

Aportaciones de los modelos físicos al desarrollo y construcción de las estructuras laminares en el s. XX

Pablo Moreno Muñoz
José Fernández-Llebrez Muñoz

Aunque resulta ampliamente conocida la importancia que las maquetas o modelos han venido teniendo en la configuración espacial y volumétrica de los proyectos, sin embargo no es tan conocido su papel activo en el desarrollo del diseño estructural y en su camino hacia la viabilidad constructiva. Es decir, en momentos en los que no se contaba con una respuesta concreta por parte de la teoría de estructuras, o que no existía precedente constructivo de una determinada solución estructural innovadora, el trabajo y la experimentación con modelos físicos permitió decisivamente en muchos casos que arquitectos e ingenieros avanzaran en el desarrollo y la evolución de las estructuras, contribuyendo a entender el funcionamiento estructural para poder diseñar y construir con seguridad cuando los modelos analíticos eran demasiado complejos de aplicar.

Desde que en 1675 Robert Hooke describiera la catenaria invertida como la forma ideal de un arco (Hooke 1675) se han utilizado modelos físicos para analizar la forma más eficiente trabajando a compresión pura de arcos bóvedas y cúpulas (Huerta 2004). Es el caso por el ejemplo de Giovanni Poleni en 1748 quien se apoyó en un modelo físico en la elaboración de su informe para demostrar la estabilidad de la cúpula de 41.9m de diámetro de la Basílica de San Pedro de Roma, a pesar de las alarmantes grietas radiales que presentaba (figura 1). Poleni aplicó cargas a una cadena colgante simulando los pesos de las dovelas de diferentes tamaños, y superpuso el arco resultante sobre la sección de la cúpula de San Pedro, quedando

este dentro del perímetro de la sección, verificando así estabilidad de la misma. Anteriormente Christopher Wren aplicó el mismo principio que quedó plasmado en uno de sus dibujos para el diseño de la cúpula de 34m de la Catedral de San Pablo de Londres en 1693.

Por su parte, y con el fin tanto de dar forma a sus obras como de simplificar los cálculos, Antonio Gaudí también utilizó y desarrolló sistemas de análisis tridimensional mediante modelos a escala reducida a los que aplicaba la inversión catenaria para que funcionasen a compresión pura. Así, en 1898 diseñó la capilla de la Colonia Güell apoyándose en un modelo invertido a escala 1:10 donde pequeños pesos representaban las cargas a las que se vería sometida la estructura y definían las curvas que darían forma a la capilla (Huerta 2006), en lo que sería el primer modelo colgante tridimensional para determinar la estática, a la vez que diseñar y optimizar la forma estructural (Larsen y Tyas 2003). Por otro lado, años más tarde el ingeniero suizo Heinz Isler obtendría estructuras laminares de hormigón de gran eficiencia trabajando en compresión pura, también a partir de la investigación basada con modelos colgados invertidos (Chilton 2000). Una de las primeras veces que Isler utilizó esta técnica fue en 1968 para la cubierta de una estación de servicio en Deitingen, en la autopista entre Berna y Zurich (figura 2). Se trataba de dos cascarones de 31.6m de largo, 26m de ancho y 9cm de espesor, contruidos con hormigón sin vigas de borde, situados a cada lado de un pequeño edificio de que contenía las instalaciones y el equipamiento de la estación de ser-

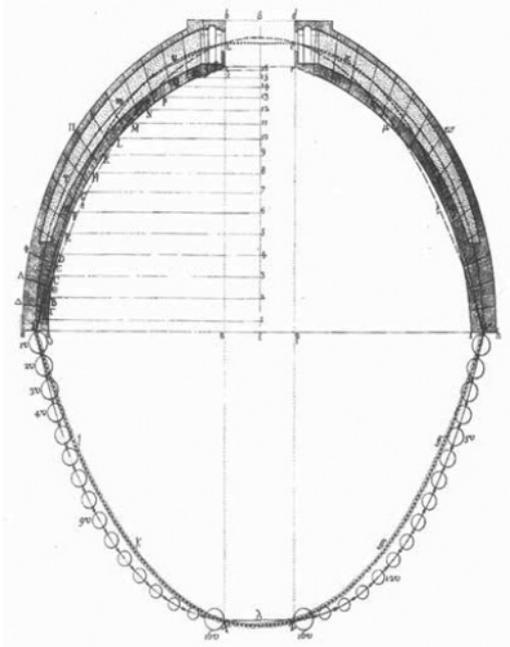


Figura 1
Estudio de Poleni para verificar la estabilidad de la Cúpula de la Catedral de San Pedro (Poleni 1748).

