



Revista de Arquitectura

ISSN: 1657-0308

ISSN: 2357-626X

Universidad Católica de Colombia, Facultad de Diseño y
Centro de Investigaciones (CIFAR)

Galindo-Díaz, Jorge

Láminas cilíndricas en la arquitectura colombiana del siglo XX

Revista de Arquitectura, vol. 20, núm. 2, 2018, pp. 36-50

Universidad Católica de Colombia, Facultad de Diseño y Centro de Investigaciones (CIFAR)

DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.2.2057>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=125159161004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Láminas cilíndricas en la arquitectura colombiana del siglo XX

Jorge Galindo-Díaz

Universidad Nacional de Colombia, Manizales (Colombia)

Escuela de Arquitectura y Urbanismo

Galindo-Díaz, J. (2018). Láminas cilíndricas en la arquitectura colombiana del siglo XX. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 20(2), 36-50. doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.2.2057>

<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.2.2057>



Arquitecto, Universidad del Valle, Cali (Colombia).

Dr. Arquitecto, ETSAB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (España).

Profesor Titular, Escuela de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de Colombia.

<http://orcid.org/0000-0001-8407-8347>

jagalindod@unal.edu.co

Resumen

Desde 1946 se empezaron a diseñar en Colombia láminas cilíndricas como solución de cubierta para edificios industriales, principalmente, replicando formas estructurales empleadas desde los inicios del nuevo siglo en Europa y Estados Unidos. Este artículo describe y analiza los primeros tres proyectos de importancia construidos en el país (mercado de Girardot, estación de autobuses y sede de Volkswagen en Bogotá) donde se emplearon láminas cilíndricas haciendo uso de ingeniosos recursos constructivos; se considera como hipótesis que esta iniciativa buscaba aprovechar tanto las ventajas técnicas como espaciales que ellas brindaban, dentro de una visión integral de la relación entre arquitectura, construcción y estructura. Como herramienta de investigación cualitativa se aplicó un análisis de la información planimétrica disponible, contrastada con los edificios que todavía se conservan. Las conclusiones demuestran la manera en que este tipo de estructuras, con sus atributos y limitaciones, se convirtieron en un recurso común en la arquitectura colombiana de la segunda mitad del siglo XX.

Palabras clave: arquitectura colombiana siglo XX, bóvedas de membrana, construcción civil, diseño de proyecto, edificios industriales, ingeniería arquitectónica.

Cylindrical shells in Colombian architecture in the 20th century

Abstract

In 1946, cylindrical shells began to be designed in Colombia as a roof solution for industrial buildings, mainly replicating structural forms used in Europe and the United States since the beginning of the 20th century. This article describes and analyzes the first three projects of importance in Colombia, in which cylindrical shells were used through ingenious constructive resources. It defends the hypothesis that this initiative sought to take advantage of both the technical advantages and spatial attributes of these shells with a comprehensive view on the relationship between architecture, construction, and structure. Using a qualitative research method, available planimetric information was analyzed, and contrasted with buildings that are still standing and in service. The conclusions demonstrate how this type of structures, with their attributes and limitations, became a common resource in Colombian architecture in the second half of the 20th century.

Keywords: Colombian architecture, 20th century, membrane vaults, civil construction, project design, industrial buildings, architectural engineering.

Estruturas laminares cilíndricas na arquitetura colombiana do século XX

Resumo

A partir de 1946, na Colômbia, teve início o desenho de estruturas laminares cilíndricas como solução de cobertura para prédios industriais, principalmente, replicando formas estruturais usadas desde princípios do novo século na Europa e nos Estados Unidos. Este artigo descreve e analisa os três primeiros projetos mais relevantes construídos no país (mercado de Girardot, estação de ônibus e sede da Volkswagen em Bogotá), nos quais foram usadas estruturas laminares cilíndricas com a ajuda de engenhosos recursos construtivos. Considera-se como hipótese que essa iniciativa buscava aproveitar tanto as vantagens técnicas quanto espaciais que elas brindavam, dentro de uma visão completa da relação entre arquitetura, construção e estrutura. Como ferramenta de pesquisa qualitativa, foi utilizada uma análise da informação planimétrica disponível, contrastada com os prédios que ainda estão conservados. As conclusões demonstram a maneira em que esse tipo de estruturas, com seus atributos e limitações, se converteu em um recurso comum na arquitetura colombiana da segunda metade do século XX.

Palavras-chave: arquitetura colombiana século XX, membrana, construção civil, desenho de projeto, prédios industriais, engenharia arquitetônica.

Recibido: abril 18 / 2018

Evaluado: junio 18 / 2018

Aceptado: julio 23 / 2018

Introducción

Este artículo es uno de los resultados del proyecto de investigación titulado “Estructuras lámínares de hormigón en la arquitectura colombiana del siglo XX: tradición e innovación” cuyo objetivo principal pretende identificar las características formales y constructivas de las membranas diseñadas y edificadas en el país durante un periodo de veinte años contados a partir de 1946, de la mano de profesionales nacionales que bien conocían lo que por entonces ocurría en el contexto de la arquitectura internacional y, de manera particular, en el campo de los sistemas estructurales que buscaban cubrir grandes superficies con láminas de hormigón armado o cerámica armada, con mínimo espesor y bajo peso propio.

De manera particular se expondrá aquí el caso de las cubiertas formadas por conjuntos de láminas cilíndricas delgadas; un tipo estructural que Torroja (1957) definiría pocos años después como “totalmente nuevo”, caracterizado por disponer “la lámina cilíndrica sobre arcos rígidos o muros transversales distanciados y colocados según las directrices, es decir, sin necesidad de apoyo de la misma sobre las generatrices de arranque” (p. 120).

La hipótesis que aquí se sustenta es que tales láminas cilíndricas, llamadas en inglés *barrel-shell* (Billington, 1965) y en español bóvedas de membrana (Bonnelly, 1942; Bonnelly, 1945; Bóvedas membrana, 1950), bóvedas dípteras (Torroja, 1957), bóvedas viga (García, 2017) o vigas lámínares (Villazón, 2001), fueron un recurso tecnológico empleado por arquitectos e ingenieros colombianos gracias a que, además de representar ventajas en la optimización de los materiales empleados en su construcción, creaban de manera simultánea un plano de cubierta ligero e impermeable por la parte superior, y un falso techo por su cara inferior; el conjunto así formado se convertía en elemento determinante de la configuración del espacio habitable, y en factor dominante en la imagen arquitectónica de la totalidad del edificio.

Considerando lo anterior, ¿de qué manera se produjo la relación entre proyecto y construcción en edificios que usaron este sistema estructural?, ¿con qué herramientas de análisis estructural se contaba y cómo influyeron en los resultados obtenidos?, ¿de qué recursos técni-

co constructivos se valieron los profesionales de la arquitectura y la ingeniería para materializarlos? Estas son las preguntas de investigación más relevantes que se formulan a la luz de la hipótesis anterior.

Entre los ejemplos más destacados del uso de este tipo de estructuras construidas en Colombia y que serán analizadas en este artículo, se han escogido como objeto de estudio los proyectos para el mercado de Girardot (1946-1954), diseñado por el arquitecto alemán Leopoldo Rother, y dos edificaciones en las que participó Guillermo González Zuleta como ingeniero estructural: una estación de autobuses en Bogotá (1950-1951) hoy demolida, y la sede para la casa Volkswagen (1954-1955), ambos en Bogotá, que si bien han sido reseñados por la historiografía de la arquitectura colombiana (Arango, 1989; Niño, 2003, principalmente), no hay constancia de estudios llevados a cabo sobre estos edificios a partir de consideraciones constructivas y estructurales.

Es importante destacar que con posterioridad a la construcción del último de los edificios mencionados, el uso de láminas cilíndricas en cubiertas se extendió a lo largo y ancho del país, durante un lapso de tiempo que se prolongó hasta los últimos años de la década iniciada en 1980, y que se manifiesta a través de importantes ejemplos entre los que se destacan la sede del Centro Interamericano de Vivienda (CINVA)¹ (1953) en Bogotá; el Hipódromo de Techo (1953-1955), también en Bogotá; el Centro Cívico de Barranquilla (1955), el estadio La Libertad (1955) en Pasto, el edificio para el mercado de Buga (1960), la cárcel de Popayán (1962) y el Palacio de Justicia de Cúcuta (1988), entre muchos otros.

Metodología

El método de investigación aplicado fue de carácter cualitativo, desarrollado a partir de un trabajo de archivo que registró y analizó la información planimétrica de los proyectos objeto de estudio, y que se extendió al campo de la lectura de fotos de la época y la inspección visual directa de los edificios construidos, cuando ello fue posible. Los planos originales del mercado de

¹ La sede del Centro Interamericano de Vivienda (CINVA) se construyó en predios de la Universidad Nacional de Colombia, y hoy alberga su Escuela de Arquitectura.



Girardot reposan actualmente en el Fondo Invías, del Archivo General de la Nación, en tanto que los que corresponden a la estación de autobuses y la sede de la casa Volkswagen se encuentran en el Fondo Guillermo González Zuleta, del Archivo de Bogotá. Fotografías de estos dos últimos edificios se pueden consultar a lo largo de varios números de la revista Proa.

