumento de *análisis* comparable al cálculo aplicado sobre un modelo matemático; en las técnicas de diseño, el modelo se utiliza no sólo como instrumento de análisis, sino también, y fundamentalmente, como herramienta de *síntesis* que permite contrapesar ventajas e inconvenientes de posibles soluciones; mientras en el primer caso el ataque del problema se hace en profundidad, en el segundo se realiza en extensión (1) (*).
- 2.º Las técnicas de verificación son más costosas y requieren mayor tiempo para la construcción y ensayo del modelo que las técnicas de diseño (2) (3) (4).

Las diferencias apuntadas están señalando que ambas técnicas no compiten, sino, por el contrario, se complementan. En efecto, el proceso lógico para proyectar una estructura por la vía experimental comienza por la selección de una forma o esquema estructural (técnica de diseño) y concluye con la verificación del modelo mediante ensayos elásticos y/o de rotura.

(*) Las referencias bibliográficas se indican al final del trabajo.

La extraordinaria potencialidad adquirida por los procedimientos de análisis —experimental o matemático— permite en la actualidad resolver todo esquema estructural, aun aquellos formulados con olvido de las leyes físicas; esta circunstancia impone la necesidad, hoy más que nunca, de una meditada formulación de los esquemas estructurales. Los avances de la tecnología de la construcción, sumados a esa potencialidad del análisis, han liberado al proyectista de la rigidez de las formas convencionales conduciéndolo a las llamadas «formas libres». Estas nuevas posibilidades significan también nuevas responsabilidades: en la tarea creativa de las nuevas formas se deberán contrapesar aspectos funcionales, constructivos y estéticos, sin descuidar el problema estructural, ya que la forma libremente concebida no alcanzará el grado de estructura mientras no supere el inexorable examen de las leyes físicas.

La diversidad de los aspectos a considerar exige amplitud de criterio de parte del proyectista y el empleo de instrumentos adecuados capaces de atacar el problema en extensión; la aplicación de las técnicas de diseño experimental tiende a facilitar esa tarea.

Por otra parte, dentro del campo docente, el empleo de modelos físicos para diseño contribuye a desarrollar en el alumno la creatividad y la «sensibilidad» estructural, muchas veces aletargadas por el entrenamiento en los modernos procedimientos del análisis matemático tan absorbentes en su práctica como espectaculares en sus resultados (5).

El desarrollo de las técnicas de diseño es muy reciente, y entre los más importantes trabajos cabe mencionar los de: H. Caminos (6), H. Isler (7) (8) (9), J. F. Lobo Fialho (10), K. Saether (11), G. S. Ramaswamy (12). Un índice de la creciente importancia que se asigna al problema en la actualidad viene dado por el apreciable número de trabajos presentados sobre este tema en los últimos Congresos (13) (14).

No podemos dejar de señalar que el problema del diseño ha sido tratado también por diversos autores por la vía matemática (15) (16) (17) (18). Como ocurre en otros campos, ambas vías (la experimental y la matemática) convergen hacia el mismo objetivo, y avances por uno y otro camino se apoyan mutuamente en la exploración hacia la meta final.

En el trabajo que se expone a continuación se sigue la vía experimental, presentando una técnica de diseño que denominamos «retícula elástica».

2 Requerimientos exigidos

Antes de considerar en detalle la técnica que proponemos, enunciaremos los requerimientos que las técnicas experimentales de diseño, en general, deben satisfacer para alcanzar sus objetivos:

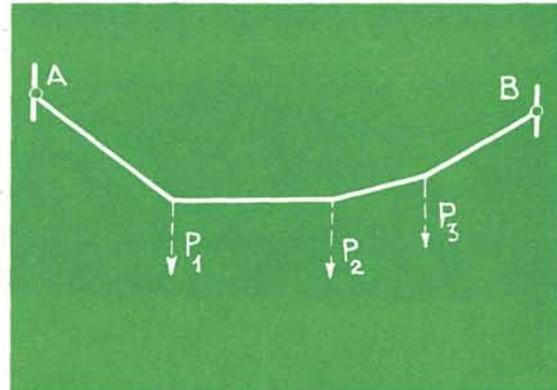
- 1.º Puesto que la forma es una de las incógnitas, el modelo (por su material y construcción) debe ser tal que acepte fácilmente variaciones en su geometría.
- 2.º La conformación geométrica del modelo debe estar ligada a su funcionamiento mecánico, es decir, para cada modificación de forma el modelo debe dar una respuesta en términos de fuerzas; cuanto más directa y visible sea esta respuesta, mayor interés ofrecerá el procedimiento (19).

3 La retícula elástica

Esencialmente, esta técnica consiste en definir la forma del modelo por las posiciones que toman los nudos de una retícula de hilos de goma sometida a la acción de las cargas; la medición de los lados que componen la retícula y las respectivas fuerzas que sustentan permitirá conocer, aproximadamente, el plexo tensional del prototipo.

