

Las bóvedas de cerámica armada en la obra de Eladio Dieste. Análisis y posibilidades de adaptación a las condiciones constructivas españolas

Jose María Cabeza Lainez
José Manuel Almodóvar Melendo

El ingeniero uruguayo Eladio Dieste, realizó entre 1945 y 1975, toda una serie de obras extraordinarias que ponían en valor un material tradicional y simple como el ladrillo o el mampuesto, confiriéndole al mismo tiempo la ductilidad y capacidad mecánica del hormigón armado por medio de una técnica mixta a la que llamaremos temporalmente «cerámica armada».

La idea de compensar la falta de resistencia a tracción de los materiales pétreos y, en especial, de la mampostería, ha sido recurrente en la Historia de la Arquitectura. Sin embargo, las mayores aplicaciones se han producido desde que el material metálico, experimenta una evolución sin precedentes que culminó con la producción industrial del hierro y sobre todo del acero. Antes de eso, el papel del hierro, muy utilizado por otra parte en elementos para la guerra, quedaba muy limitado, y según Plinio era este «un justo castigo a la probada iniquidad del material férreo».¹

Como consecuencia, quisiéramos proceder a continuación, a una breve revista histórica de las actitudes que, a partir de ese uso industrial del acero, suponen el precedente que posibilitó entre otras, la obra de Eladio Dieste y la consideración de que, este tipo de Arquitectura, no se encuentra en modo alguno desligada de una cierta tradición constructiva del siglo XX y aún anterior. Esa tradición tiene mucho que ver según esperamos demostrar, con la nostalgia del Mediterráneo y el empleo de materiales discretos, que podríamos tildar de humildes y que casi siempre estaban fabricados a mano.

Mientras que el devenir del hormigón armado con las realizaciones de Hennebique y otros, es bien conocido, no lo es tanto el hecho de que en 1890, el ingeniero francés Paul Cottancin, patentó un sistema al que denominó *ciment armé* que consistía en reforzar elementos básicos de ladrillo con alambre y cemento; estos dos últimos materiales aparecían con más frecuencia en las zonas de máxima tensión, mientras que las zonas simplemente comprimidas se ejecutaban solamente con el mampuesto, a la antigua usanza.

El descubrimiento interesó a arquitectos como Anatole de Baudot, quien lo empleó con éxito en su iglesia (hoy demolida) de Saint Jean de Montmartre.

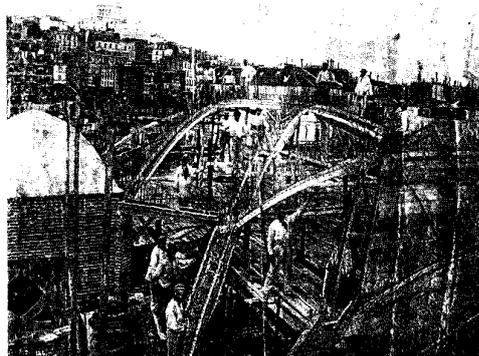


Figura 1
Construcción de la Iglesia de Saint Jean de Montmartre. Paris.

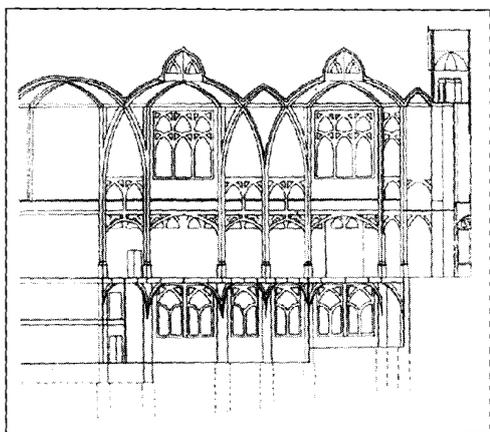


Figura 2
Sección de la Iglesia de Saint Jean

Baudot, consideraba que la técnica del *ciment armé*, versátil y de mayor finura en sus acabados, era más adecuada para la Arquitectura que la del *betón armé* reservada al parecer para la Ingeniería Civil.