A partir de la información obtenida se adelantó un análisis descriptivo y comparativo centrado en los siguientes aspectos: características geométricas y dimensionales de las láminas cilíndricas usadas en cada edificio, conexiones entre ellas y los sistemas de apoyo, materiales constructivos empleados en su construcción y mecanismos de evacuación de las aguas lluvias puestos en práctica. En cuanto a las limitaciones del estudio hay aspectos que no se abordaron en este texto, que bien se podrían desarrollar en una fase posterior y se consideran importantes, estos son: análisis del estado de conservación, análisis del comportamiento mecánico en las condiciones actuales y caracterización de sus materiales constitutivos.

En la primera parte del artículo se hace una breve explicación relacionada con el comportamiento

mecánico de las láminas cilíndricas a fin de comprender cabalmente el reto que implicaba su diseño y construcción en un momento en que no se contaba con sofisticados métodos de cálculo. Posteriormente, se da cuenta de su origen en el contexto de la arquitectura internacional y se exploran los vínculos tecnológicos entre los desarrollos que en el campo de las estructuras laminares se producían entre el resto del mundo y los arquitectos e ingenieros colombianos. Finalmente, y de manera previa a la discusión y las conclusiones, se hace una descripción de los edificios mencionados a partir de la metodología descrita.

Resultados

Geometría, comportamiento mecánico y construcción de las láminas cilíndricas

En esencia, las estructuras laminares son aquellas cuya geometría corresponde a una superficie delgada y continua, en la cual dos de sus dimensiones predominan sobre la de su espesor; su comportamiento se fundamenta en que todos los esfuerzos internos son normales, de tracción o compresión, y tangenciales. Para que esto ocurra la carga que actúa sobre la estructura debe ser, preferiblemente, "uniformemente distribuida y no presentar variaciones bruscas ni cargas puntuales" (Morales, 2009, p. 940), de tal manera que su resistencia mecánica es considerada una virtud de su forma.

En términos generales, las estructuras laminares (también llamadas de superficie activa) pueden ser clasificadas en tres grupos (Engel, 1970): sin curvatura (láminas plegadas, por ejemplo), de curvatura simple (como las láminas cilíndricas que aquí se estudian) y de doble curvatura (como en el caso de los paraboloides hiperbólicos). En el caso de las láminas de curvatura simple, su comportamiento estructural puede explicarse a la luz de la teoría de la membrana, que supone que todos los esfuerzos son tangentes a la lámina

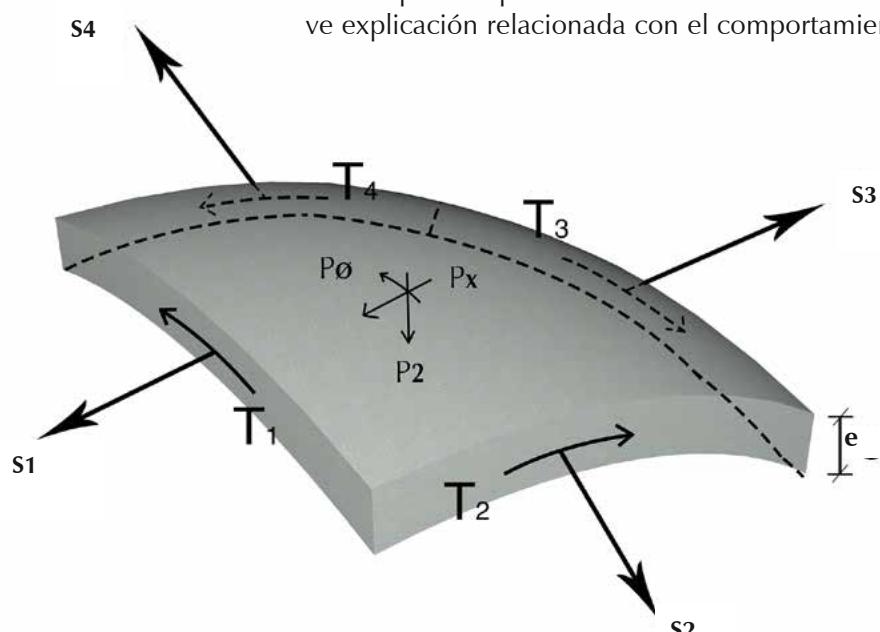


Figura 1. Esfuerzos bidimensionales considerados en las estructuras tipo membrana
Fuente: Laura Henao, 2018, CC BY.

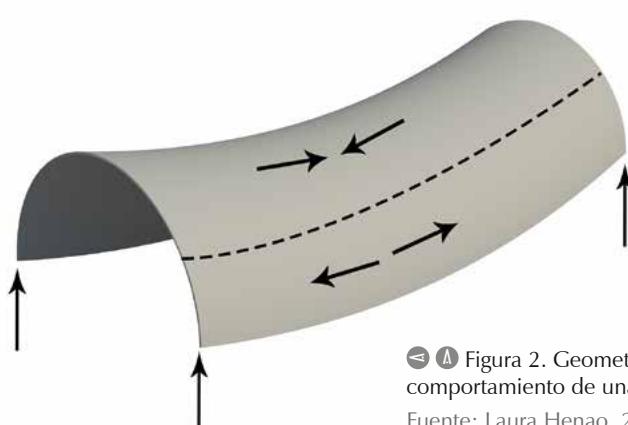
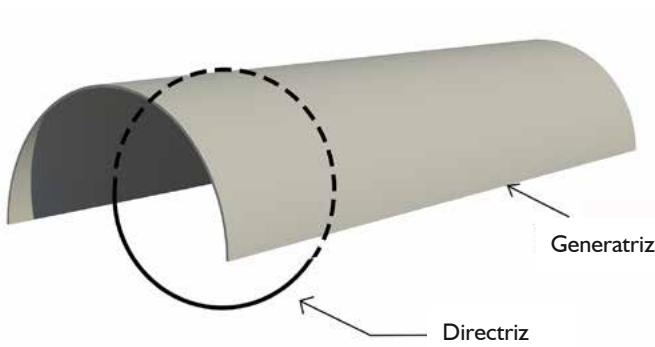


Figura 2. Geometría y comportamiento de una lámina cilíndrica
Fuente: Laura Henao, 2018, CC BY.

y están repartidos uniformemente en su espesor (Candela, 1951), de tal manera que en ellas solo se desarrollan esfuerzos bidimensionales a lo largo de su superficie (Salvadori y Heller, 1966); la rigidez a la flexión y al cortante son despreciables, así como la resistencia a la compresión (Figura 1).

En el caso particular de las láminas cilíndricas simples, con ejes horizontales y simétricos, y de acuerdo con la literatura especializada (Billington, 1965), ellas pueden diferenciarse en cortas y largas en función de sus condiciones de apoyo y su comportamiento estructural. Así, las denominadas cortas son aquellas que se apoyan en sus bordes longitudinales (o generatrices) y presentan una relación $r/L > 0,6$ (donde r es el radio interior de la directriz y L es la longitud de la membrana) en tanto que las largas presentan una relación $r/L < 0,6$ (ASCE, 1952) y se apoyan en sus extremos (o sobre las líneas de las generatrices) y presentan un comportamiento similar al de una viga (Figura 2a).

En cualquier caso, las láminas cilíndricas no se deben confundir con las bóvedas, a pesar de las similitudes en su forma, debido a que ambas tienen un comportamiento mecánico diferente (Torroja, 1957). El comportamiento de las bóvedas está basado en la interconexión de arcos paralelos que transmiten un mismo esfuerzo sobre apoyos continuos bajo las generatrices; se construyen generalmente a partir de materiales resistentes a la compresión, y su espesor puede llegar a ser, en ocasiones, considerable. Por su parte, las láminas cilíndricas se comportan de manera similar a las vigas longitudinales prismáticas, aunque dotadas de perfil curvo y reducido espesor, y son capaces de vencer grandes luces sin apoyos laterales continuos y con un predominio de los esfuerzos de flexión.

Así, cuando una lámina cilíndrica entra en carga, así sea bajo la acción de su peso propio, las generatrices se deforman, curvándose de tal manera que el área situada en la parte inferior de la lámina trabaja a tracción y la de la parte superior trabaja a compresión (Figura 2b); si el espesor de la lámina es pequeño con relación a su longitud, esta flexión es reducida y tiene poca influencia en su comportamiento general.

Desde el punto de vista constructivo, las láminas cilíndricas se pueden hacer en hormigón armado o en cerámica armada. En ambos casos, su proceso de elaboración sigue una misma secuencia: encofrado (a partir de moldes rectos ya que se trata de una superficie desarrollable), armado (continuo o reticular dependiendo de si

es en hormigón o en cerámica, respectivamente), hormigonado (completo o sobre las viguetillas en los mismos casos) y desencofrado. Dependiendo de la cantidad de láminas y sus dimensiones, puede tratarse de un proceso repetitivo o simultáneo, donde es posible la reutilización de los moldes y siempre con un ahorro en la cantidad de los materiales constitutivos.