3.1. Fundamentación

Supongamos primero que se desea obtener una forma *plana* que resista en compresión las cargas P_1, P_2, P_3 , apoyándose en A y B (fig. 1). Si suspendemos las cargas de un hilo, sujeto en A y B , obtendremos un funicular que una vez invertido será una de las soluciones del problema.



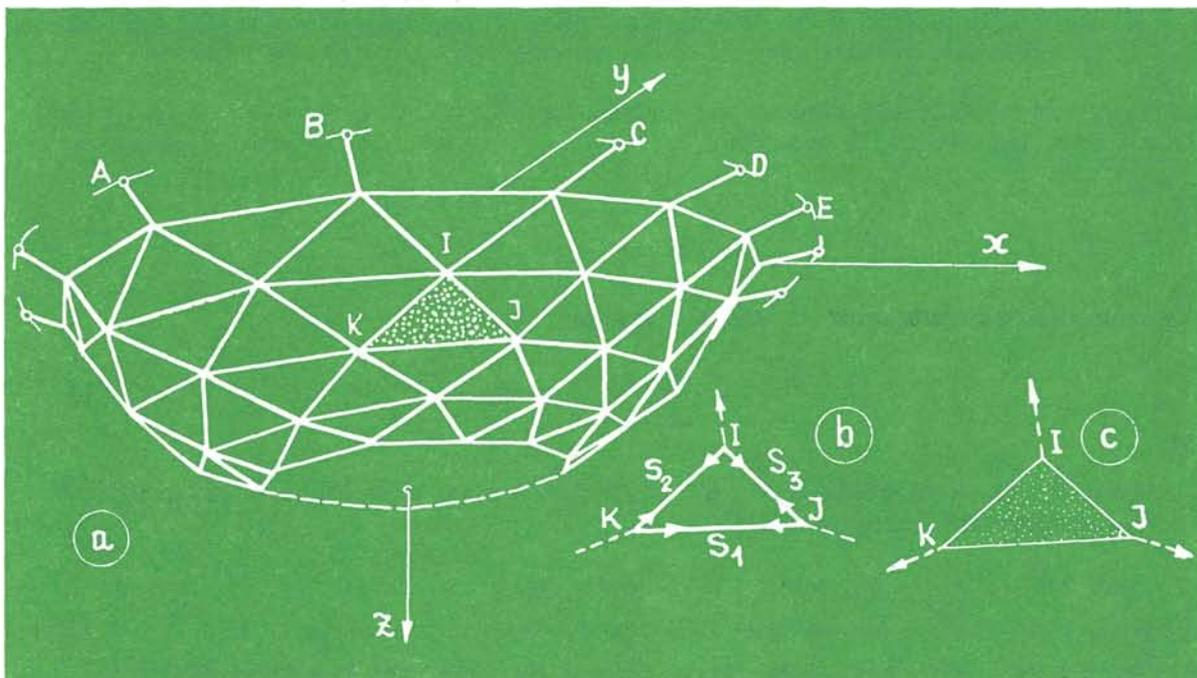
1

Si en lugar de un hilo inextensible se usa un hilo de goma de características conocidas, cada tramo del funicular experimentalará, hasta alcanzar la posición de equilibrio, un cierto alargamiento cuya medida permitirá conocer la fuerza que ese tramo sostiene. Si se modifica la longitud del hilo, se modificará simultáneamente la forma del funicular y las fuerzas sustentadas por sus lados. La respuesta en términos de fuerzas, para una modificación de forma, resulta así muy directa y fácilmente medible.

La ampliación de este antecedente —bien conocido en el campo de las estructuras planas— al campo de las estructuras espaciales constituye la base del método propuesto.

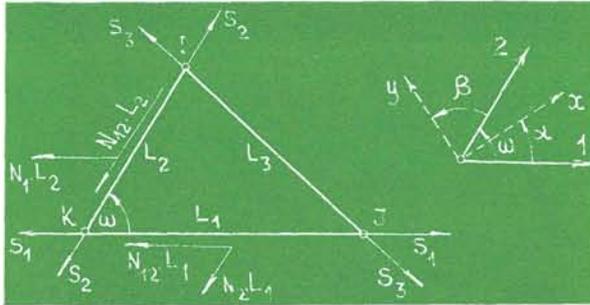
Supongamos ahora que se desea obtener una forma *espacial* continua (una cubierta, por ejemplo) que apoyándose en A, B, C, \dots , resista cargas P_i conocidas ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). Se conocen además las direcciones de las reacciones que los vínculos en A, B, C, \dots , son capaces de resistir (fig. 2).

Entre los puntos A, B, C, \dots , extendemos una red de hilos de goma cuyas direcciones se habrán elegido convenientemente para que formen triángulos que, en general, podrán ser irregulares; suspendemos ahora las cargas P_i de los nudos de la red, vértices de los



2

3



triángulos, y ajustamos las longitudes de los lados hasta conseguir:

- 1.º que todos los lados queden traccionados;
- 2.º que en los puntos A, B, C, \dots , las reacciones tengan las direcciones impuestas como datos.