Las intrincadas bóvedas de Saint Jean, se relacionan con toda una serie de proyectos *grande salle*, realizados por Baudot, como la propuesta para la Exposición de París de 1900. En ellas se pueden entender perfectamente las ventajas e inconvenientes de esta utilización novedosa del ladrillo. Dada su complejidad, la técnica resultaría pronto obsoleta.

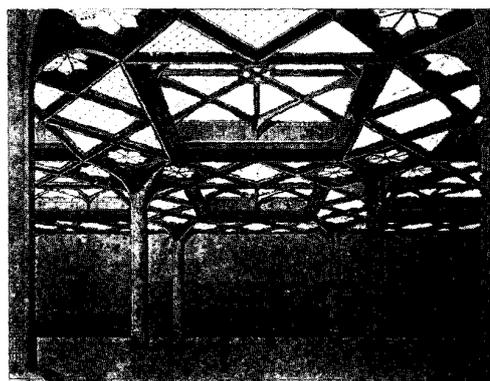


Figura 3
Primer proyecto *grande salle* de Baudot

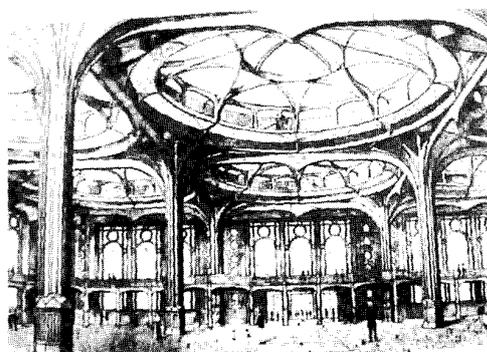


Figura 4
Anatole de Baudot. Salle des fêtes. 1910

Paralelamente y, al otro lado del Atlántico, el arquitecto Rafael Guastavino, de origen barcelonés había mostrado, sobre todo en el área de New York, las posibilidades de lo que él designó como *construcción cohesiva*. Se trataba de técnicas de cubrición basadas en lo que hoy llamamos *bóvedas catalanas* o también *bóvedas extremeñas*. En síntesis, cubiertas curvas compuestas por una o varias capas de ladrillo fino (*rasilla*), donde la inferior de las mismas está labrada con yeso y obtiene una rigidez casi inmediata, evitando la necesidad de un proceso de encofrado permanente. Al igual que en los casos posteriores de Félix Candela y del propio Dieste, estas técnicas de abovedado se introdujeron en América, por causa de su economía superior respecto a otros medios ya conocidos o empleados.

Sin embargo, no tenemos constancia de que Guastavino añadiese ningún tipo de armadura férrea en sus construcciones. A pesar de todo, las obras consiguieron una notable durabilidad y esto le confirió cierto reconocimiento. En prueba de ello, Candela eligió como lugar de descanso para sus restos mortales, el mismo cementerio de Ashville donde está enterrado Guastavino.²

El arquitecto catalán, desarrolló en América, a gran escala, técnicas constructivas que habían perdurado en el Mediterráneo durante un largo tiempo, y que a principios del siglo XX, se mantenían aún vivas entre ciertos gremios de albañiles. Esto parece claro cuando contemplamos por ejemplo aquellas primeras bóvedas, ya sí atirantadas, de Josep Lluís Sert y Torrès Clavé (1935), para sus casas de fin de semana en Garraf.

Sert volverá a este tipo constructivo cuando en 1954, desde Massachussets, proyecte y construya el Taller para Joan Miró en Palma de Mallorca. Es muy significativo sin embargo, que las bóvedas en este nuevo caso, se ejecuten con hormigón armado siguiendo los muy prolijos cálculos del ingeniero Antonio Ochoa de Retana.³