Génesis de las láminas cilíndricas

El origen de las láminas cilíndricas en las primeras décadas del siglo XX está estrechamente relacionado con los avances adelantados por la compañía alemana Dyckerhoff & Widmann AG (Dywidag), en cabeza de dos de sus ingenieros más destacados: Franz Dischinger y Ulrich Finsterwalder (Stegmann, 2009), encargados del cálculo de las primeras cubiertas delgadas en hormigón armado: el planetario para Zeiss en Jena² (1922), cuya planta circular tenía 25 m de radio y presentaba un espesor de cáscara esférica de 6 cm (Figura 3); el mercado de Frankfurt del Meno (1927), donde cada bóveda cilíndrica cubría una superficie de 50 x 17 m, y el de Leipzig (1929), que ostentaba dos cúpulas gemelas sobre plantas

2 Si bien la cúpula de Jena suele considerarse como pionera en el campo de las estructuras tipo cáscara delgada, estudios recientes (Picon, 1997) mencionan algunos casos precedentes como la cubierta de la estación de Bercy-París, construida por el ingeniero francés S. Boussiron en 1910. Una revisión detallada de las primeras ediciones de la revista *Le béton armé*, a través de la cual la casa Hennebique promocionaba construcciones adelantadas en varios países del mundo que hacían uso de su sistema, permite reconocer primigenias experiencias en el campo de las estructuras laminares entre las que se cuentan la cúpula del Banco Brunner en Bruselas (1900), la que ostentó durante algunos años el Museo de Antigüedades Egipcias en El Cairo (1900) y la cúpula hemisférica del Palacio de Justicia de Sousse, en Túnez (1907), todas ellas dadas a conocer a través de esta publicación, y que no disponían todavía de un sistema de cálculo estructural eficaz y confiable para explicar los principios de estabilidad de este tipo de construcciones.

Figura 3. Cúpula de Jena (1922), por Dyckerhoff & Widmann AG
Fuente: Cassinello, Schlaich y Torroja (2010).



octogonales de 65,8 m de diámetro, entre otras (May, 2012).

Gracias al primero de estos proyectos, Dischinger obtuvo –conjuntamente con su socio en este trabajo, Walther Bauersfeld–, la patente que terminó conociéndose como “sistema Zeiss-Dywidag de láminas delgadas para cubiertas” (Billington, 2013) o “sistema Z-D”. En este caso, las barras de acero se disponían a lo largo de las trayectorias de tensión, con ubicación especial de refuerzos en las esquinas y otras regiones singulares sometidas a esfuerzos. La difusión de este sistema en los años posteriores obedeció a una bien planeada estrategia comercial que llevó a Dywidag a construir estructuras laminares en varios países de Europa, e incluso en América Latina: filiales de esta empresa alemana afincadas en Uruguay y Argentina construyeron al menos siete membranas de hormigón en un periodo comprendido entre 1929 y 1933, bien por contratación directa o mediante asesoría técnica durante el proceso constructivo. En cualquier caso, entre 1923 y 1939, los sistemas patentados por Dywidag se emplearon al menos en 35 países, y alcanzaron más de 280.000 m² de superficie cubierta (May, 2015).

En el campo específico del análisis estructural de cáscaras cilíndricas, a los trabajos de los ingenieros de Dywidag se sumaron los de Knud W. Johansen (1944) y Hegel Lundgren (1949). Este último hizo uso de ecuaciones clásicas empleadas en el estudio de la flexión de las vigas a fin de determinar las tensiones longitudinales, y las combinó con un análisis de la parte de la estructura con forma de arco para encontrar el valor de los momentos de flexión transversal. Este mismo principio fue utilizado tanto por Félix Candela en el diseño de su primera cáscara cilíndrica larga para la cubierta de Almacén Pisa en 1951 (Martínez y Echeverría, 2017), así como por el ingeniero

uruguayo Eladio Dieste en el cálculo de varias de sus membranas construidas en cerámica armada a partir de 1959 (Cabeza y Almodóvar, 1996). De la misma manera, este sistema de cálculo aún estaba vigente en el diseño estructural que hizo August Komendant para el Kimbell Art Museum de Louis Kahn en 1972 (Buonopane y Osanov, 2015).

En Colombia, el interés por las estructuras laminares se manifestó tempranamente y de manera especial en el ámbito académico de la Universidad Nacional, tal como lo corroboran algunos de los artículos publicados desde 1939 en la revista *Ingeniería y Arquitectura*, órgano impreso de su Facultad de Ingeniería, y en el que participaban mediante artículos tanto profesores como estudiantes e invitados internacionales. Así, la primera nota publicada en esta revista sobre el tema apareció firmada por el ingeniero dominicano Rafael Bonnelly, quien pretendía llegar a “fórmulas prácticas que nos den el diseño rápido de las membranas y de esta manera superar las limitaciones impuestas por las patentes” (Bonnelly, 1942, p. 18) que entonces restringían el conocimiento sobre el cálculo de láminas cilíndricas.

Su explicación se desarrollaba a partir del caso de una bóveda semicilíndrica en hormigón armado de 84 m de longitud, 40 m de ancho y 7,5 cm de espesor, para la cual se determinaban –mediante un proceso simplificado pero de orden matemático–, los valores del momento de inercia, los esfuerzos y la sección de las barras de acero. Tres años más tarde, el mismo Bonnelly remitiría a *Ingeniería y Arquitectura* una detallada e ilustrada reseña de una bóveda laminar construida por él en Santo Domingo, que verificaban en la práctica sus apreciaciones teóricas (Bonnelly, 1945).

Otra muestra del interés académico en el cálculo de estructuras laminares que existía en Colombia se manifiesta a través de una serie de artículos publicados en *Ingeniería y Arquitectura* (Pucher, 1943a, 1943b). Gracias a estos artículos traducidos al castellano por el profesor Julio Carrizosa, se empezaron a conocer en el país los métodos desarrollados por el ingeniero alemán Adolf Pucher, quien además de haber trabajado también para Dywidag, será bien conocido en el ámbito hispanoamericano por su libro de texto sobre hormigón armado (Pucher, 1958), usado en la formación de los ingenieros civiles.

Por su parte, en 1944, el ingeniero y docente de la Universidad Nacional, Henry Cornelissen, explicaba en la misma revista nuevos modos de análisis en láminas cilíndricas, a partir de dos

Figura 4. Frontón Recoletos (1935), Madrid, por Eduardo Torroja
Fuente: Cassinello, Schlaich y Torroja (2010).



sobresalientes métodos para la solución: el del doctor U. Finsterwalder y el del doctor F. Dischinger, “en vista de que hoy día el cálculo de estas estructuras es demasiado complicado y laborioso para ingenieros no especializados en esta rama” (Cornelissen, 1944, p. 5). Como ejemplos, este autor apelaba a las cubiertas del Budapest Market Hall (1931), con membranas de 41,5 m de luz, 12 m de ancho y 6 cm de espesor diseñadas por Finsterwalder, y al Hershey Arena, diseñado por el ingeniero Anton Tedesco (1936) en Estados Unidos. En la bibliografía del artículo se incluían autores como Dischinger, Finsterwalder, Moltke y Kalinka, Schorer, Tedesco y Timoshenko, todos de enorme influencia en el campo del cálculo de membranas de hormigón armado.

Pero además de las publicaciones de corte académico, en el contexto colombiano fue muy importante la presencia física del ingeniero español Eduardo Torroja, quien permaneció en Bogotá por espacio de cinco días en 1952. En aquella ocasión impartió varias conferencias entre las cuales estaba una titulada “Cubiertas laminares de doble y simple curvatura” (Escobar y Cárdenas, 2006), en la cual explicaba los principios mecánicos de las bóvedas cilíndricas, entre otras cosas.

Para entonces, muchos de los edificios proyectados por Torroja ya eran reconocidos por la comunidad internacional, destacándose su diseño de la cúpula rebajada para el mercado de Algeciras (1934), de 44,1 m de radio de curvatura y 9 cm de espesor. Sin embargo, su proyecto más famoso será el de las cubiertas para el hipódromo de La Zarzuela (1935) en Madrid, dotado de planos de doble curvatura, sin nervios, que vuelan 12,7 m desde el apoyo hacia la pista, con un ancho de 5,3 m en cada uno de sus módulos y un espesor de 5 cm en el extremo del voladizo. Adicionalmente, en el campo de las bóvedas cilíndricas se destacó su diseño para la cubierta del Frontón Recoletos, también en Madrid, resuelta a partir de dos lóbulos semi-cilíndricos de simple curvatura, construidos en hormigón armado (García, 2017).

En este último proyecto –que lamentablemente fue parcialmente destruido durante la Guerra Civil española–, Torroja había eliminado de manera deliberada la posibilidad de construir una viga prismática de gran canto bajo la línea donde se unían las dos bóvedas laminares (Figura 4). En sus palabras, “si existe la viga longitudinal, es la constituida por la lámina misma, que saliéndose del estrecho marco mecánico de las piezas prismáticas, desarrolla un proceso resistente

mucho más complejo y completo pero no menos definido” (Torroja, 1936, p. 4).

Después de la Segunda Guerra Mundial, las láminas cilíndricas se extendieron por Estados Unidos y Europa como solución de cubierta para naves industriales, almacenes, salas de exhibición de vehículos y escenarios deportivos, entre otros, con especial cuidado en su forma geométrica, la manera de sustentarse y el proceso constructivo, dando pie a una variedad tipológica singular (García y Osuna, 2009). Dicho fenómeno coincide con el interés que su diseño despertó en los ingenieros y arquitectos colombianos, que contaban ya con el aparato matemático necesario para su cálculo estructural, y estaban preocupados por desarrollar una labor experimental en el ámbito constructivo en aras de lograr estructuras prácticas, versátiles y de bajo costo.

No es una coincidencia que el interés de los profesionales colombianos por el diseño y la construcción de cubiertas livianas para grandes luces se produjo en un momento en que el país daba inicio a un proceso de industrialización de sus ciudades más importantes. Tal situación hacía necesario proyectar nuevos espacios dotados de buenas condiciones de iluminación y ventilación, sin apoyos intermedios que obstaculizaran los equipamientos –y especialmente a bajo costo–, de tal manera que fuera viable su construcción.