La retícula así deformada y en posición de equilibrio nos da:

- a) La geometría de la forma buscada, midiendo las coordenadas de los nudos de la retícula.
- b) El plexo de tensiones de la estructura (dirección de los esfuerzos principales y valor de los mismos, en forma aproximada), midiendo las longitudes L_i y los esfuerzos S_i de cada uno de los lados de los triángulos.

Analizaremos brevemente la obtención de este último resultado (20). Para ello separamos de la retícula (fig. 2) el triángulo IJK que es, en definitiva, un triángulo de barras. Los esfuerzos S_1 y S_2 que concurren en el nudo K dan una resultante capaz de equilibrar a las restantes acciones (esfuerzos y cargas) que solicitan al nudo; lo mismo sucede en los nudos I y J . Ahora bien, limitándonos al equilibrio podemos sustituir este triángulo de barras por una chapa triangular que, teniendo la misma geometría, sea equivalente en sus efectos mecánicos; es decir, que su estado de tensiones sea tal que responda en los vértices I, J, K con las mismas fuerzas que el triángulo de barras.

Para definir ese estado de tensiones en la chapa, utilizaremos el sistema de ejes oblicuos que se indica en la figura 3, donde los ejes 1 y 2 son paralelos a dos lados cualquiera del triángulo. Consideremos primero el lado KI : en el triángulo de barras actúan los esfuerzos S_1 y S_3 ; en la chapa actúan las resultantes de esfuerzos $N_1 \cdot L_2$ y $N_{12} \cdot L_2$. (Designamos con N_1 y N_{12} los valores medios de los esfuerzos normales y tangenciales que actúan a lo largo de KI : su verdadera distribución nos es desconocida y no pretendemos hallarla.)

Expresando la equivalencia entre los dos sistemas mediante las ecuaciones de proyección oblicua sobre los ejes 1 y 2, obtenemos:

$$N_1 = \frac{S_1 \cdot L_3 + S_3 \cdot L_1}{L_2 \cdot L_3} \quad ; \quad N_{12} = -\frac{S_3}{L_3} \quad [3.1]$$

Análogamente operando sobre el lado KJ resulta:

$$N_2 = \frac{S_2 \cdot L_3 + S_3 \cdot L_2}{L_1 \cdot L_3} \quad ; \quad N_{12} = -\frac{S_3}{L_3} \quad [3.2]$$

Conocidos los esfuerzos oblicuos N_1, N_2, N_{12} podemos pasar a los esfuerzos ortogonales N_x, N_y, N_{xy} mediante las expresiones (21):

$$\left. \begin{aligned} N_x \cdot \operatorname{sen} \omega &= N_1 \cdot \cos^2 \alpha + N_2 \cdot \operatorname{sen}^2 \beta + 2 N_{12} \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{sen} \beta \\ N_y \cdot \operatorname{sen} \omega &= N_1 \cdot \operatorname{sen}^2 \alpha + N_2 \cdot \cos^2 \beta - 2 N_{12} \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot \cos \beta \\ N_{xy} \cdot \operatorname{sen} \omega &= N_2 \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{sen} \beta - N_1 \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{sen} \alpha + N_{12} (\cos \alpha \cdot \cos \beta - \operatorname{sen} \alpha \cdot \operatorname{sen} \beta) \end{aligned} \right\} [3.3]$$

donde los ángulos ω , α y β tienen los significados que se indican en la figura 3. Cuando α y β toman los valores

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} 2 \alpha &= \frac{N_2 \cdot \operatorname{sen} 2 \omega + 2 N_{12} \cdot \operatorname{sen} \omega}{N_1 + N_2 \cdot \cos 2 \omega + 2 N_{12} \cdot \cos \omega} \\ \operatorname{tg} 2 \beta &= \frac{N_1 \cdot \operatorname{sen} 2 \omega + 2 N_{12} \cdot \operatorname{sen} \omega}{N_2 + N_1 \cdot \cos 2 \omega + 2 N_{12} \cdot \cos \omega} \end{aligned} \right| \quad [3.4]$$

las direcciones x e y son direcciones principales; las expresiones [3.3], que dan entonces los esfuerzos principales, podrán escribirse en función de valores todos conocidos: L_1 , L_2 , L_3 , S_1 , S_2 , S_3 .

Conviene observar que el análisis hasta aquí detallado se ha hecho para un solo estado de cargas. Si deseamos considerar un nuevo estado de cargas, al aplicar el mismo, el modelo se deformará y habrá que hacer los ajustes necesarios en los hilos de goma hasta restablecer la forma primitiva; aparecen así los nuevos valores de L_i y S_i que definen el nuevo plexo tensional correspondiente a ese estado de cargas.