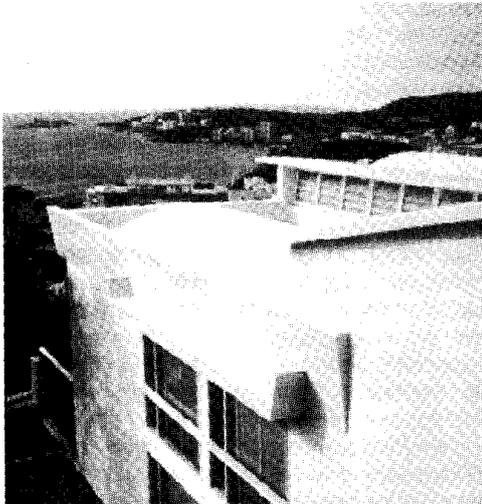


Figura 5
J. L. Sert. Taller para Joan Miró

En aquel lapso de tiempo, se habían producido no obstante, y probablemente con la aquiescencia de Sert, algunos hechos significativos para nuestra historia. Uno de estos hechos es el proyecto de Maisons Jaoul, realizado por Le Corbusier y finalmente construido en 1952. En ese proyecto, que tanto extrañó a J. Stirling, según él por las nostálgicas bóvedas de ladrillo —material *in situ*, trabaja también en París el joven arquitecto Antoni Bonet. No era, sin embargo, el primer caso en el que Corbusier utilizaba bóvedas, su propio ático en Nungesser et Coli, nº24 así lo atestigua.

Antoni Bonet, que no deseaba volver a la España de posguerra, se establece en Buenos Aires junto con los argentinos Ferrari y Kurchan, y en uno de sus primeros proyectos para la capital del Plata, los *ateliers* entre las calles Paraguay y Suipacha de 1945, encarga a Eladio Dieste, la construcción de una bóveda a



Figura 6
Las *maisons Jaoul* en las afueras de París

la catalana. El uruguayo decidió al parecer utilizar un refuerzo con acero pues las cubiertas sugeridas por Bonet eran en exceso verticales.

Como último eslabón del proceso, debemos citar al ingeniero Eduardo Torroja quien utilizó también en su Iglesia de Pont de Suert en Lérida (1954), ceramios y bóvedas de ladrillo rasilla armado. Torroja dispuso tres capas de ladrillo, tomando la primera con yeso e incorporando una armadura ligera en el revestimiento exterior de la bóveda, pero advirtiendo que estas barras lisas podría colocarse sin pro-

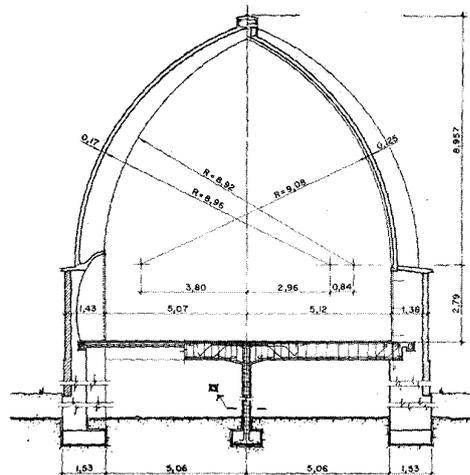


Figura 7
Sección transversal de la Iglesia de Pont de Suert.

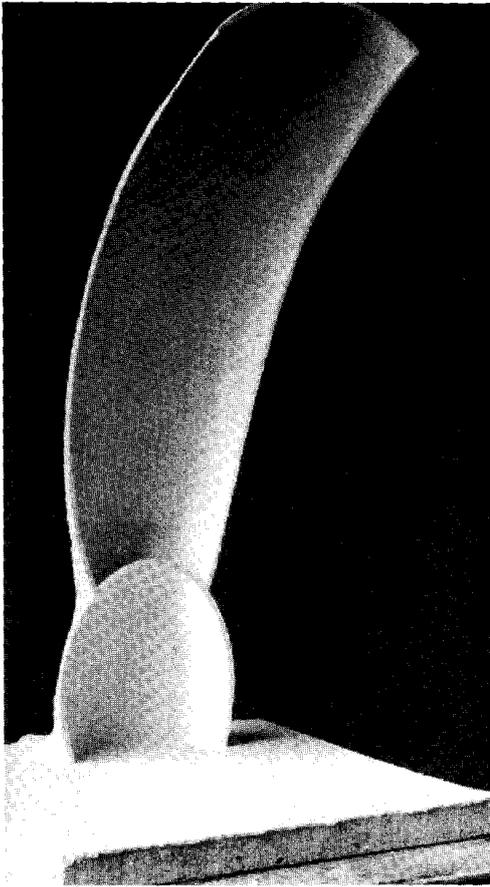


Figura 8
Maqueta del módulo de la Iglesia

blemas en otros lugares de la fábrica. Por razones que desconocemos, nunca más volvió a emplear el mismo sistema en otras obras. Parece ser que fue la progresiva pérdida trabajadores cualificados la que le disuadió de continuar.