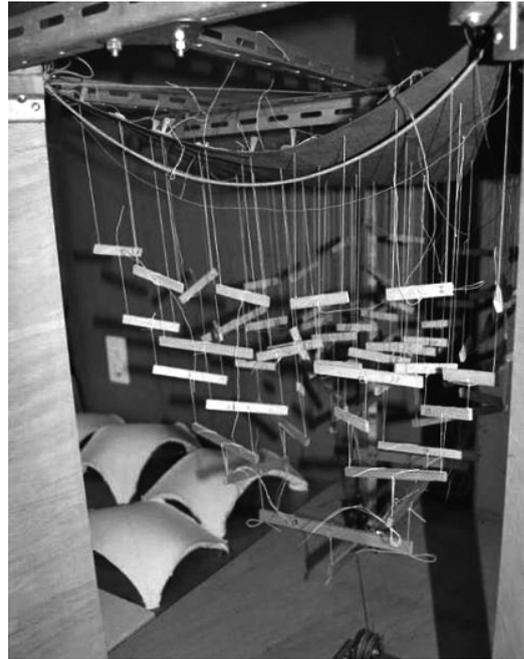


Figura 3
Modelo de látex para determinar forma de la estación de servicio en Deitingen (Chilton 2012).



Figura 2
Estación de servicio en Deitingen, Heinz Isler, 1968 (Archivo gráfico Biblioteca ETH Zurich. ETHBIB.Bildarchiv)

vicio (Peerdeman 2008). Para obtener su forma, se utilizó un modelo que consistía en una estructura de madera de la que se colgó una pieza triangular de goma de látex (figura 3) sobre la que se aplicó una carga re-

partida simulada mediante pequeños discos de madera, de los que suspendía un sistema de cuerdas al que se aplicaba la carga total a repartir.

Sin embargo, nuestra investigación sobre la evolución de las estructuras laminares —con el siglo XX como acotación principal— nos conduce a la consideración de que no podemos limitar la utilización de modelos físicos al estudio de formas eficientes estructuralmente, ya que es posible certificar su operatividad sobre diferentes cometidos o planteamientos inherentes al proceso de diseño estructural desarrollados a partir de las particulares necesidades del proyectista. Así, tras analizar una muestra representativa (38 modelos) de proyectos de estructuras laminares desarrollados con la ayuda de modelos físicos, se observa una diferenciación clara entre las diferentes motivaciones o finalidades principales en relación a la utilización de los mismos.

Así, también se utilizaron modelos para comprobar un determinado funcionamiento estructural según cálculos teóricos realizados previamente y poder por

tanto analizar la viabilidad estructural de una solución estructural. Este es el caso de varios de los proyectos desarrollados por Dischinger y Finsterwalder quienes utilizaron modelos físicos en el diseño y construcción de estructuras laminares para las que no existían precedentes, siguiendo un proceso esencialmente científico: primero se hacía un análisis teórico y después se construía y testeaba un modelo a escala reducida del cascarón, considerando no solamente su forma, sino comprobando también que las propiedades de los materiales, las cargas y la resistencia fueran representativas en el modelo reducido.

Uno de los primeros modelos reducidos de láminas de hormigón fue el desarrollado en 1927 en la construcción de la que sería la primera gran bóveda cilíndrica laminar de hormigón para la cubierta del Mercado de Frankfurt, diseño del arquitecto Martín Elsässer y los ingenieros Dischinger y Finsterwalder (figura 4). En este mercado se cubrió una superficie de 11.000m² sin apoyos intermedios mediante quince bóvedas cilíndricas de 36.9m de longitud, 14.1m de ancho y tan sólo 7cm de espesor de hormigón proyectado reforzado por una doble malla triangular de acero y apoyadas en vigas laterales de borde de 80cm de ancho y 2m de canto. Las empresas constructoras eran las responsables del dimensionado de la estructura, por lo que tenían el doble interés de obtener un comportamiento estructural adecuado junto con el económico en cuanto a la cantidad de material necesario para su construcción. Para el diseño de la estructura se obtuvieron analíticamente las tensiones y se establecieron los refuerzos de armado (Peseke, Grohmann y Bollinger 2010).