3.2. Limitaciones

Se admite que la aplicación de esta técnica queda sujeta a las siguientes limitaciones:

- a) El estudio se realiza únicamente dentro del régimen membranal.
- b) Se tienen en cuenta exigencias derivadas del equilibrio, pero no se consideran las que derivan de las deformaciones.
- c) El diseño se limita a estructuras cuyas tensiones son todas de tracción o bien todas de compresión; sin embargo, se admite que el valor e intensidad de las tensiones varíe de punto a punto (en el modelo de «triángulo a triángulo») y también que en un mismo punto ambas tensiones principales sean de distinto valor absoluto, es decir, que existan tensiones tangenciales.

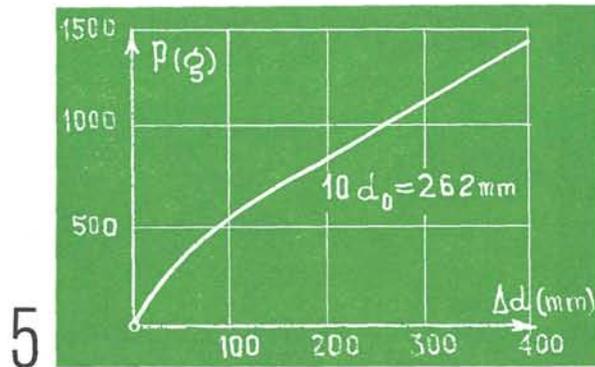
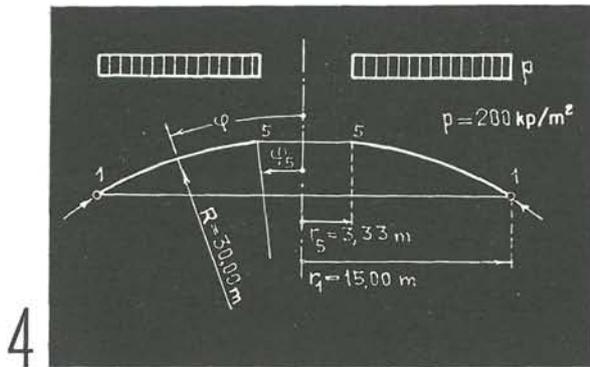
La limitación a) puede considerarse también como un requerimiento. En efecto, tratándose de diseñar estructuras laminares es bien sabido que la membrana «es un ideal (algunas veces, desafortunadamente, inalcanzable) al cual el proyectista debe apuntar» (22).

Es interesante observar que la limitación c) es menos restrictiva que la aceptada por las técnicas que usan, en lugar de la retícula, una membrana continua de goma o película jabonosa; en estos casos se admite que $N_x = N_y$, $N_{xy} = 0$ en todos los puntos, generando únicamente las denominadas «superficies funiculares».

3.3. Comprobación

A los efectos de comprobar el punto 3.1.b del procedimiento propuesto, se aplicó a una estructura cuya resolución teórica fuera perfectamente conocida para poder así comparar los esfuerzos obtenidos en el ensayo con los valores que resultaban del cálculo teórico.

Se adoptó como prototipo la cúpula esférica abierta cuyas dimensiones y carga se indican en la figura 4.



Los materiales empleados en la construcción del modelo fueron:

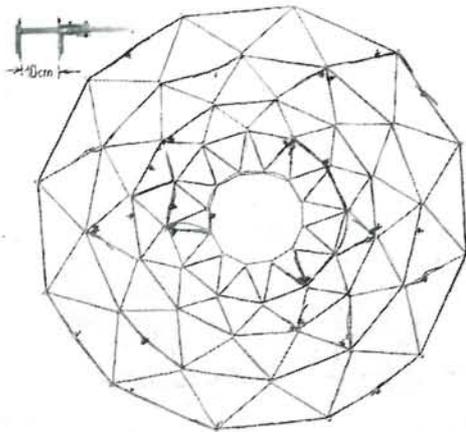
- hilos de goma de sección cuadrada (4×4 mm);
- anillos ($d = 10$ mm) de alambre para materializar los nudos;
- pinzas de compresión (conocidas como «pinzas Adams» en los laboratorios de Química) para las uniones y anclajes de las gomas.

Antes de proceder a la construcción del modelo se calibraron los hilos de goma; para ello se estiraban por suspensión de una carga conocida (1 kp) y luego se hacían marcas con pintura en toda su longitud y cada 50 mm; este valor quedaba reducido a 26,2 mm al quitar la carga.

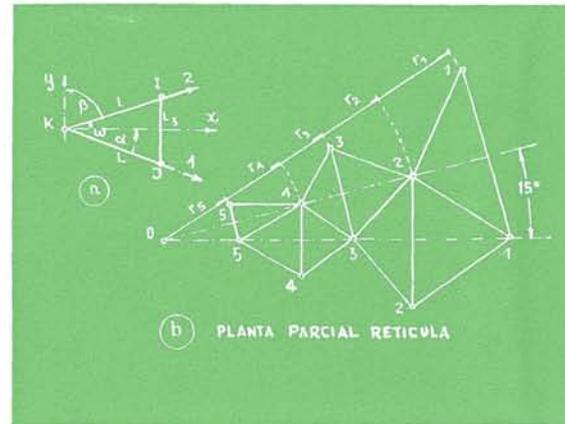
Utilizando los mismos hilos de goma se hizo la curva *fuerzas/alargamientos* que se indica en la figura 5.