Casos de estudio en la arquitectura colombiana

Ya se ha demostrado el interés que existía en el contexto académico de la Universidad Nacional de Colombia por las estructuras laminares, manifestado en los artículos que al respecto publicaban sus profesores y colaboradores extranjeros; sin embargo, en el campo de la práctica, las primeras construcciones de este tipo se dieron de manera lenta y progresiva.

Así, se tiene noticia de que entre 1942 y 1946 el arquitecto José María Montoya Valenzuela y el ingeniero Fausto Galante construyeron bóvedas en concreto reforzado para cubrir la capilla del Seminario Menor de Bogotá, aunque su influencia en el contexto local y nacional fue limitada. Será entonces de la mano del arquitecto-ingeniero alemán Leopoldo Rother como se producirán los primeros intentos por aprovechar las bondades de las estructuras laminares planas o ligeramente curvas, tal como lo evidencian sendos proyectos para la Universidad Nacional de Colombia: el estadio Alfonso López (1937) y la sede de la Imprenta (1945), hoy Museo de Arquitectura (Niño, 2003; Pinilla, 2017).



Figura 5. Vista actual del mercado de Girardot

Fuente: Laura Henao, 2018, CC BY.

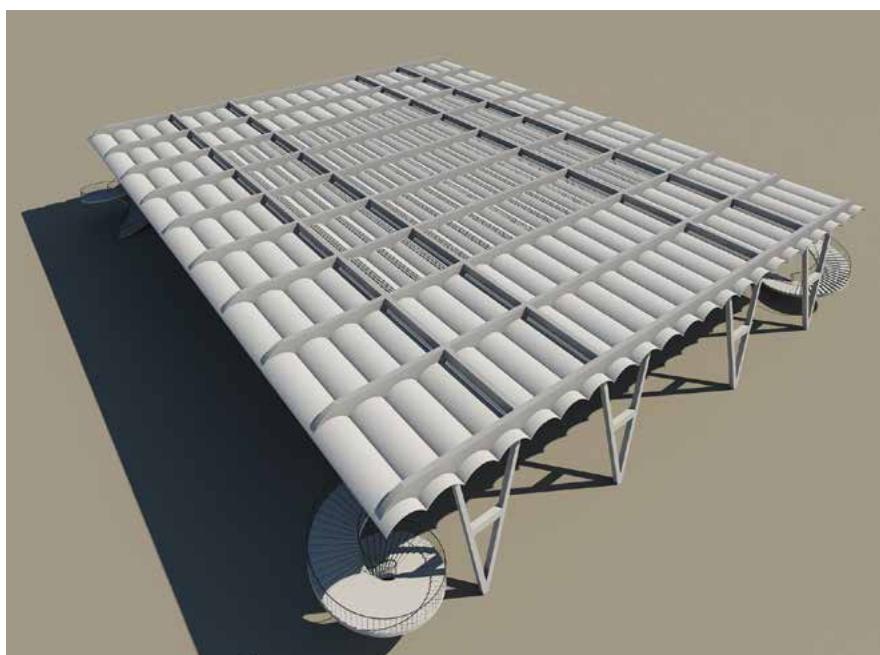


Figura 6.
Reconstrucción digital de la cubierta, vista superior
Fuente: Laura Henao, 2018, CC BY.

También vale la pena mencionar el diseño de Rother para el Edificio Laverde (1943) en Bogotá, cuyo remate de cubierta se resolvió mediante una cubierta ondulante construida a partir de membranas que muy probablemente fueron de hormigón armado (Devia, 2006). Además, en su proyecto para el Edificio Nacional de Barranquilla (1945), es claro el uso de láminas cilíndricas cortas como solución de cubierta (Arango, 1989), calculadas por el ingeniero Guillermo González Zuleta. A los nombres de estos dos profesionales se debe el primer edificio cubierto con láminas cilíndricas en el país: el mercado de Girardot.

Mercado de Girardot

Diseñado por Leopoldo Rother a partir de 1946, su construcción fue terminada en 1954; contó con la colaboración del ingeniero calculista José Antonio Parra y la supervisión del ingeniero Guillermo González Zuleta, titulado por la Universidad Nacional de Colombia en 1941. Se trata de un edificio concebido a manera de un gran plano horizontal que provee de sombra a los

vendedores del mercado protegiéndolos de la radiación solar, sin casi presencia de muros de cerramiento, lo que permite al aire circular libremente a través del edificio (Figura 5).

Los elementos estructurales se inscriben claramente en una malla de ejes ortogonales separados 7 m en un sentido y 2,5 m en el otro; estas medidas corresponden a las dimensiones de las láminas de la cubierta y a los encofrados de madera que se elaboraban sin el empleo de equipos auxiliares.

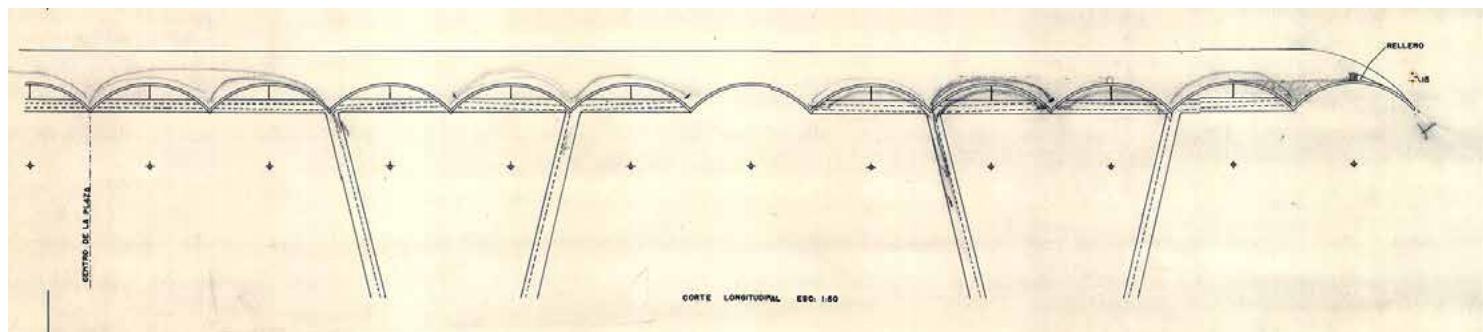
En efecto, el plano de la cubierta está formado por 198 láminas cilíndricas de 7 m de largo, 2,5 m de ancho, 5 cm de espesor y 60 cm de canto, llamadas aquí “membranas” por sus diseñadores (Rother, 1967). En su sentido más largo, cada una de las 22 filas de membranas alinea a 9 de ellas de tal manera que a la vista del espectador adquieren una longitud de 63 m continuos. Esto se logra a través de un recurso simple pero efectivo: el diseño de la que el propio Rother denominó “viga invisible”, que no es otra cosa que una pieza prismática de hormigón de la que cuelgan cada una de las láminas cilíndricas a las que abraza por el extradós de sus extremos.

A su vez, cada una de las 10 vigas invisibles alcanza una longitud de casi 55 m y tienen una altura de 70 cm contados desde el punto más elevado (o “cresta”) de las membranas. El borde superior de estas vigas es horizontal, el inferior es ondulado y se extiende hasta el valle que se forma entre las láminas, donde alcanza una altura total de 1,3 m. El ancho de las vigas es siempre de 40 cm, y en sentido transversal están conectadas por riostras de sección de 25 x 50 cm, separadas entre sí cada 7,5 m sin que en alguna parte entren en contacto con las membranas. En sus extremos, las vigas adoptan un perfil curvo, el cual evita que se asomen sobre el borde del plano de la cubierta (Figura 6).

Cada una de las vigas se apoya sobre un total de 8 columnas inclinadas dispuestas en forma de V, lo que acentúa la transparencia del edificio y permite al espectador entender el carácter liviano de la estructura.

Si bien la historiografía tradicional menciona que se trataba de estructuras de hormigón, Rother (1984) –en el libro sobre la obra de su padre– explica la manera en que, ante las dificultades propias del cálculo de este tipo de estructuras, fue necesario construir modelos a escala³

³ Por similares razones, empresas como Dywidag, o reconocidos ingenieros como Eduardo Torroja o Pier Luigi Nervi, apelaron con frecuencia al uso de modelos a escala como herramientas que permitían verificar estados tensionales y fenómenos de deformación (Moreno y Fernández-Llebrez, 2017).



Ⓐ Figura 7. Vista parcial del detalle del sistema de evacuación de aguas lluvias

Fuente: Plano original, fechado el 27 de julio de 1949. Archivo General de la Nación, Bogotá. Fondo Invías (Mapoteca 1, Planoteca 03, Bandeja 09, Ref. 171).

a fin de ser sometidos a carga, optando por usar ladrillos huecos como sistema de aligeramiento hasta lograr membranas de 5 cm de espesor.