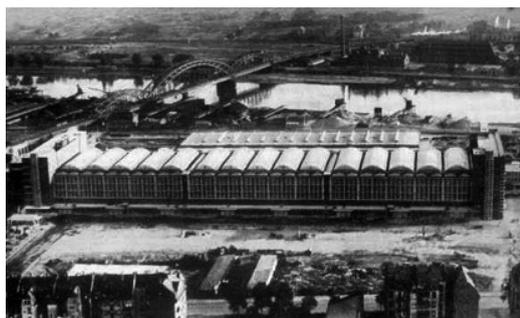


Figura 4
Mercado de Frankfurt, Dischinger y Finsterwalder 1927 (Joedicke 1962).

Dada la escasa experiencia previa en estructuras laminares, y para comprobar el funcionamiento estructural según los cálculos analíticos realizados previamente, se construyó y ensayó junto a la obra un modelo reducido de la misma a escala 1:3 (figura 5), cargándose de una manera gradual con sacos de arena entre el 11 de abril y el 4 de mayo de 1927 hasta alcanzar una carga de 964kg/m². De este modo se obtuvieron las deformaciones de la cubierta medidas sobre el eje del modelo, que arrojaban un comportamiento adecuado y resistencia suficiente (Kleinlogel 1928) sin mostrar signos de pandeo de la superficie ni deformación excesiva, confirmando así la validez de la solución analítica obtenida (Peseke, Grohmann y Bollinger 2010).

El ingeniero español Eduardo Torroja también utilizó modelos para comprobar los cálculos analíticos en obras como la cubierta del Frontón de Recoletos. El proyecto se configuraba a partir de dos grandes bóvedas cilíndricas intersectadas en paralelo y apoyadas únicamente en los testeros. Los cilindros tenían unos radios de 6.4 y 12.2m respectivamente y que juntos cubrían un área libre de soportes de 55 × 32.6m –dimensiones mucho mayores que las de las láminas cilíndricas de hormigón que se habían construido hasta el momento– con tan sólo un espesor de lámina 8cm, excepto en la zona de unión entre los dos cilindros donde se alcanzaban los 15cm. La cubierta permitía la entrada de luz natural a través de unas zonas triangulares dispuestas en ambos cilindros (Fernandez y Navarro 1999) (figura 6).

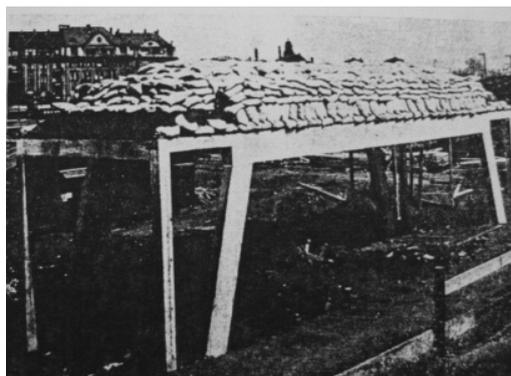


Figura 5
Ensayo de carga a escala 1:3 para las bóvedas del Mercado de Frankfurt 1927 (Peseke, Grohmann y Bollinger 2010).



Figura 6
Vista interior del Frontón Recoletos. Eduardo Torroja 1935 (Torroja 1962).

Resolver la cubierta del Frontón supuso todo un reto estructural, dado que incorporaba condicionantes estructurales que nunca antes se habían considerado, por lo que para lograr una aproximación a la solución se incorporaron algunas simplificaciones en los cálculos y se afrontó el análisis dividiendo el problema por partes a la vez que se valoraban diferentes hipótesis de funcionamiento: como membrana y como placa, y con diferentes estados de carga (Torroja 1942).

Para tener más seguridad sobre su diseño y para contribuir al desarrollo de la teoría de láminas cilíndricas, Torroja contrastó sus resultados con el ensayo sobre un modelo a escala 1:10 de microhormigón construido por la empresa ICON (figura 7).

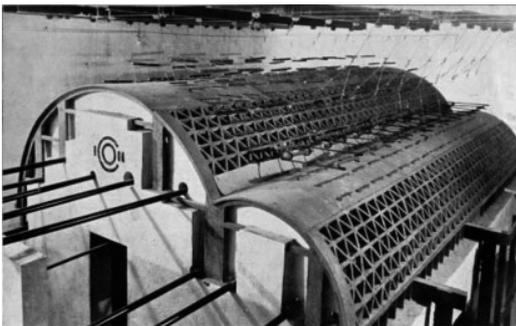


Figura 7
Modelo experimental a escala reducida del Frontón (Torroja 1962).