Los pasos seguidos en la aplicación del procedimiento se sintetizan a continuación:

- 1.º Elección de las escalas: En nuestro caso se adoptaron:
 - longitudes $l = 1/25$
 - fuerzas $f = 1/10.000$
- 2.º Construcción del modelo: Se trabajó sobre un tablero plano en el que se dibujó la planta de la retícula (fotografía número 1 y figura 6 b). En los nudos se colocaron clavos y los anillos de alambre; entre ellos se «tejió» la retícula. Los hilos que representan las reacciones se anclaron en un anillo exterior de planchuela de hierro. En general, la retícula debe diseñarse de modo que los nudos perimetrales sean capaces de responder a las reacciones prescritas como datos; además, la retícula considerada como estereoestructura de barras articuladas en los nudos no debe ser hiperestática.
- 3.º Carga del modelo: Se utilizaron tubos metálicos lastrados con municiones, suspendidos de los anillos que materializan los nudos (fotografía número 2).
- 4.º Ajuste de los hilos: Las longitudes de los diferentes lados de la retícula deben modificarse hasta llevar los nudos a las posiciones deseadas. En nuestro caso particular estas posiciones quedaban definidas por las coordenadas de la cúpula prototipo; en



Fotografía 1



6

el caso más general, la elección de estas posiciones, correlacionada con la respuesta en términos de fuerzas —expresada por los alargamientos de los hilos—, conduce a la resolución de una de las incógnitas del problema: la forma de la estructura.

- 5.º Medida de las coordenadas de los nudos.
- 6.º Medida de la longitud L_i de los lados de la retícula deformada.
- 7.º Medida de la distancia d_i , entre marcas, en cada lado de la retícula deformada.
- 8.º Pasaje de los alargamientos $\Delta d_i = d_i - 26,2$ a las fuerzas S_i en cada lado de la retícula. Se utiliza para ello la curva de la figura 5.
- 9.º Cálculo de las direcciones principales en cada triángulo: Se aplican las expresiones [3.4].
- 10.º Cálculo de los esfuerzos oblicuos y ortogonales en cada triángulo utilizando las expresiones [3.1], [3.2] y [3.3] afectadas por las escalas l y f para trasladarlas al prototipo.

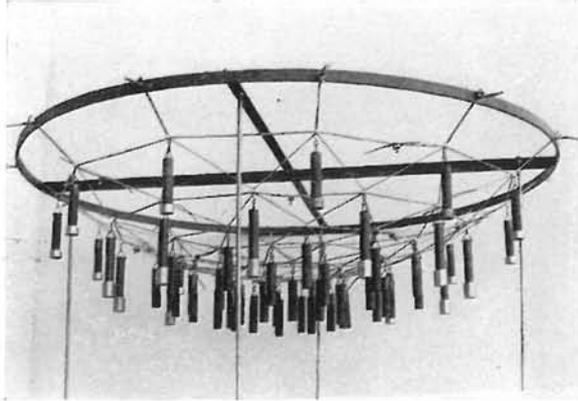
En nuestro caso, teniendo en cuenta la simetría, y con los ejes que se indican en la figura 6 a, resultan, para los dos últimos pasos, las expresiones simplificadas siguientes:

$$\begin{array}{l}
 S_1 = S_2 = S \quad ; \quad L_1 = L_2 = L \\
 N_1 = \frac{S}{L} + \frac{S_3}{L_3} = N_2 = N \quad ; \quad N_{12} = -\frac{S_3}{L_3} \\
 \alpha = \frac{\omega}{2} \quad ; \quad \beta = 90^\circ - \alpha \\
 N_x = \frac{S}{L} \cdot \frac{\sqrt{4L^2 - L_3^2}}{L_3} \quad ; \quad N_y = \left(\frac{S}{L} + 2 \cdot \frac{S_3}{L_3} \right) \cdot \frac{L_3}{\sqrt{4L^2 - L_3^2}}
 \end{array} \quad [3.5]$$

3.3.1. Precisión

Las lecturas mencionadas en los pasos 5.º, 6.º y 7.º del punto anterior se tomaron con la siguiente aproximación:

- lados y coordenadas 1 mm
- distancia entre marcas 0,1 mm



Fotografía 2

Estos valores, llevados al prototipo en la escala correspondiente, significarían las siguientes apreciaciones:

- longitudes: 2,5 cm;
- fuerzas: 30 a 60 kp (según la zona de la curva, figura 5).

La real precisión de estas magnitudes es, lógicamente, bastante menor, ya que diversos factores inducen a errores en las lecturas. En efecto, en el caso de las longitudes hay errores derivados de la falta de definición de los nudos, espesor de las gomas, etc.; en las fuerzas

los errores provienen del «creep» de la goma, variaciones de la distancia entre marcas, fallas en la definición de las mismas, etc.