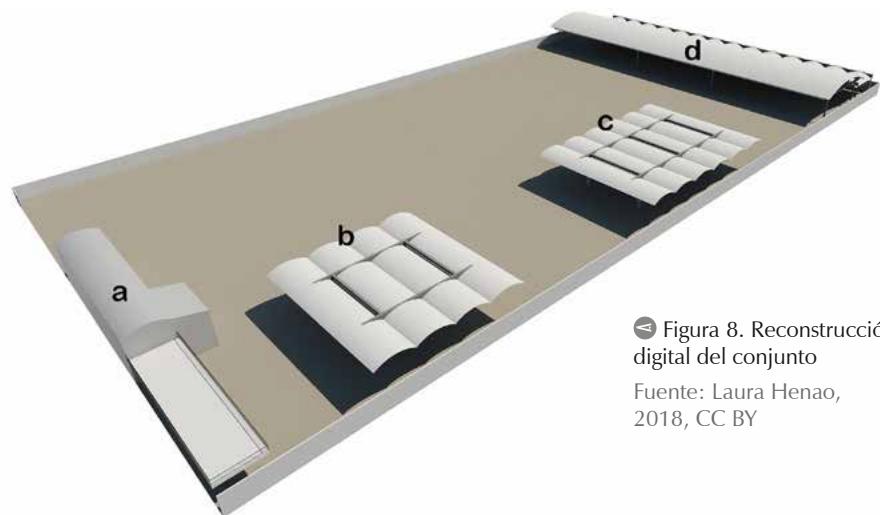
Por último, mención especial merece el sistema de desagüe diseñado para la cubierta. En vista de que el agua lluvia se acumulaba en los valles de las membranas se hizo necesario disponer de un sistema de bajantes tubulares adosados a las columnas en forma de V, no sin antes dar al acabado exterior de dichos valles una pendiente para conducir el agua hacia los imbornales. Pero como no todos los valles coincidían con el extremo superior de un bajante, canales horizontales atravesaban la parte inferior de las membranas sobre algunos de los ejes transversales, y alteraban la limpieza formal de la cara inferior de la cubierta (Figura 7).

El propio Rother (1967) mencionaba que el agua retenida en algunos de los valles de las membranas se podía evaporar libremente como un mecanismo para conservar un ambiente fresco dentro de la plaza; era tal su preocupación por el asunto, que en la cresta de las membranas de borde diseñó un cordón de 15 cm de altura, a fin de evitar el rebose de las aguas retenidas hacia el paramento exterior del edificio.

Con el paso de los años, las deficiencias en el sistema de evacuación de aguas lluvias han contribuido al deterioro del edificio, y han dado pie a patologías que a largo plazo afectan su integridad estructural.

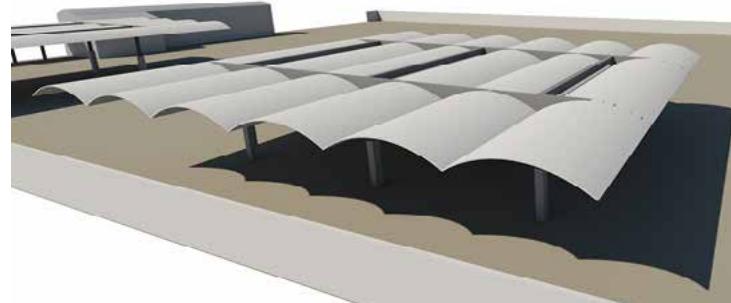
Estación de autobuses en Bogotá

Este edificio, diseñado en 1950 por los arquitectos Álvaro Ortega y Gabriel Solano, con cálculos estructurales de Guillermo González Zuleta, tenía como finalidad servir de estación terminal de los buses municipales de la empresa del tranvía, situada en la ciudad de Bogotá. El mismo equipo de profesionales ya había trabajado de



Ⓐ Figura 8. Reconstrucción digital del conjunto

Fuente: Laura Henao, 2018, CC BY



Ⓐ Figura 9. Reconstrucción digital del sistema de cubierta del edificio [c]

Fuente: Laura Henao, 2018, CC BY.

manera conjunta en el diseño del estadio de béisbol 11 de Noviembre (1947) en Cartagena de Indias, junto al arquitecto Jorge Gaitán Cortés, que posee la primera gran bóveda membrana de doble curvatura construida en Colombia (Vargas y Galindo, 2015).

El programa de este nuevo edificio demandaba varias edificaciones independientes (Figura 8) organizadas en torno a un gran patio de maniobras: [a] era un edificio de oficinas en dos pisos situado sobre la fachada principal, [b] era una superficie cubierta destinada al aprovisionamiento de combustible, [c] era el área de lavado y engrase, [d] albergaba los talleres de maquinaria y [e] cubría los baños y depósitos.

Todos los edificios se resolvieron mediante láminas cilíndricas de cubierta a partir de un módulo en planta cuadrada de 4,8 m de lado. El edificio [a] era de dos pisos y su planta rectangular se cubría con una membrana única de 4,8 m de ancho y 24 m de largo, de 80 cm de flecha, construida en cerámica armada y apoyada por sus lados más largos sobre los muros de carga



Figura 10.
Reconstrucción digital
del sistema de cubierta
del edificio [d], en primer
plano, y del edificio [e] a la
derecha

Fuente: Laura Henao,
2018, CC BY.

que constituían las fachadas. Los edificios [b] y [c] eran estructuras de doble altura con un sistema de cerramientos independiente del sistema de cubierta, caracterizado por un juego de membranas en serie (4 en el primer edificio, 6 en el segundo) de 4,8 m de ancho y 21,2 m de longitud (correspondiente a 19,2 m más dos voladizos extremos de 1 m de largo cada uno).

Si bien en este proyecto las membranas se organizaban de manera similar a las del Mercado de Girardot, aquí las láminas cilíndricas no se situaban por debajo de las vigas invisibles, sino que quedaban confinadas entre dos de ellas, paralelas y separadas entre sí por una distancia de 9,6 m entre ejes. A su vez, viguetas transversales (2 en el primer edificio y 3 en el segundo), distanciadas por 4,8 m, arriostraban ambas vigas sin tener contacto con las membranas para dejar libres los valles, en donde se recogían las aguas mediante bajantes adosados a los pilares de planta circular levantados sobre pedestales de sección cuadrada (Figura 9). En los casos en que el valle no coincidía con una columna sobre la cual adosar el bajante pluvial, se instalaba un imbornal del que se desprendía un tubo de fibro-cemento oculto tras la cara interior de la viga invisible, que se unía con el bajante en el eje estructural siguiente.

Por su parte, la cubierta más grande era la que cubría el área de los talleres, o edificio [d], y estaba formada por 3 bóvedas alineadas de 24 m de longitud y 16 m de ancho cada una, sostenidas por arcos atirantados, que a su vez se apoyaban en columnas de sección circular de 30 cm de diámetro. Las tres bóvedas, iguales y continuas, tenían una flecha de 2 m de altura. Junto a ellas, pero en sentido perpendicular, se disponía de un conjunto de 14 membranas de menor altura que cubrían el edificio [e], de 4,8 m de ancho y 8 m de longitud, confinadas por sus testeros en vigas de borde apoyadas sobre columnas (Figura 10). En todos los casos, la impermeabilización se lograba, según los autores del proyecto, con un enlucido a base de cal en la cara superior de las

bóvedas y descarga directa de las aguas sobre el pavimento.

En este proyecto, las luces transversales eran modestas y estaban todas perfectamente moduladas, lo que permitió usar formaletas móviles (Villazón, 2001), livianas y baratas, de un manejo sencillo y económico. La construcción de las membranas se hizo de tal manera que en las juntas (de 10 y 12 cm de espesor), entre los ladrillos (de 38 x 23 cm), se dispuso la armadura formada por barras de acero de 3/8" para que pudieran trabajar cuando el hormigón había endurecido totalmente. En los valles de las membranas los empujes se neutralizaban de tal manera que en ese punto se reforzaban con 4 barras de 1/4" embebidas en hormigón.

El edificio no solo llegó a ser incluido en la muestra que Hitchcock (1955) hiciera para el Museo de Arte Moderno de Nueva York en 1955 sino que sirvió de ejemplo para ilustrar artículos como el que se publicó en la revista *Architectural Forum* (*Shell Concrete Today*, 1954), en el que se reseñaban importantes proyectos de todo el mundo construidos mediante estructuras laminares, a manera de resumen del evento académico que sobre el tema había organizado el Massachusetts Institute of Technology (MIT), en Boston, en junio de 1954.

Lamentablemente, el edificio fue demolido en su totalidad a finales de la década de los setenta, pero su influencia fue notable: un artículo sin firma de la revista *Proa* (número 50 de agosto de 1951) registraba fotografías del proyecto terminado y estaba precedido de una nota editorial titulada "El binomio arquitecto-ingeniero", donde se instaba a ambos profesionales a una mayor interlocución en torno a los proyectos.