Es así como fue posible comprobar la resistencia de rotura con cargas superiores a las del cálculo y analizar las deformaciones de la cubierta, para lo que se midieron las deformaciones producidas por el peso propio y las cargas simuladas de viento y nieve, comparando los resultados con los obtenidos analíticamente. El modelo se construyó con un sistema que permitía la descarga automática de la sobrecarga de peso muerto (la principal) en caso de sobrepasarse un descenso de un centímetro, para poder estudiar la iniciación y desarrollo de la rotura en los primeros momentos de iniciarse ésta, además se ideó un sistema de puesta en carga del modelo que permitía aplicar las succiones provocadas por el viento (Antuña 2002). Se instalaron 16 sensores de medición y se hicieron en total 24 ensayos de carga para distintas hipótesis y combinaciones, dibujando las deformadas de los distintos estados de carga. Éstas se compararon con las flechas estimadas en el cálculo, observándose que las experimentales eran algo menores en el cilindro pequeño, al mismo tiempo que la ley de fletores indicaba un rápido aumento de éstos en la salida de la zona de lucernarios. Una vez construida la estructura se midieron las deformaciones reales de la misma, comparándolas tanto con las analíticas como con las obtenidas del modelo (Torroja 1962).

Todo este proceso no sólo le permitió confirmar que el diseño del frontón era óptimo, sino que aumentó su confianza como diseñador y la de otros ingenieros enfrascados en proyectos similares. Aumentó la convicción en las posibilidades del método de diseño seguido por Torroja, basado en la combinación del uso de modelos a escala reducida con unos cálculos relativamente sencillos (Addis 2007).

Por los mismos años en los que Torroja desarrollaba sus obras maestras, en Italia Pier Luigi Nervi construyó unos hangares militares para el aeropuerto de Orvieto. Nervi, convencido de las limitaciones de los cálculos teóricos, prefería el enfoque empírico en sus diseños (Bologna y Neri 2013), y utilizó los modelos reducidos a modo de herramienta de cálculo que le ayudase a definir la estructura, predecir las deformaciones y comprender mejor el comportamiento estructural debido al alto grado de indeterminación estática de la cubierta de los hangares, circunstancia que hacía prácticamente inviable desarrollar unos cálculos definitivos mediante los métodos analíticos disponibles en ese momento. Este proyecto fue una de las primeras estructuras para las que Nervi empleó

modelos reducidos como herramienta de cálculo y verificación de la validez de la estructura, convirtiéndose a partir de ese momento en un recurso utilizado en muchos de sus siguientes proyectos (Chiorino y Chiorino 2013).

El modelo utilizado para el cálculo de la estructura de los hangares de Orvieto se trataba de un modelo reducido construido en celuloide a escala 1:37.5 en la Universidad Politécnica de Milán (figura 8), con la supervisión de Guido Oberti y Arturo Danusso (Peters 2011). El modelo se cargó con pequeños pesos suspendidos simulando la carga permanente de la cubierta, se midieron las deformaciones del modelo y se obtuvieron las tensiones internas de la cubierta para permitir el dimensionado de la misma. Los ensayos sobre modelos reducidos confirmaron a Nervi que el funcionamiento global de la estructura de los hangares era mucho mejor que lo que se podía demostrar mediante cálculos teóricos. De hecho, una vez la obra estuvo construida se midieron meticulosamente las deformaciones reales de la estructura, confirmando la suficiente precisión de los ensayos sobre el modelo reducido (Billington 1985).

La utilización de modelos reducidos como herramienta de cálculo alcanzaría una sofisticación importante. Así el ingeniero suizo Heinz Hossdorf creó una metodología de ensayos propia que permitía medir las reacciones hiperestáticas sobre modelo elástico en equilibrio, formando un sistema de fuerzas nulo junto con las acciones exteriores, que además reducía la posibilidad de error en la lectura de datos y permitía ob-

tener los esfuerzos globales en cualquier sección de la misma (Torroja y Cassinello 2007). Tiempo después desarrolló también los «modelos híbridos» donde medía las deformaciones independientes con un sistema de cargas unitarias sobre el modelo procesadas informáticamente, lo que permitía obtener las superficies de influencia y, mediante combinaciones lineales procesadas por ordenador, simular cualquier estado de carga (Torroja y Cassinello 2007).