Sin embargo, aun cuando las influencias de estos errores cuadruplicaran los márgenes de apreciación, entendemos que, a los fines propuestos, la precisión es aceptable.

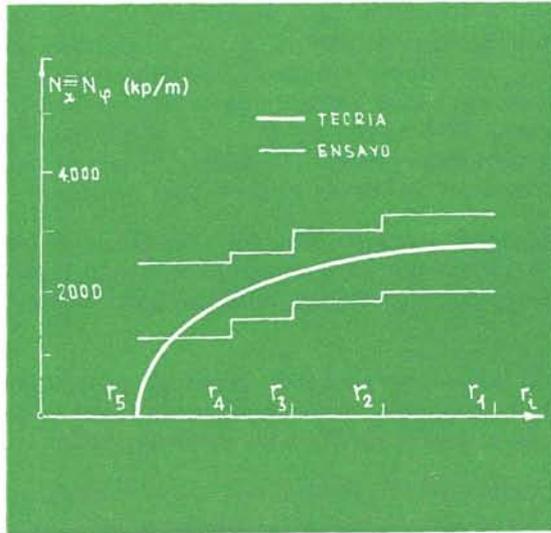
3.3.2. Resultados

En la tabla I se consignan los resultados obtenidos; los valores L , L_3 , d y d_3 son los promedios del total de lecturas homólogas hechas sobre el modelo. Los esfuerzos N_x y N_y se obtuvieron de las expresiones [3.5]. Los esfuerzos N_φ y N_θ resultan de aplicar las siguientes expresiones que da la teoría membranal (23):

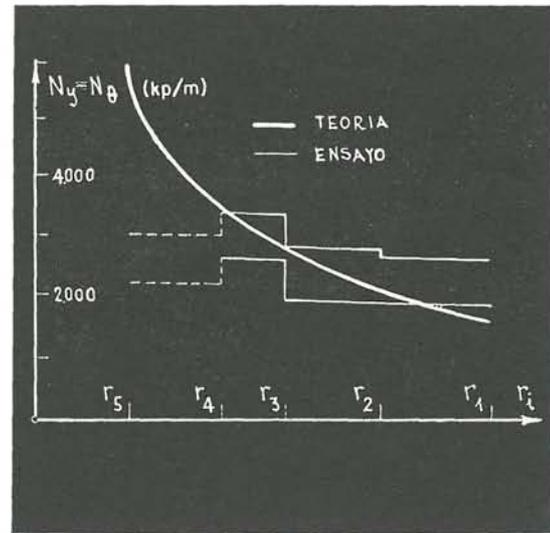
$$N_\varphi = p \cdot \frac{R}{2} \left(1 - \frac{\text{sen}^2 \varphi_3}{\text{sen}^2 \varphi} \right) ; \quad N_\theta = p \cdot \frac{R}{2} \left(2 \cos^2 \varphi + \frac{\text{sen}^2 \varphi_3}{\text{sen}^2 \varphi} - 1 \right) \quad [3.6]$$

TABLA I

Puntos	Triángulos	L	L_3	d	d_3	S	S_3	N_x	N_y	N_φ	N_θ
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(g)	(kp/m ²)	(kp/m ²)	(kp/m ²)	(kp/m)
1	212	212	235	57,8	30,2	1.220	280	3.457	2.167	2.852	1.648
	121	212	310	57,8	28,0	1.220	150	2.148	2.882		
2	323	164	172	43,2	30,8	800	315	3.169	2.104	2.741	2.401
	232	164	235	43,2	30,2	800	280	1.900	2.983		
3	434	119	125	35,2	33,0	530	440	2.886	2.837	2.518	3.021
	343	119	172	35,2	30,8	530	315	1.703	3.395		
4	545	120	69	29,7	44,2	250	820	2.776	3.103	2.091	3.665
	454	120	125	29,7	33,0	250	440	1.365	2.226		
5										0	5.926



7



8

En las figuras 7 y 8 se han representado los esfuerzos en función de los radios r_i de los distintos paralelos.

De la observación de estos resultados se concluye:

- 1.º Las direcciones principales se han obtenido correctamente, resultado previsible teniendo en cuenta la simetría de la retícula.
- 2.º Las diferencias entre los esfuerzos teóricos y experimentales varían del 2 al 24 %, quedando la curva teórica acotada superior e inferiormente por los valores del ensayo. Esta observación deja de cumplirse en los triángulos del borde interno (545 y 454) donde el efecto de la discontinuidad de la carga es mucho más fuerte. Efectivamente, la teoría membranar muestra que una carga aplicada en el borde interno produce importantes aumentos en los N_φ y disminuciones en los N_θ de ese mismo borde.

Teniendo en cuenta las metas fijadas, estimamos que los resultados obtenidos en este caso particular son aceptables.