Dieste continúa trabajando en proyectos de membranas fundamentalmente para la construcción industrial, pero pronto advierte las grandes posibilidades del nuevo sistema, frente a los costosos procedimientos del hormigón armado, que le hacían depender casi por completo de tecnologías foráneas. En 1959, se decide a presentar su patente para bóvedas de doble curvatura con piezas de cerámica armada.

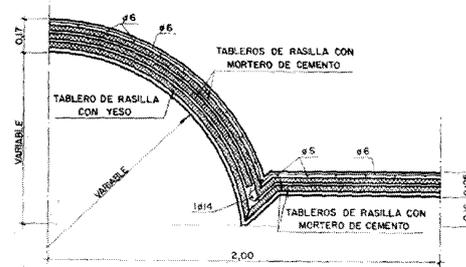


Figura 9
Detalle constructivo de la bóveda de cerámica armada

Los procedimientos de análisis estructural empleados por Dieste para ejecutar sus «cáscaras de cerámica» no difieren en exceso de los métodos simplificados de Lundgren que solemos usar —como hizo Antonio Ochoa— para el estudio de membranas cilíndricas de hormigón. Sin embargo, aparecen ciertas variantes sugestivas, debidas por un lado al material, y por otro a las formas de doble curvatura utilizadas. Además de esto no hay que olvidar la dimensión moral que Dieste otorgaba a todas sus obras, entendiéndolas como un medio para salir del subdesarrollo en Latinoamérica y para devolver la dignidad perdida a los obreros indígenas de la construcción. Todo ello le permitió configurar una singular poética que nace de la misma esencia de la materia y de lo constructivo.

El método de Lundgren, según se ha dicho, fue el adaptado por Eladio Dieste para ejecutar la mayor parte de sus bóvedas como aparece descrito en sus propios libros, sin que hayamos podido, por lo demás, encontrar referencias directas hacia el autor danés.

El citado método suele recibir también el nombre de «teoría de la viga», puesto que la parte principal del mismo, consiste en suponer que toda la membrana actúa como una gran viga cuya sección transversal es el arco de la propia lámina.

En tal caso es posible emplear las conocidas fórmulas de resistencia de materiales que hacen referencia al momento flector dividido por el momento resistente de la sección. Con ellas podemos hallar las tensiones según las generatrices de la lámina pues:

$$N_x = \frac{M_{yy}}{I_{yy}} z d$$

donde I_{yy} , es el momento de inercia en la dirección y (la vertical en una membrana simétrica). En el caso de directriz circular, su expresión integral valdría:

$$I_{yy} = 2d \int_0^{\phi_c} a d\phi \left(a \cos\phi - \frac{a \operatorname{sen}\phi_c}{\phi_c} \right)$$

También es posible hallar los esfuerzos tangenciales puesto que por la segunda fórmula fundamental en ciencia de los materiales nos dice que:

$$N_{x\theta} = \frac{VQ}{2I_{yy}}$$

Donde V son los cortantes y Q es el momento estático de la sección.

Una vez hallados estos esfuerzos, el análisis se completa considerando como arco la membrana, utilizando para ello algún sistema de cálculo de arcos hiperestáticos como, por ejemplo, el sistema de analogía con la columna que fue descrito por Hardy Cross hacia 1930. Así, finalmente, obtenemos otros esfuerzos relevantes como N_r , M_r , o hasta M_x .

Si bien es cierto que el procedimiento definido a grandes rasgos, presenta notables simplificaciones, y deben aplicarse un número progresivo de correcciones más o menos aproximadas, no hay en la actualidad otro procedimiento más exacto, ni más fiable, para el análisis de membranas de directriz no circular o con variaciones de sección a lo largo de las generatrices como era el caso de las bóvedas «gausas» (en honor a K. F. Gauss) propuestas por Dieste. Dada la heterogeneidad del material (claramente no ortótropo) hasta el método de elementos finitos podría no necesariamente suponer un mayor grado de exactitud.