Hossdorf calculó con modelos físicos proyectos como la Biblioteca de la Universidad de Basilea (figura 9) o el Teatro Municipal también de Basilea en 1968 (figura 10). La cubierta del teatro la forma una gran lámina estructural de doble curvatura con una



Figura 9
Modelo reducido de la Biblioteca de la Univ. de Basilea 1963 (Hossdorf 2013).

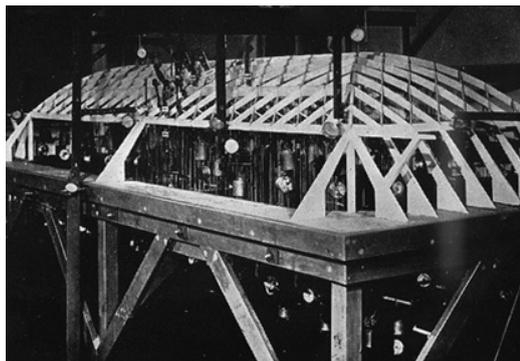


Figura 8
Modelo reducido de celuloide del Hangar de Orvieto (Rogers y Joedicke 1957).



Figura 10
Teatro municipal de Basilea 1968 (Torroja y Cassinello 2007).

luz de más de 60m con tan sólo 12cm de espesor (Cassinello 2006) colgada de la parte alta de caja escénica y anclada en el otro extremo sobre cinco contrafuertes —las fachadas laterales y tres intermedios—, que cubre prácticamente la totalidad del conjunto con una forma imposible de calcular analíticamente, por lo que se utilizó un modelo de resina acrílica a escala 1:50 construido en el laboratorio experimental de Hossdorf que le permitía controlar el equilibrio global del conjunto, hallar las tensiones internas de la lámina y obtener las reacciones de la unión de la cubierta con los contrafuertes y con la caja escénica (Torroja y Cassinello 2007) (figura 11).

Se dispusieron sobre el modelo 310 manómetros unidimensionales y 34 sensores de medición tridimensional, mientras que la carga se simuló mediante 120 pesas suspendidas del modelo que entraron en carga hidráulicamente. Los resultados del ensayo mostraron un funcionamiento adecuado de la estructura, detectando picos de tensión debidos a la flexión de la cubierta, pero se consideraron aceptables (Ekwall 2014).

Por su parte, Robert Maillart en 1939, diseñó el Cement Hall en colaboración con el arquitecto suizo Hans Leuzinger para la Exposición Nacional de Suiza en Zurich. Se trataba de una bóveda parabólica de 16.7m de ancho, 11.7m de altura, estrechándose en la parte posterior a 11.1m de anchura y 9.1m de altura, manteniendo un espesor constante de 60mm en toda la cáscara (Billington 1985).

La intención buscada con el pabellón era demos-

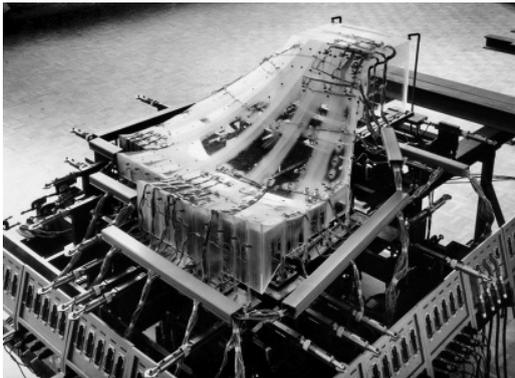


Figura 11
Modelo reducido del teatro municipal de Basilea 1968 (Torroja y Cassinello 2007)

trar las propiedades y versatilidad del hormigón, así como la escasa cantidad necesaria del mismo para crear estructuras robustas. Construida con hormigón proyectado y armado con malla de acero de 8mm de diámetro, se erigió como estructura efímera sin la necesidad de soportar más cargas que la sobrecarga de nieve y con la intención de demolerlo mediante ensayo tras la exposición para comprender mejor el funcionamiento de este tipo de estructuras (Bill y Maillart 1948).