Sede de Volkswagen

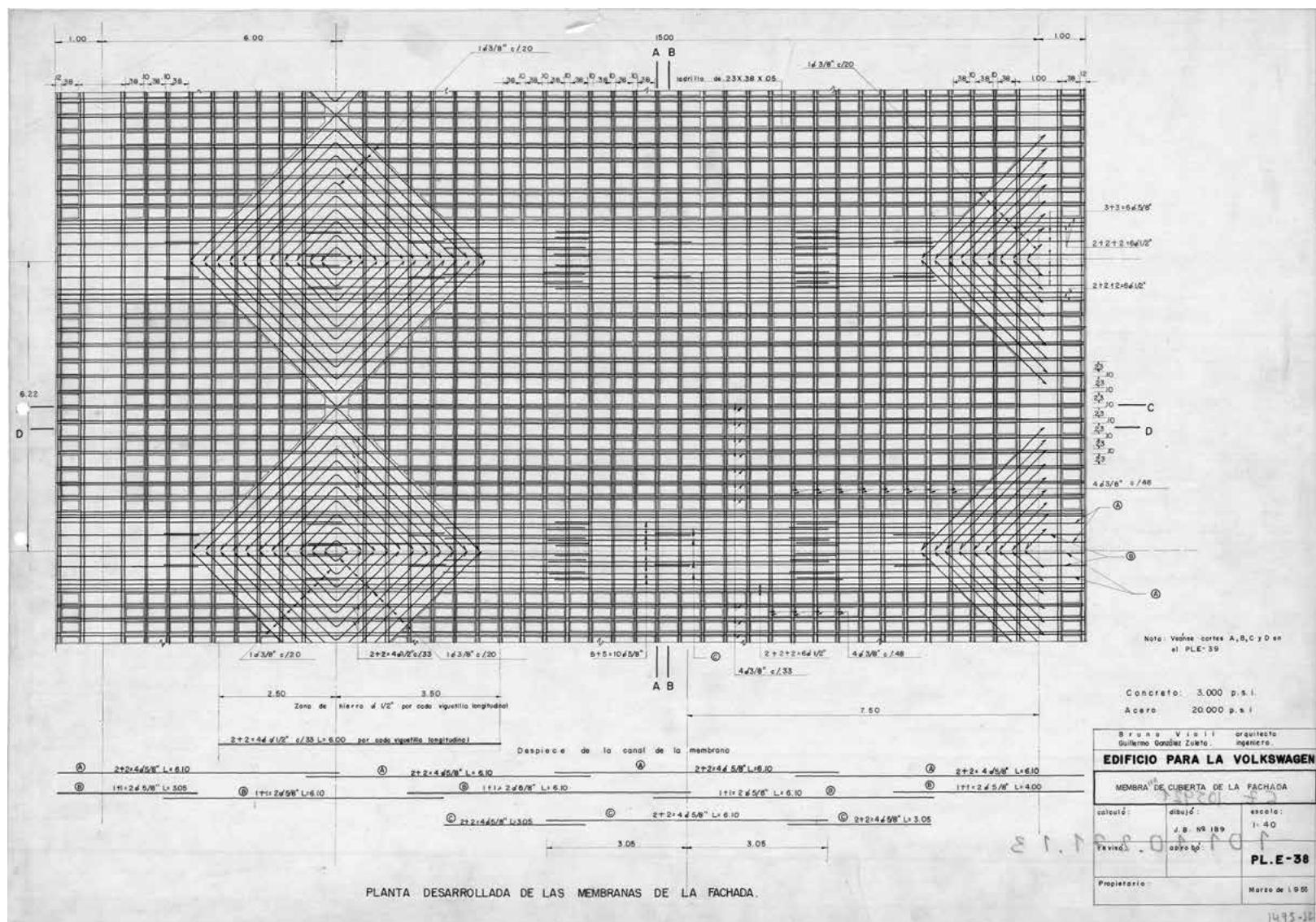
Diseñado por el arquitecto italiano Bruno Violi, los cálculos estructurales de las membranas de cubierta fueron realizados por Guillermo González Zuleta⁴. Situada su fachada principal sobre la importante calle 26 en Bogotá (vía que comunica de manera rápida el centro de la ciudad con el aeropuerto), la edificación ocupaba un área casi equivalente a una manzana y estaba destinada a alojar varias funciones para la casa automotriz Volkswagen. Pese a las irregularidades del predio,

⁴ Los planos de anteproyecto firmados por B. Violi, que se encuentran en el Archivo de Bogotá, están fechados en noviembre de 1954, y los planos constructivos con detalles de los refuerzos elaborados en la oficina de González Zuleta datan de marzo de 1955, carpetas 101-10-271 y 101-10-272. Si además se tiene en cuenta que el número 93 de la revista *Proa* de octubre de 1955 publicó un artículo con fotos del edificio en su etapa final de construcción, resulta claro el breve tiempo invertido en los diseños de este.



Figura 11. Reconstrucción digital del sistema estructural y de cubierta del edificio

Fuente: Laura Henao, 2018, CC BY



la estructura se organizaba sobre un enmallado que se acercaba a un módulo de 6 m y que era igual al ancho de las láminas cilíndricas más grandes de la cubierta.

El cuerpo principal [a] (Figura 11), sobre la calle 26, estaba formado por una estructura de dos niveles, la primera de ellas de doble altura: 5,35 m, con un *mezzanine* en la parte frontal; la segunda, de 3,2 m de altura, cubierta por un conjunto de 6 membranas del tipo segmento de

circunferencia de 23 m de longitud, 5,93 m de ancho y un canto de 1,05 m.

Cada una de estas membranas principales se apoyaba en tres arcos paralelos de 40 cm de ancho atirantados mediante una viga horizontal de 15 cm de altura, de tal manera que formaban igual número de ejes separados entre sí por distancias de 6 y 15 m respectivamente. En cada extremo las membranas tenían un voladizo de 1 m. Su construcción se llevó a cabo siguiendo los

Figura 12. Detalle de armaduras de las membranas de fachada

Fuente: Archivo de Bogotá, Plano 101.10.271.13, Fondo Guillermo González Zuleta.

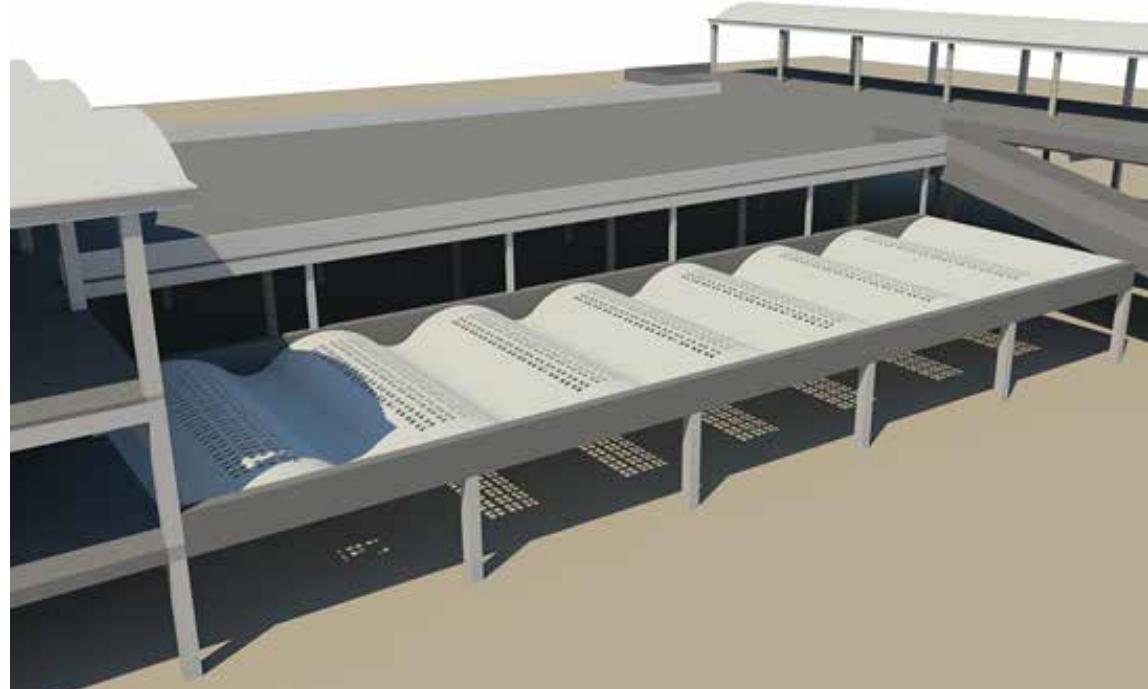


Figura 13. Reconstrucción digital del sistema de membranas descolgadas

Fuente: Laura Henao, 2018, CC BY.

dictados de experiencias previas: ladrillos de 5 cm de espesor y 23 x 38 cm de superficie, quedaban separados entre sí por viguetillas de 10 cm de ancho que se reforzaban con 4 barras de 3/8". En las áreas próximas a los valles toda la membrana era en hormigón armado con barras de 1/2" en la proximidad de las piezas cerámicas, y de 5/8" en el punto de inflexión de las membranas. Una singular disposición de las armaduras se presentaba en el área de las membranas situada por encima de los arcos de apoyo, y constituía un refuerzo suplementario de planta cuadrada con barras de 3/8" distanciadas entre sí cada 20 cm (Figura 12).

La necesidad de contar con un sistema de desague óptimo demandó que las membranas volaran 50 cm por fuera del plano de las fachadas anterior y posterior, para permitir el tránsito libre de los bajantes adosados a ellas hasta el nivel del piso.

Adicionalmente, una placa de hormigón armado se prolongaba hacia la parte posterior del predio, sirviendo simultáneamente como cubierta de las áreas destinadas al mantenimiento de los automóviles y como superficie de estacionamiento para otros a donde se llegaba a través una rampa. Por la cara inferior de la placa, apoyada sobre columnas de sección circular separadas entre sí por una distancia de 12 m, se apreciaban claramente vigas prismáticas dispuestas en dos sentidos que conformaban los pórticos estructurales y que terminaban en voladizos a cada lado de 3,5 m de longitud.

De gran interés es la manera en que dos áreas rectangulares, o edificio [b], quedaban cubiertas por sendos juegos de membranas. En una de ellas había 9 láminas sinusoidales y en la otra 8, todas de 8,8 m de longitud y 4 m de ancho, con sus extremos longitudinales confinados en una viga de borde. En tanto que un extremo de esta viga

se apoyaba sobre el muro medianero, el otro se suspendía, mediante columnas de hormigón, del voladizo de la placa de hormigón más alta, formando entre ambas superficies una abertura cenital por donde circulaba el aire (Figura 13).