Obtenidos los esfuerzos por éstos y otros sistemas complementarios, es interesante constatar, que Dieste tiene que recurrir a los métodos tradicionales de la misma resistencia de materiales para el armado de sus membranas. Dicho de otro modo, no es aquí aplicable el método parábola-rectángulo, el llamado del momento tope, o cualquier otro sistema, que presuponga una deformación similar a la ocurrida en el hormigón armado. Evidentemente el conglomerado de cemento, ladrillo y armadura es más heterogéneo que el hormigón y en este caso, parece razonable suponer que las tensiones procedentes del bloque de

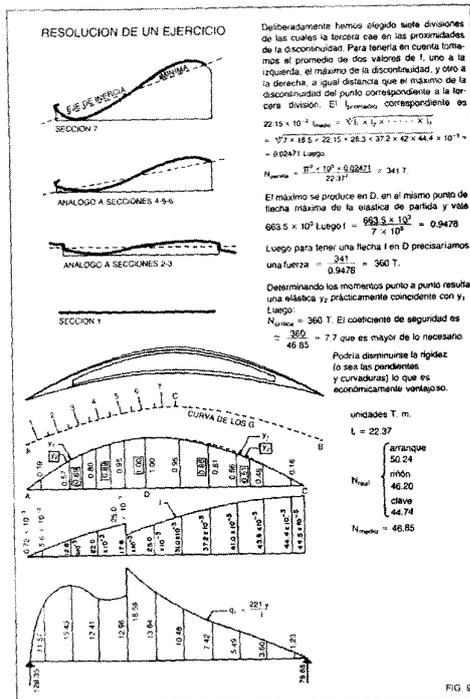
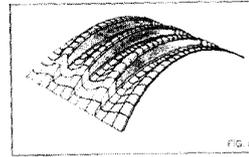


Figura 10
Ejemplo de cálculo de bóvedas gaussas. Eladio Dieste

tracción serán absorbidas en su totalidad por el acero, mientras que las de compresión, lo serán a su vez por el ladrillo o por el conglomerado. Es curioso constatar que aproximaciones de similar naturaleza se dan cuando aplicamos los métodos de elementos finitos.

Puede hacerse también notar que Dieste no empleaba apenas coeficientes de mayoración o minoración en sus cálculos, lo que contribuía grandemente a la esbeltez de sus soluciones, pero complicaba extraordinariamente los análisis matemáticos ante la lógica presencia de imponderables. Utilizaba como referencia fundamental el libro del húngaro Hetenyi, un seguidor de Timoshenko, para completar los cálculos

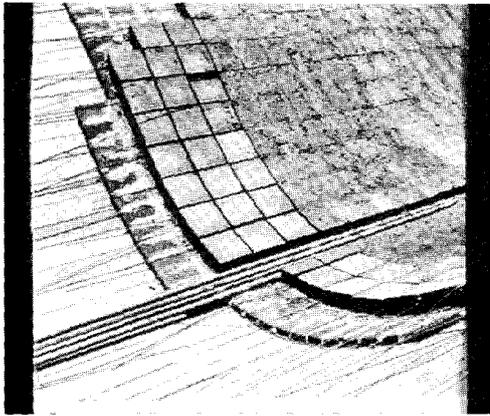


Figura 11
Armadura entre las piezas de ladrillo

Dieste intentaba armar casi siempre sus estructuras siguiendo las líneas isostáticas, hoy hemos comprobado que es suficientemente seguro y menos costoso armar según las diagonales de la estructura en planta.

En el sistema constructivo empleado por Dieste, el mampuesto normalmente estaba formado por piezas únicas de 15 a 20 cm. de espesor, a manera de bovedillas, y era preciso incorporar armadura entre las juntas de cada pieza, lo cual dificulta la ejecución y aumenta considerablemente la mano de obra. Además, es preciso utilizar un encofrado que aunque sea deslizante requiere de utensilios especiales, diseñados por el mismo Dieste, para su adecuada puesta en obra.