El Cement Hall fue demolido tras la exposición, en febrero de 1940 mediante una prueba de carga dirigida por el profesor Mirko Ros de la Escuela Politécnica de Zürich, que permitió investigar y estudiar con datos reales el comportamiento de las estructuras laminares de hormigón. El pabellón se ensayó como si de un modelo experimental a escala 1:1 se tratase, construido para tal fin, la información obtenida del ensayo permitió avanzar en el conocimiento del comportamiento de las estructuras laminares bajo distintos estados de carga. Se colocaron 30 sensores para medir las deformaciones en la parte inferior de la cáscara, formando seis filas ubicadas en los extremos de la cubierta, en las costillas y en los puntos medios entre los dos anteriores, con cinco sensores de medición en cada fila, aplicándose cargas puntuales en seis filas entre los sensores de medición. Los resultados obtenidos permitieron calcular las tensiones para cada estado de carga, resultando ser más resistente que lo inicialmente previsto, tanto por la carga soportada como por la deformación y resistencia al pandeo gracias a la rigidez y monolitismo de la estructura (Zastavni 2008) (figura 12).



Figura 12
Cement Hall antes de las pruebas de carga hasta su demolición. Se aplicaron las cargas puntuales mediante carrocerías cargadas colgadas de la cubierta (Ros 1940).

La cáscara sufrió deformaciones permanentes para una carga equivalente de 220–240 kg/m² —1.6 veces su peso propio— sin llegar al colapso, que llegó tras aplicar una carga total de 27.6 toneladas en sólo uno de los lados de la cubierta (figura 13), mientras que la mayor deformación presentada fue de 5.2mm para una única carga puntual de una tonelada aplicada en el vértice delantero (Ros 1940).

Félix Candela también recurría a modelos experimentales a escala 1:1 para estudiar el comportamiento estructural cada vez que utilizaba una nueva geometría o tamaño, así como para analizar y optimizar el proceso constructivo del encofrado, colocación del armado o vertido del hormigón (Cassinello et al. 2010). Téngase en cuenta que la utilización de modelos a escala real facilita el análisis constructivo de la obra, además de reducir los efectos derivados de la escala dado que ciertas propiedades (como el módulo de elasticidad, la resistencia de los materiales o los efectos del pandeo) no son escalables. No en vano, Candela era el constructor de sus láminas estructurales, por lo que le interesaba tanto la viabilidad como la optimización estructural y constructiva para reducir los costes de materiales y tiempos de ejecución.

De hecho la economía juega un papel fundamental en el desarrollo de las estructuras laminares, pues es la búsqueda de un funcionamiento más eficiente uno

de los motivos para recurrir a métodos empíricos de investigación y experimentación —como la utilización de modelos físicos—, consiguiendo llevar a cabo las obras con propuestas más económicas que sus competidores coetáneos gracias a la eficiencia de la estructura, del proceso constructivo y/o la utilización de materiales.

En 1949 Félix Candela construyó en San Bartolomé de Naucalpan (México), junto con su hermano Antonio, su primer cascarón experimental con geometría de bóveda funicular y directriz catenaria (figura 14). El modelo consistía en un cascarón basado en los prototipos realizados en Inglaterra durante la Segunda Guerra Mundial según la patente de la bóveda Ctesiphon, desarrollada por Kurt Billing en 1943 y utilizada por el ejército británico para construir barracones militares durante la Segunda Guerra Mundial. Si bien la experiencia de Candela era ahora de mayor tamaño, construyó el modelo con 12 arcos de madera de sección parabólica, de 6 metros de altura, sobre los que extendió tela de saco de yute a modo de encofrado perdido, sin cimbra ni armadura (Cassinello et al. 2010). Al verter el hormigón se deformaba la tela del encofrado formando también catenarias entre los arcos de madera, de modo que se obtenía así una superficie de doble curvatura que evitaba los problemas de pandeo que solían afectar a este tipo de estructuras; es decir, se conseguía rigidizar la super-



Figura 13
Prueba de carga hasta su destrucción con fines científicos (Ros 1940).



Figura 14
Bóveda Ctesiphon, primer cascarón experimental de Félix Candela, México 1949 (Cassinello et al. 2010).

ficie sin aumentar el espesor de la lámina (Churtichaga 2008).

En definitiva, el objetivo de Félix Candela con este modelo era analizar este tipo de formas y optimizarlas estructural, constructiva y económicamente, para extrapolarlas a otros proyectos en los que el coste fuera determinante. Este cascarón le sirvió por tanto de modelo a escala 1:1 para realizar proyectos de vivienda mínima, así como construir una escuela rural de bajo coste en Tamaulipas (México) trasladando tanto forma como el proceso constructivo estudiado (Faber 1963).