Con el fin de iluminar aún más el espacio del primer piso, las membranas enmarcadas en la estructura medianamente suspendida se construyeron con piezas de isolux dispuestas a la manera de los ladrillos estructurales, siguiendo el modelo propuesto por Rother en las membranas centrales del mercado de Girardot. El desagüe de esta serie de membranas se logró mediante bajantes en vertical situados en el plano posterior de tal manera que el agua era conducida a ellos a través de una suave pendiente hecha sobre la superficie de los valles.

Por último, el edificio [c], destinado también a almacenar los automóviles, cubría su segundo piso con una serie de 8 membranas alineadas que remataban contra un tanque elevado de agua, cada una de 6 m de longitud y 5,93 m de ancho. Como en las anteriores, poseían solo 5 cm de espesor.

Discusión

Una mirada comparativa a los tres casos estudiados se presenta en la Tabla 1, a partir de los aspectos dimensionales descritos.

El análisis de los datos recogidos en la Tabla 1 permite conocer varios aspectos de naturaleza constructiva:

- El valor de los radios de curvatura de las láminas cilíndricas se desempeñaba preferiblemente en rangos que permitieran un replanteo y trazado sencillo (entre 2 y 4,5 m en la mayoría de los casos).

[1] Proyecto	MERCADO DE GIRARDOT	ESTACIÓN DE AUTOBUSES	SEDE DE VOLKSWAGEN
[2] Periodo de construcción	1946-1954	1950-1951	1954-1955
[3] Área cubierta	3465 m ²	2130,8 m ²	1630,22 m ²
[4] Radio (r)	1,68 m	Edificio [a] 4,5 m Edificio [b] 4,5 m Edificio [c] 4,5 m Edificio [d] 16 m Edificio [e] 4,5 m	Edificio [a] 4,9 m Edificio [b] 2 m Edificio [c] 4,9 m
[5] Ancho (a)	2,5 m	Edificio [a] 4,8 m Edificio [b] 4,8 m Edificio [c] 4,8 m Edificio [d] 16 m Edificio [e] 4,8 m	Edificio [a] 5,93 m Edificio [b] 4 m Edificio [c] 5,93 m
[6] Espesor (e)	5 cm	5 cm en todos los casos Edificio [a] 24 m Edificio [b] 21,2 m	5 cm en todos los casos Edificio [a] 23 m
[7] Longitud (l)	7 m	Edificio [c] 21,2 m Edificio [d] 24 m Edificio [e] 8 m	Edificio [b] 8,8 m Edificio [c] 6 m
[8] Canto (f)	60 cm	Edificio [a] 80 cm Edificio [b] 80 cm Edificio [c] 80 cm Edificio [d] 200 cm Edificio [e] 80 cm	Edificio [a] 105 cm Edificio [b] 80 cm Edificio [c] 80 cm
[9] Relación r/l	0,24	Edificio [a] 0,19 Edificio [b] 0,21 Edificio [c] 0,21 Edificio [d] 0,67 Edificio [e] 0,56	Edificio [a] 0,21 Edificio [b] 0,23 Edificio [c] 0,82
[10] Material constructivo	Cerámica armada	Cerámica armada	Cerámica armada

① Tabla 1. Atributos dimensionales de las láminas cilíndricas de los edificios objeto de estudio.

Fuente: elaboración propia, 2018.

- El ancho de las membranas (sin el recurso del atirantamiento) oscilaba entre los 4,8 y los 6 m.
- El espesor en todos los casos, de 5 cm, casi con seguridad estaba determinado por el tamaño de los ladrillos con que se construyeron.
- La longitud era una de las virtudes mejor aprovechadas de las láminas cilíndricas (hasta de 24 m).
- El canto de las láminas cilíndricas superaba el de las vigas prismáticas tradicionales, con una mínima inversión de materiales, poca masa y bajo peso propio.
- En prácticamente todos los casos, los arquitectos e ingenieros colombianos optaron por la construcción de láminas cilíndricas largas ($r/L < 0,6$).

Por su parte, a partir de la contextualización de los casos aquí estudiados, es posible deducir que, en el ámbito local, la adopción de las for-

mas de la denominada arquitectura moderna y su lenguaje internacional implicó también la asimilación de las técnicas que le permitían convertirse en una realidad material. Esto demandó, necesariamente, un proceso de experimentación constructiva que de manera progresiva fue superando limitaciones dimensionales de las láminas cilíndricas.

Dicho proceso, de carácter experimental, no pudo hacerse sin consideración de los métodos de análisis estructural desarrollados desde la ingeniería civil de las primeras décadas del siglo XX; y si bien se puede advertir de parte de los profesionales de la construcción un alto grado de intuición estructural, esto no puede ser considerado como la única herramienta para el logro de las nuevas formas construidas. Se ha demostrado que en el país, la enseñanza de los métodos numéricos de cálculo estuvo tempranamente al



Figura 14. Vista actual de la tribuna principal del Hipódromo de Techo

Fuente: elaboración propia, 2018, CC BY.

servicio de los procesos de concepción y ejecución de ingenieros y arquitectos colombianos.

Se observa también que, como parte de esa nueva conceptualización tecnológica, la noción de “módulo” adquirió un valor que iba más allá de lo estético para convertirse en un instrumento de racionalización del proceso constructivo: la lectura de las mallas estructurales en que se inscriben los proyectos analizados así lo demuestra, como también la estrecha relación entre las dimensiones de los ejes estructurales y sus múltiples y submúltiples con el tamaño de las membranas de cubierta; a su vez, estas últimas, condicionadas por el tamaño de los encofrados que debían ser reutilizados.

Es interesante señalar la importancia que fue adquiriendo el concepto de “peso propio” del edificio y el intento de reducirlo no solo en aras de su apariencia formal (asociada a los conceptos de ligereza y transparencia), sino como un aspecto mecánico que se traducía en un abaratamiento del costo de la edificación en general. Esa búsqueda permitió, en el caso colombiano, la adopción de la técnica de la cerámica armada como principio en la ejecución de láminas cilíndricas, anticipándose a otras experiencias latinoamericanas en la materia y, de manera particular, a la de Eladio Dieste en el sur del continente.

Por último, es importante destacar que en vista de que lo utilitario fue el factor dominante en el programa de los casos estudiados, y que ninguno de ellos tuvo el carácter de edificio-manifiesto o paradigma tecnológico, se han considerado desde la historiografía de la arquitectura colombiana como eslabones de tránsito en el proceso de innovación tecnológica, que abrieron la senda a edificaciones de mayor impacto nacional.

Esto último ha hecho que no se ponga la debida atención a proyectos de menor escala que adoptaron, entre otras soluciones estructurales innovadoras para su época, las láminas cilíndricas como sistema de cubierta. Así, no debe desconocerse la estrecha relación entre valores espaciales y técnicos en proyectos como el que fuera sede del Cinva, construido en 1953 en predios de la Universidad Nacional de Colombia, cubierto con una bóveda laminar de perfil elíptico construida por la firma de Alberto Manrique Martín e hijos, siguiendo los diseños de Ritter y Mejía, con cálculos estructurales del ingeniero Carlos Valencia.

Importante también fue el proyecto del arquitecto Álvaro Hermida junto al ingeniero Guillermo González Zuleta para el Hipódromo de Techo (1953-1955), en donde la cubierta de la tribuna principal está conformada por 12 láminas cilíndricas de hormigón dispuestas paralelamente sobre el graderío, que alcanzan 66 m de longitud y $\frac{3}{4}$ (1,875 cm) de espesor, confinadas entre una serie de pórticos que distan entre sí 10 m (Figura 14).

Más allá de la capital, proyectos como el edificio para la nueva plaza de mercado de Buga (1960), del arquitecto local Diego Salcedo, aprovecharon las ventajas climáticas de las cubiertas de láminas cilíndricas, introduciendo en dicha población un lenguaje moderno con una cuidadosa calidad constructiva expresada en la calidad de los encofrados, la iluminación cenital y la ventilación cruzada (Figura 15).

Conclusiones

El trabajo que aquí se ha descrito y analizado demuestra la estrecha relación entre forma arquitectónica, sistema estructural y racionalidad



Figura 15. Vista actual del edificio de la plaza de mercado de Buga

Fuente: elaboración propia, 2018, CC BY.

constructiva presente en algunos proyectos llevados a cabo por arquitectos colombianos en el inicio de la segunda mitad del siglo XX, y que se expresa en casos como el de aquellos cuyas cubiertas se concibieron a partir de vigas laminares de perfil circular.

Gracias a un estrecho trabajo colaborativo entre arquitectos e ingenieros se construyeron edificios en los que fue posible llevar a cabo un ejercicio de experimentación técnica a partir de métodos de cálculo y análisis estructural simplificado, sumados a un alto nivel de intuición acerca de su comportamiento mecánico, empleando materiales que aseguraban un fácil proceso de ejecución a bajo costo y en plazos de tiempo relativamente cortos.

Los resultados formales, tanto en el contexto colombiano como en el latinoamericano, son destacables. Además del juego dimensional logrado (ancho, luz, espesor), es importante reconocer la riqueza espacial alcanzada, de tal manera que los cerramientos pierden aquí el protagonismo y la importancia que llegaron a tener en la arquitectura precedente, dejando en la estructura ya no solo la función portante sino también el mandato sobre la composición general de la edificación. Adicionalmente, se lograba una sintonía con las condiciones climáticas del sitio (muy relevante en el caso del mercado de Girardot), así como con

las determinantes ambientales impuestas por el uso (talleres vehiculares, áreas de almacenamiento).