Rescatando todas las técnicas constructivas aquí descritas hemos puesto en práctica un nuevo sistema que, a la manera de aquél iniciado por Eduardo Torroja, emplea al mismo tiempo los sistemas de bóveda a la catalana junto con la armadura ya corrugada que en este caso no ha de colocarse discrecionalmente sino que se prepara por témpanos previamente cal-

de deformación y también los repartos de momentos en arcos-bóveda continuos, es decir, no aislados.

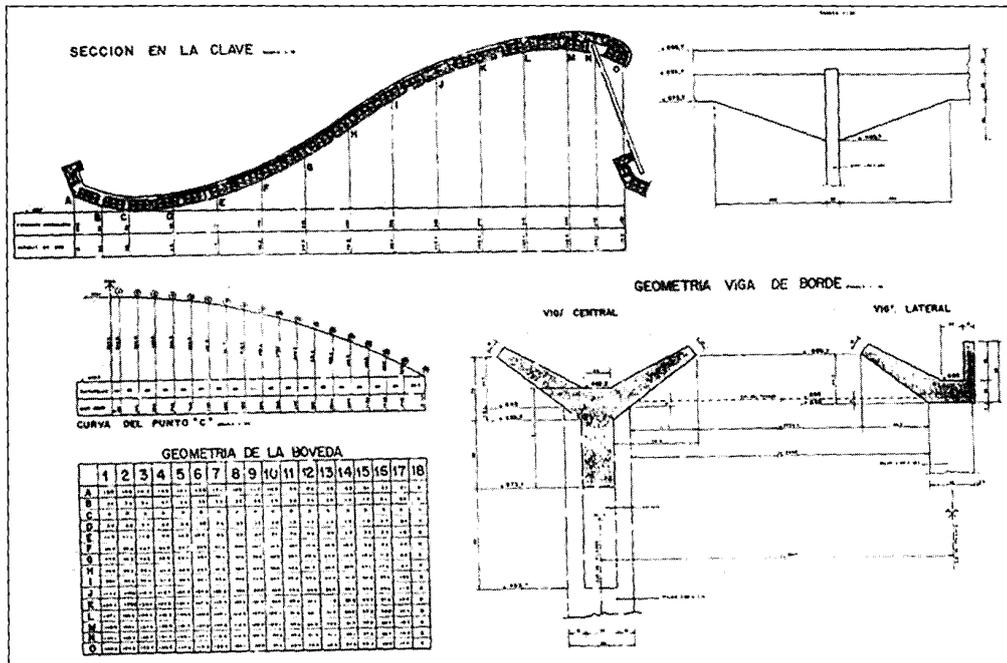


Figura 12
ucenario de cerámica armada. Tablas y vigas

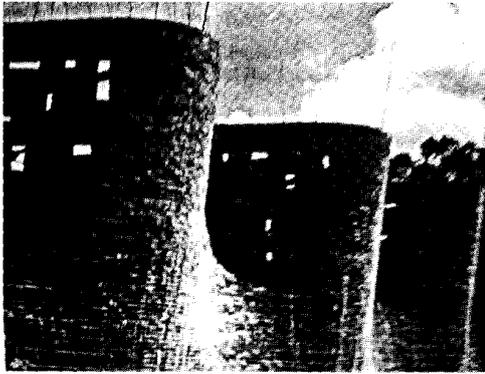


Figura 13
Proceso constructivo de la iglesia de Atlántida. Realizada por Eladio Dieste en los alrededores de Montevideo

culados con el método de la viga o por elementos finitos, según sea el caso, y que economizan considerablemente la mano de obra.