PROPUESTA DE CARACTERIZACIÓN

Por tanto, a partir del estudio y análisis de una muestra representativa mayor, es posible concluir una caracterización final propositiva de las principales finalidades o motivaciones de utilización de los modelos físicos en relación al desarrollo de las estructuras laminares de hormigón. En este sentido, se proponen cinco categorías generales que recogen así el conjunto de supuestos y casuísticas observadas a lo largo de la aproximación sucesiva a los diferentes casos de estudio contemplados a partir de las acotaciones de partida: tipológica (estructuras laminares), material (hormigón), cronológica (siglo XX), geográfica (ámbito occidental).

- a) Modelos ideados para el análisis de formas eficientes estructuralmente:

Forman parte de esta categoría los modelos utilizados para explorar la forma resistente y comprender su funcionamiento estructural, así como los modelos de trabajo para la optimización de la forma estructural. En general se trata de modelos cualitativos construidos en las primeras etapas de un proyecto —antes de realizar cálculos analíticos—, para comprender mejor su funcionamiento o para explorar nuevas formas o ideas de diseño estructural.

- b) Modelos utilizados como herramienta de cálculo:

Los modelos aquí incluidos, normalmente desarrollados en laboratorios especializados, son los proyectados para obtener información necesaria para su construcción, utilizados como herramienta de cálculo para obtener esfuerzos,

hallar tensiones, solicitaciones y deformaciones que permitan el dimensionado del proyecto real, hallar cargas últimas de rotura o predecir el comportamiento dinámico frente a los esfuerzos de viento o sismo.

- c) Modelos ideados para la comprobación de la viabilidad estructural y dar confianza en la utilización segura de una determinada solución:

En general forman parte de esta categoría los modelos realizados tras los cálculos analíticos en los que, debido al estado de la teoría disponible o bien dada su dificultad de aplicación, se asumen importantes simplificaciones de cálculo que requieren de una comprobación empírica que valide los resultados analíticos y dé confianza en su utilización de una manera segura. En esta categoría también se encuadrarían los modelos utilizados en ensayos como demostración física de una teoría estructural.

- d) Modelos utilizados con la finalidad de analizar el proceso constructivo, comprobar su viabilidad u optimización constructiva:

De esta categoría forman parte los modelos desarrollados para obtener información constructiva del proyecto que posibilite o facilite su ejecución, comprobar la compatibilidad geométrica o constructiva o bien para optimizar o determinar el proceso constructivo más adecuado para llevar a cabo una determinada solución estructural.

- e) Estructuras laminares ya construidas ensayadas como modelos para comprender su comportamiento estructural.

Esta categoría la encontramos en aquellos casos en los que se extrae información mediante ensayos del comportamiento estructural de láminas ya construidas —como modelo de investigación a escala 1:1— para avanzar en el conocimiento. No se trata pues de la comprobación de la viabilidad ni de la búsqueda de formas eficientes estructuralmente, ni de una herramienta de cálculo o de análisis del proceso constructivo —que se correspondería con las categorías anteriores— sino investigación empírica del funcionamiento de una estructura laminar.

En la tabla 1 se recoge de una manera gráfica esta caracterización aplicada a los treinta y ocho modelos analizados. Se representa en la misma tanto las motivaciones principales encuadradas en cada una de las

obra	año	uso del modelo				
		A	B	C	D	E
1 Planetario Jena	1922					
2 GeSoLei	1926					
3 Mercado de Frankfurt	1927					
4 Mercado de Leipzig	1929					
5 Mercado de Dresde	1931					
6 Mercado de Algeciras	1933					
7 Frontón de recoletos	1935					
8 Hipodromo Zarzuela	1935					
9 Hangares Orvieto	1935					
10 Hangares Orbetello	1939					
11 Hangares Orbetello2	1939					
12 Cement Hall	1939					
13 Bóveda Ctesiphon	1949					
14 Ribless Shell	1950					
15 Fca Fernandez	1950					
16 Paraguas Hypar	1953					
17 Fábrica Jamin	1955					
18 Fabrica Jamin2	1955					
19 Club Táchira	1956					
20 Palacete del Deporte	1957					
21 Pabellón Philips	1958					
22 PabellónPhilips2	1958					
23 Iglesia Fray Klaus	1958					
24 Opera Sidney	1958					
25 Las ballenas	1959					
26 Modelo experim IASS	1959					
27 Almacén VSK	1959					
28 Concesionario Moser	1959					
29 Ntra Sra Guadalupe	1962					
30 Ntra Sra Guadalupe2	1962					
31 Biblioteca U. Basilea	1963					
32 Catedral Sta Mª	1965					
33 Catedral SFCo2	1965					
34 estación de servicio	1968					
35 Deittingen2	1968					
36 Teatro Basilea	1968					
37 Piscina cubierta Alster	1973					
38 Teatro en Grötzingen	1977					

Tabla 1
Propuesta de caracterización.

categorías descritas anteriormente, así como, con una tonalidad más clara, los usos secundarios (según otras categorías) en los casos en los que los modelos tengan otras finalidades además de la principal.