4 Conclusiones generales

Aunque las experiencias realizadas hasta el presente son pocas y muy particulares, intentaremos obtener, sin embargo, algunas conclusiones de carácter general:

- 1.º La construcción y ensayo del modelo son de una sencillez tal que su costo y tiempo de ejecución resultan notablemente inferiores a los que se obtienen para modelos convencionales (elásticos o de rotura).
- 2.º La ley «costo/escala modelo» que rige en los modelos convencionales no es aplicable aquí (24); es posible trabajar con modelos grandes sin que los costos adquieran importancia.

- 3.º La conclusión anterior no debe conducirnos a formular una posibilidad en exceso optimista sobre el aumento de la precisión. Si bien es cierto que al aumentar las escalas, fuerzas y longitudes pueden medirse con mayor precisión, esto no significa que la aproximación con que se obtienen los esfuerzos aumente en la misma forma. En efecto, debemos reconocer que las mayores fuentes de error en la obtención de los esfuerzos no radican en la lectura de magnitudes sobre el modelo, sino en las hipótesis simplificadoras para el pasaje del modelo de barras al prototipo continuo.

La hipótesis simplificativa adoptada en este caso —sustitución del triángulo de barras por la chapa triangular— puede no ser aceptable para otros casos donde habrá que operar con sustituciones más complejas y acordes con la realidad geométrica y mecánica del prototipo.

Las hipótesis de sustitución, el grado de densidad superficial de nudos en la retícula y las limitaciones del procedimiento con relación a los diferentes tipos de superficies, constituyen problemas que deben centrar la atención de futuras investigaciones.

- 4.º La técnica propuesta sólo considera las condiciones de equilibrio; su información, comparada con la que proporcionan las técnicas de verificación, tiene que ser, naturalmente, menos precisa, pero es al mismo tiempo más amplia. Efectivamente, en el caso que desarrollamos más arriba bastaría modificar la longitud de algunos lados de la retícula —los paralelos, por ejemplo— para obtener inmediatamente una forma distinta de la esférica y sus correspondientes esfuerzos.

Por último, a modo de síntesis, debemos señalar que en el estudio experimental de las estructuras, la técnica propuesta tan sólo pretende proporcionar el primer peldaño en la información; el análisis sobre modelo elástico (además del equilibrio, considera las deformaciones) permite acceder a un nivel más profundo; finalmente, una mayor profundidad aún es alcanzable mediante el análisis sobre modelos de rotura que tiene en cuenta las características del material además del equilibrio y las deformaciones. Esta penetración hacia las profundidades del conocimiento se logra a costa de una reducción en la amplitud y una mayor inversión de esfuerzo humano y equipo material.

Reconocimiento *Se deja expresa constancia de la valiosa colaboración prestada por el Ing. Rodolfo E. Serralunga —Asistente de Docencia del Departamento de Ingeniería de la UNS—, especialmente en la tarea de construcción y ensayo de los modelos.*

Bibliografía

- (1) ROWE, R. E.; BASE, G. D.: "Model Analysis and Testing as a Design Tool", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 33, febrero 1966, pp. 183-200, y Discusión por АНМ, P.: Idem, Vol. 36, marzo 1967, p. 667.
- (2) BENITO, C.: "Essais comparatifs pour le choix d'une forme résistante". Proceedings of the Symposium on Shell Research, Delft, 1961, North Holland Publishing Company, pp. 282-286.
- (3) BENITO, C.: "Building of models". Bulletin RILEM, N.º 8, septiembre 1960, pp. 5-14.
- (4) ROWE, R. E.: "The cost of model testing and the time required". Model Testing Proceedings of One Day Meeting held at the Royal Aeronautical Society, Cement and Concrete Association, London, 1964, Lecture 6, pp. 45-53.
- (5) SAMMARTINO, R. R. A.: "Tres etapas en la evolución de la resolución de pórticos por computadoras". Suplemento núm. 1 a los Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Bs. As., Sección Ingeniería, 1968, pp. 170-197.