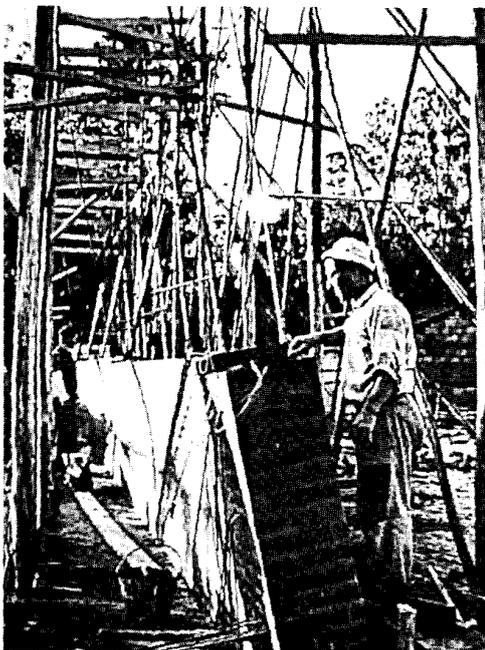


Fig. 14
Levantamiento del muro



Fig. 15
La iglesia construida. Vista lateral

Puesto que la primera *rosca* o capa, es tomada con mortero de yeso, no se requiere encofrado y tampoco hay que utilizar armadura entre las juntas del ladrillo sino entre capa y capa.

El sistema empleado en diversas obras en Andalucía, ha demostrado hasta el momento su eficacia, economía y durabilidad. Y los inconvenientes que siempre presenta una nueva técnica constructiva parecen ser de fácil subsanación y mejora, con lo que creemos que se puede poner de manifiesto que el desafío lanzado a las naciones desarrolladas por Dieste en su «Técnica y Subdesarrollo» continúa teniendo validez y produciendo nuevas adaptaciones más allá de un lugar o un tiempo concretos, lo que en definitiva viene a cuestionar el *statu quo* de la Tecnología Actual y sus implicaciones sociales y medioambientales.

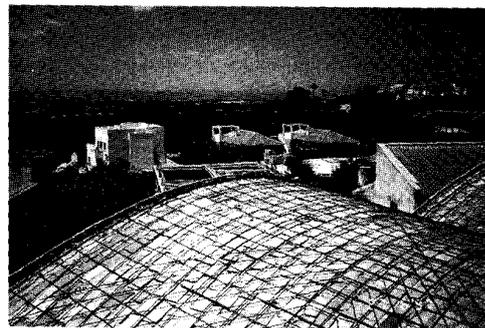


Fig 16
La nueva técnica de armado. Sevilla



Fig. 17
Vista inferior de bóvedas conoidales



Fig. 18.
Bóveda en forma de cono invertido

NOTAS

1. Giedion, S.: *La arquitectura, los fenómenos de transición*. Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 1979.
2. Candela, F.: «Comunicación Personal». Sevilla, 1987.
3. Sert, J. L.: *Taller per a Joan Miró*. Col·legi Oficial D'Arquitectes de Balears. Palma de Mallorca, 1990.

BIBLIOGRAFÍA

- A.A.V.V. Monografía sobre la obra de Eduardo Torroja. *In-formes de la Construcción*. nº 137. Instituto Eduardo Torroja. Madrid, 1962.
- A.A.V.V. AC/ G.A.T.E.P.A.C. 1931-1937. Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 1975.
- Cross, H.: «Column Analogy», *Engineering Experiment Station Bulletin*, nº 215, Vol. 28, Nº 7. University of Illinois, 1930.
- Dieste, E.: *La estructura cerámica*. Ediciones Latinoamericanas. Bogotá, 1987.

- Frampton, K.: *Studies in Tectonic Culture*. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1995.
- Guastavino, R.: *Essay on the theory and history of cohesive construction*. Ticknor and Company. Boston, 1893.
- Liernur, J. F.: «Tipo, damero y tabla rasa; el debate modernista sobre la vivienda en altura en Buenos Aires, de Antonio Vilar a Amancio Williams (1929-1943)», *Primer Seminario Docomomo Ibérico*, Zaragoza, 1997.
- Lundgren, H.: *Cylindrical Shells. Vol. 1 de Cylindrical Roofs*. Danish Technical Press. Copenhagen, 1949.
- Ramaswamy, G.S.: *Design and Construction of Concrete Shell Roofs*. R. E. Krieger. Malabar, Florida, 1984.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean reconocer la colaboración del arquitecto D. Rafael Herrera Limones. Profesor Asociado del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la Universidad de Sevilla.