LISTA DE REFERENCIAS

- Addis, W. 2007. *Building: 3000 years of design engineering and construction*. New York: Phaidon.
- Antuña, J. 2002. «Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret.» Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

- Bill, M. y R. Maillart. 1948. *Robert Maillart; bridges and constructions*. Praeger.
- Billington, D.P. 1985. *The tower and the bridge: the new art of structural engineering*. Princeton: Princeton University Press.
- Bologna, A. y Neri, G. 2013. «Pier Luigi Nervi in the United States. The Height and Decline of a Master Builder». *Structures and Architecture*, EPFL-CHAPTER-188791: 1900–1906.
- Cassinello, P. 2006. «En Memoria de Heinz Hossdorf». *Informes de la Construcción*, 58–502.
- Cassinello, P., M. Schlaich, M. Garlock, D.P. Billington y J.G.O. Salinas. 2010. «Félix Candela, centenario: la conquista de la esbeltez». En exposición: *Centenary 2010: the achievement of slenderness*.
- Chiorino, M. A., y C. Chiorino. 2013. «Pier Luigi Nervi: architecture as challenge». *Structures and Architecture: New concepts, applications and challenges*.
- Chilton, J. 2000. *The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture: Heinz Isler*. London: Thomas Telford Publishing.
- Chilton, J. 2012. «Form-finding and fabric forming in the work of Heinz Isler». *Proceedings of Second International Conference on Flexible Formwork*, ICFF 2012, 27–29 June 2012, Bath, UK.
- Churtichaga, J.M. 2008. «La estructura veloz». *Revista Consejo Superior Colegios Arquitectos de España*.
- Ekwall, T. 2014. «Heinz Hossdorf und die Modellstatik». *Revista Tec 21 43*.
- Faber, C. 1963. *Candela: The Shell Builder*. Reinhold Publishing Corporation.
- Fernández J.A. y Navarro JR. 1999. *Eduardo Torroja: Engineer*. Madrid: Pronaos Publishers.
- Hooke, R. 1675. *Description of heliostopes, and some other instruments*. London: John & Martin Printer to the Royal Society.
- Hossdorf, H. 2013. *Heinz Hossdorf—Das Erlebnis Ingenieur zu sein*. Springer-Verlag.
- Huerta Fernández, S. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- .2006. «Structural design in the work of Gaudí». *Architectural Science Review* 8–2.
- Joedicke, J. 1962. *Schalenbau*. Hilversum: Uitgeverij G van Saane.
- Kleinlogel A. 1928. *Die Schalengewölbe der Großmarkthalle*. Frankfurt: Beton und Eisen.
- Larsen, O. y A. Tyas. 2003. *Conceptual structural design: bridging the gap between architects and engineers*. Thomas Telford Ltd.
- Peerdeman, B. 2008. «Analysis of thin concrete shells revisited: Opportunities due to innovations in materials and analysis methods». Tesis máster. Delft University of Technology.

- Peseke, H., M. Grohmann, y K. Bollinger. 2010. «The Grossmarkthalle (wholesale market hall) in Frankfurt/Main. An early reinforced concrete shell structure». En: Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Peters, TF. 2011. *IABSE-The First 80 years: 1929–2009*. Zurich: IABSE.
- Poleni, G. 1748. *Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano*. Padova: Nella Stamperia del Seminario.
- Rogers, E. y J. Joedicke. 1957. *The Works of Pier Luigi Nervi*. Architectural Press.
- Ros, M. 1940. «Ergebnisse der Belastungsversuche an der Zementhalle der Schweizerischen Landesausstellung Zürich 1939». *Bericht 99, Verein Schweizerischer Zement*.
- Torroja, E. 1942. «Comprobación y comportamiento de un estructura laminar». En: *Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid*.
- 1962. «Frontón Recoletos». *Informes de la Construcción*, 14–137.
- Torroja, J.A. y P. Cassinello. 2007. «Enrique Hossdorf. Arte e innovación en ingeniería». *Informes de la Construcción* 59–505: 81–89.