Una vez avaladas las ventajas del sistema estructural, su aplicación se hizo extensiva a numerosos proyectos de muy diversas escalas, aunque sus más significativos ejemplos puedan situarse en edificios de corte utilitario que no han sido suficientemente estudiados pese a ser paradigmáticos en sus procesos de concepción y construcción. Y si bien en el contexto colombiano las superficies de doble curvatura o cascarones de hormigón del tipo paraboloide hiperbólico no llegaron a ser tan usados como en México, ello probablemente tuvo su origen en limitaciones más de tipo económico y cultural, que en el manejo y control de sus aspectos técnicos.

Las lecciones hacia el futuro cobran entonces importancia en un momento en el que se hace cada vez más frecuente un fenómeno de disociación de saberes en el ámbito de la arquitectura y una fractura entre el diseño y la construcción. Igualmente, ellas son útiles en la actualidad, cuando los recursos informáticos, especialmente aquellos relacionados con el modelado 3D y la impresión digital, permiten retomar el uso proyectual de las estructuras laminares con la participación de nuevos materiales diferentes al hormigón o la cerámica armada, y en donde el ejercicio profesional tiene cada vez más un carácter interdisciplinario.

Referencias

- Arango, S. (1989). *Historia de la arquitectura en Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Archivo de Bogotá (1955, marzo). Edificio para la Volkswagen [Plano estructural]. Fondo Guillermo González Zuleta (Plano 101.10.271.13. PL.E-38).
- Archivo General de la Nación (1949, julio 27). *Mercado de Girardot* [Planimetría, Corte longitudinal]. Fondo INVIA (Mapoteca 1, Planoteca 03, Bandeja 09, Ref. 171). Bogotá.
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (1952). *Design of Cylindrical Concrete Shell Roofs. Manual of Engineering Practice*, 31. New York: ASCE.
- Billington, D. (1965). *Thin Shell Concrete Structures*. New York: McGraw-Hill.
- Billington, D. (2013). *La torre y el puente. El nuevo arte de la ingeniería estructural*. Madrid: Cinter.
- Bonnelly, R. (1942). Bóvedas membranas. *Ingiería y Arquitectura*, 40, 18-21.
- Bonnelly, R. (1945). Bóvedas membranas. *Ingiería y Arquitectura*, 62, 3-6.
- Bóvedas membrana (1950). *Proa*, 50, 14-18.
- Buonopane, S. y Osanov, M. (2015). Evaluation of August Komendant's Structural Design of the shells of The Kimbel Art Museum. En B. Bowen, D. Friedman, T. Leslie y J. Ochsendorf (eds.), *Proceedings of the 5th International Congress on Construction History* (vol. II, pp. 283-290). Chicago: Construction History Society of America.
- Cabeza, J. M. y Almodóvar, J. M. (1996). Las bóvedas de cerámica armada en la obra de Eladio Dieste. Análisis y posibilidades de adaptación a las condiciones constructivas españolas. En: A. De las Casas, S. Huerta y E. Rabasa (eds.), *Actas del primer congreso nacional de historia de la construcción* (pp. 135-142). Madrid: Instituto Juan de Herrera y Cehopu.
- Candela, F. (1951). Hacia una nueva filosofía de las estructuras. En *Memoria del congreso científico mexicano* (vol. V, pp. 87-111). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cassinello, P., Schlaich, M. y Torroja, J. A. (2010). Félix Candela. *In memoriam* (1910-1917). From thin concrete shells to the 21st century's lightweight structures. *Informes de la Construcción*, 62(519), 5-26. Doi: <https://doi.org/10.3989/ic.10.040>
- Cornelissen, H. (1944). Bóvedas membranas de sección circular. *Ingiería y Arquitectura*, 59, 5-10.
- Devia, M. (2006). *Leopoldo Rother en la ciudad universitaria*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Engel, H. (1970). *Sistemas de estructuras*. Madrid: Blume.
- Escobar, A. y Cárdenas, M. (2006). Hitos y protagonistas. En Asociación colombiana de productores de concreto (ed.), *La construcción del concreto en Colombia* (pp. 44-132). Bogotá: Panamericana.
- García, R. (2017). Láminas cilíndricas en España. El reinicio de la construcción laminar en los años de la posguerra. En S. Huerta, P. Fuentes y I. Gil (eds.), *Actas del décimo congreso nacional y segundo congreso internacional hispanoamericano de historia de la construcción* (vol. II, pp. 669-678). Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Recuperado de http://oa.upm.es/49287/1/INVE_MEM_2017_268257.pdf
- García, R. y Osuna, R. (2009). Cubiertas laminares de hormigón tras la Segunda Guerra Mundial. Soluciones en edificios industriales. En S. Huerta, R. Marín, R. Soler y A. Zaragozá (eds.), *Actas del sexto congreso nacional de historia de la construcción* (vol. II, pp. 559-569.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Recuperado de <http://oa.upm.es/45162/1/2009%20Valencia%20Laminares%20industria.pdf>
- Hitchcock, H. R. (1955). *Latin American Architecture since 1945*. New York: MOMA.
- Johansen, K. W. (1944). Skallkonstruktion paa Radiohuset. *Bygningsstatiske Meddelelser*, (15), 1-26.
- Lundgren, H. (1949). *Cylindrical Shells*. Vol. 1: *Cylindrical Roofs*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Martínez, M. y Echeverría, E. (2017). Las bóvedas cilíndricas y su evolución hacia las cáscaras cilíndricas largas de cubierta de Félix Candela. Análisis geométrico y mecánico. *EGA Expresión gráfica arquitectónica*, 22(30), 160-169. Doi: <https://doi.org/10.4995/ega.2017.7846>
- May, R. (2012). Shell Wars: Franz Dishinger and Ulrich Finsterwalder. En R. Carvais, A. Guillermé, V. Nègre y J. Sakarovitch (eds.), *Nuts & Bolts of Construction History* (vol. III, pp. 133-141). Paris: Picard.
- May, R. (2015). Shell Sellers. The International Dissemination of the Zeiss-Dywidag System, 1923-1939. En B. Bowen, D. Friedman, T. Leslie y J. Ochsendorf (eds.), *Proceedings of the 5th International Congress on Construction History* (vol. II, pp. 557-564). Chicago: Construction History Society of America.
- Morales, M. (2009). Cubiertas formadas por paraboloides hiperbólicos: ventajas en su funcionamiento estructural y en su construcción. En S. Huerta, R. Marín, R. Soler y A. Zaragozá (eds.), *Actas del sexto congreso nacional de historia de la construcción* (vol. II, pp. 939-945.). Madrid: Instituto Juan de Herrera y CEHOPU. Recuperado de http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC6_%20%2888%29.pdf
- Moreno, P. y Fernández-Llebrez, J. (2017). Aportaciones de modelos físicos al desarrollo y construcción de estructuras laminares en el s. XX. En S. Huerta, P. Fuentes e I. Gil (eds.), *Actas del décimo congreso nacional y segundo congreso internacional hispanoamericano de historia de la construcción* (vol. II, pp. 1103-1112). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Niño, C. (2003). *Arquitectura y estado: contexto y significado de las construcciones del*
- Ministerio de Obras Públicas, Colombia, 1905-1960. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Picon, A. (1997). *L'art de l'ingénieur*. París: Centre Georges Pompidou.
- Pinilla, M. (2017). *De Prusia a la cuenca del río Magdalena. La tradición clásica fecundada por el trópico en la arquitectura de Leopoldo Rother*. Tesis doctoral. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Pucher, A. (1943a). Sobre la función de tensión en las cúpulas delgadas curvadas de modo cualquiera (parte I). *Ingeniería y Arquitectura*, 50(V), 50-59.
- Pucher, A. (1943b). Sobre la función de tensión en las cúpulas delgadas curvadas de modo cualquiera (parte II). *Ingeniería y Arquitectura*, 53-54(V), 25-30.
- Pucher, A. (1958). *Curso de hormigón armado*. Buenos Aires: El Ateneo.
- Rother, H. (1984). *Arquitecto Leopoldo Rother, Vida y obra*. Bogotá: Escala.
- Rother, L. (1967). Plaza de mercado de Girardot. *Escala*, 20, 4-6.
- Salvadori, M. y Heller, R. (1966). *Estructuras para arquitectos*. Buenos Aires: Ediciones La Isla.
- Shell Concrete Today (1954). *Architectural Forum*, 101(1), 157-166.
- Stegmann, K. (2009). Early concrete construction in Germany – A review with special regard to the building company Dyckerhoff & Widmann. En K.E. Kurrer, W. Lorenz y V. Wetzk (eds.), *Proceedings of the Third International Congress on Construction History* (pp. 1371-1378). Cottbus: Brandenburg University of Technology.
- Torroja, E. (1936). La cubierta laminar del frontón Recoletos. Manuscrito original perteneciente al Archivo Torroja depositado en el CEHOPU, Madrid. Recuperado de http://www.cehopu.cedex.es/img/bibliotecaD/Cubierta_laminar_fronton_recoletos
- Torroja, E. (1957). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: Instituto de la Construcción y el Cemento, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Vargas, H. y Galindo, J. (2015). The construction of thin concrete shell roofs in Colombia during the first half of the 20th century: The works of the Guillermo González Zuleta (1916-1995). En T. Bowen, D. Friedman, T. Leslie y J. Ochsendorf (eds.), *Proceedings of the 5th International Congress on Construction History* (vol. III, pp. 525-534). Chicago: Construction History Society of America.
- Villazón, R. (2001). Álvaro Ortega: la arquitectura como acto técnico. *Arquitecturas*, 7(1), 44-45.