- (6) CAMINOS, H.: "Studies on Models of a Type of Membranal Structure". Bulletin IASS, N.º 2, a-10.
- (7) ISLER, H.: "New Shapes for Shells". Bulletin IASS, N.º 8.
- (8) ISLER, H.: "Experimental Shell Design": Op. cit. refer. N.º 2, pp. 356-358.
- (9) ISLER, H.: "Ideal and Non Ideal Shape". Memorias del Congreso Internacional sobre la Aplicación de las Estructuras Laminas en Arquitectura. IASS-IMCYC, México, 1967, Vol. II, pp. 791-800.
- (10) LOBO FIALHO, J. F.: "Design of Shells Based on the Experimental Determination of Funicular Surfaces". V. Congreso Asociación Internacional Puentes e Ingeniería Estructural, Lisboa, 1956, pp. 259-280.
- (11) SAETHER, K.: "The Structural Membrane". Indian Concrete Journal, octubre 1963, pp. 363-373.
- (12) RAMASWAMY, G. S.: "Analysis, design and construction of a new shell of double curvature". Op. cit., refer. N.º 2, pp. 232-250.
- (13) DEL POZO, F.: "Estudios experimentales y ensayos sobre modelos". Op. cit., refer. N.º 9, Vol. III, pp. 1351-1369.
- (14) CANDELA, F.: "El problema de la forma y de la escala y sus limitaciones". Op. cit., refer. N.º 9, Vol. II, pp. 935-949.
- (15) CELLA, A.: "A Direct Design System for Axisymmetric Membrane Shell". Department of Civil Engineering, School of Engineering, M. I. T., septiembre 1965, R.65-45.
- (16) PELIKAN, J.: "Form Determination of Braced Domes". Space Structures, Blackwell Scientific Publications, Ltd., Oxford, 1967, pp. 160-164.
- (17) CSONKA, P.: "Membrane Shells with Vertically Supported Edge Beam". Proceedings of the Colloquium on Simplified Calculation Methods of Shells Structures, Bruselas, 1961, North-Holland Publishing Co., pp. 219-234.
- (18) ANDRES, O. A.: "Membrane Shells having the Form of Second Order Surfaces with Pure Shear Stress". Bulletin IASS, N.º 34.
- (19) MITCHELL, N. B.: "Conferencias". Facultad de Arquitectura, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1964.
- (20) WRIGHT, D. T.: "Membrane Forces and Buckling in Reticulated Shells". Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 91, N.º St1, febrero 1965, pp. 173-201.
- (21) FLUGGE, W.: "Stresses in Shells", Springer Verlag, Berlin, 1962.
- (22) NOVOZHILOV, V. V.: "Thin Shell Theory". P. Noordhoff, Groningen, 1964.
- (23) PLUGER, A.: "Estática Elemental de las Cáscaras". EUDEBA, Bs. As., 1964.
- (24) BREEN, J. E.: "Fabrication and Tests of Structural Models". Journal of the Structural Division, ASCE, Volumen 94, N.º St6, junio 1968, pp. 1339-1352.

résumé

Projet expérimental de voiles minces

Oscar A. Andrés, Professeur en titre du Département de Génie de l'Université Nationale du Sud, Bahía Blanca, Argentine

La technique de projet proposée consiste essentiellement à obtenir la forme du modèle —et, par conséquent, de la structure— par les positions qu'adoptent les noeuds d'une réticule de fils en caoutchouc soumise à l'action des charges.

Le plexus tensionnel peut être reconnu simultanément avec la forme: en mesurant la longueur de chaque côté de la réticule et la force le sollicitant (allongement du fil en caoutchouc), il est possible d'obtenir, d'une manière approximative, les directions et les efforts principaux.

Toute modification subie par la forme se révèle également sur les côtés (longueurs et allongements) de la réticule, c'est-à-dire, tout changement dans la géométrie a une réponse en termes de forces.

Comme vérification, la technique proposée, que nous appelons ici «réticule élastique», est appliquée à une coupole sphérique.

L'auteur analyse les limitations et les possibilités de cette technique.

summary

Experimental design of thins shell structures

Oscar A. Andrés, Professor of the Engineering Dept. of the Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina

This paper propounds a design technique in which the shape of the model, and of the full structure, is determined by the position of the knots in a framework of rubber strings. The position of these knots under load is studied.

The stress pattern can be derived from the space positions by measuring the length of each side of the reticule and the forces acting on the knots (elongation of the rubber strings). Thereby it is possible to know approximately the magnitude and direction of the main forces.

Any change in the shape alters the length of the framework elements (their length and elongation), i.e., any geometrical change corresponds to a change in the force pattern. As a check, this technique, which is termed «elastic reticule», is applied to the calculation of a spherical dome.

The limitations and possibilities of this technique are discussed.

zusammenfassung

Experimenteller Entwurf von Flächentragwerken

Oscar A. Andrés, Lehrstuhlinhaber für Ingenieurwesen an der Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentinien

Die hier vorgeschlagene Entwurfstechnik besteht wesentlich darin, die Form des Modells —und damit seine Struktur— durch die Positionen zu erhalten, welche die Knoten eines Gummifadennetzes einnehmen, das der Einwirkung von Lasten ausgesetzt wird.

Gleichzeitig mit der Form kann der Spannungsplexus festgestellt werden: Misst man die Länge einer jeden Seite des Netzes und die diese Länge hervorrufoende Kraft (Verlängerung des Gummifadens), so können die Richtungen und wichtigsten Beanspruchungen annähernd berechnet werden.

Jede Veränderung der Form ruft eine Veränderung in den Seiten (Längen und Verlängerungen) des Netzes hervor, jede Veränderung in der Geometrie drückt sich somit in Kräften aus.

Zur Überprüfung wird die vorgeschlagene Technik wir nennen sie «Elastiknetz» auf eine sphärische Kuppel angewandt.

Abschliessend werden die Grenzen und Möglichkeiten dieser Technik analysiert.