

VIGAS LAMINARES COMO CUBIERTAS EN BÓVEDAS DE CONCRETO
REFORZADO, EXPERIENCIAS EN COLOMBIA.

Trabajo de Grado

Mario Alejandro Puyo Mayorga
Ing. Civil

Ing. Nohra Beatriz Gómez Galindo
Director del Trabajo de Grado

Bogotá, 2016

VIGAS LAMINARES COMO CUBIERTAS EN BÓVEDAS DE CONCRETO REFORZADO, EXPERIENCIAS EN COLOMBIA.

LAMINAR BEAMS AS ROOF ON VAULTS OF REINFORCED CONCRETE, EXPERIENCES IN COLOMBIA.

Mario Alejandro Puyo Mayorga¹

RESUMEN

Para la construcción de cubiertas en concreto, el diseñador puede recurrir a las bóvedas de empuje, sistema basado en arcos consecutivo apoyado en el sentido de menor luz y requiriendo un apoyo lateral capaz de resistir las cargas verticales y el empuje horizontal. Otra alternativa para los diseñadores estructurales y arquitectónicos, es la implementación de las membranas o bóvedas tipo viga laminar, elementos delgados que trabajan a flexión apoyadas en el sentido de mayor luz, empleando espesores de dos a diez centímetros en membranas nervadas.

En 1925 se desarrolló la primera cúpula en membrana de concreto en Jena Alemania, posteriormente en 1945 el Ing. Guillermo González, diseñó la primera membrana nervada en Colombia. A la fecha muchos profesionales desconocen el comportamiento de las membranas en concreto e interpretan que estas estructuras se comportan como arcos de empuje, motivo por el cual es preciso sintetizar sus diferencias y las experiencias desarrolladas en Colombia.

Palabras Claves: Concreto Reforzado; Ingeniería Estructural; Bóvedas; Cubierta en Concreto; Diseño Estructural; Vigas Laminares; Bóveda autoportante.

ABSTRACT

For the building of concrete roof, the designer might use to thrust vaults, system based on consecutive arches supported on the orientation of less length and requires a lateral support capable of withstanding the vertical loads and the horizontal thrust; other alternative, for structural and architectural designers, it is

¹ Ingeniero Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, alejo.puyo.m@outlook.com

the implementation of the membranes or laminar beams, thin elements that work to flexion supported in the direction of greater length, using thicknesses from two to ten centimeters in membranes with nerves.

In 1925, the first dome in concrete membrane was developed in Jena Germany, later in 1945 the engineer Guillermo González who design the first membrane with nerves in Colombia. To date, many professionals do not know the behavior of reinforces concrete membranes and they interpret these structures behave as thrust arches, which is the reason because it is necessary to synthesize their differences and the experiences developed in Colombia.

Keywords: Reinforced Concrete; Structural Engineering; Vaults; Roof on Concrete; Structural Design; Laminar Beams; Self-supporting Vaults.

INTRODUCCIÓN

Dada la necesidad del hombre de un medio para su protección y refugio de los factores ambientales, así como su deseo de habitar un espacio amplio y con sensación de confort; se desarrolló durante varios siglos como una de las soluciones la implementación de cubiertas tipo bóveda y cúpula en sus edificaciones.

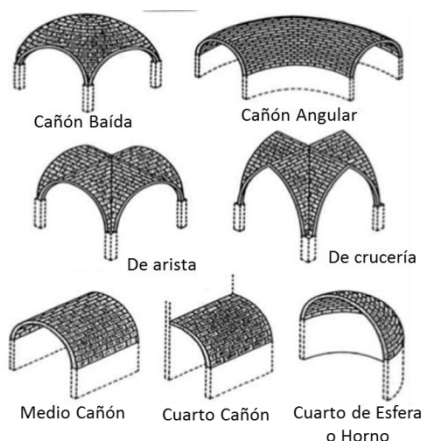


Imagen 1. Bóveda de Empuje, Tipología.

Fuente: Luis Enrique Muñoz, Obras de arte Medieval.

En gran parte de la historia de la arquitectura e ingeniería, el arco medio cañón fue el medio principal para la construcción de cubiertas arqueadas, denominadas bóvedas de empuje, como se observa en los templos y teatros romanos compuestos por arcos de empuje a medio cañón; con la caída del imperio romano se sustituye la bóveda medio cañón por la bóveda de crucería, imagen 1, en el renacimiento se vuelve a implementar las bóvedas de arco medio cañón, entre las obras más representativas encontramos las cúpulas de empuje de la Basílica de Santa Sofía en Constantinopla, Basílica de San Pedro en Roma, entre otras.

En 1925 los ingenieros F. Dischinger y U. Finsterwalder desarrollan por primera vez el concepto de bóveda en viga laminar o membrana delgada en la construcción de la cúpula del

planetario Zeiss en Jena, Alemania (1).

Las bóvedas de membrana delgada salvan grandes luces con pequeños volúmenes de material en su estructura así como en sus elementos de apoyo, comparados con los consumos de las bóvedas de empuje.

Sin embargo, 90 años después el comportamiento de las bóvedas tipo viga laminadas ó *Cylindrical Concrete Shell Roof* es desconocido por muchos ingenieros, quienes cometen el error de analizarlas como bóvedas de empuje, desconociendo las diferencias de los dos sistemas, evaluando inadecuadamente su comportamiento estructural y considerando como “adecuada” la demolición de la estructura.

El presente artículo tiene como propósito precisar el comportamiento estructural de una bóveda de empuje y una estructura laminar, establecer sus características, diferencias así como destacar algunas experiencias de bóvedas laminadas en Colombia, principalmente las obras del Ing. Guillermo González Zuleta.

1. ENFOQUE CONCEPTUAL DE LAS BÓVEDAS EN CONCRETO

1.1. BÓVEDAS DE EMPUJE

Las bóvedas de empuje pueden ser simplificadas como una serie de arcos

de directriz semicircular o en medio cañón, apoyados de forma continua, trabajando como elementos principalmente a compresión, sometidas a cargas verticales y un empuje horizontal sobre sus apoyos, como se observa en la imagen 02, efectos que de no ser controlados en el diseño permitirán el desplazamiento de los apoyos, representando el colapso de la estructura.

Las bóvedas de empuje requieren de un apoyo continuo, motivo por el cual requieren apoyarse sobre muros o vigas de gran espesor, aumentando las secciones de la estructura misma.

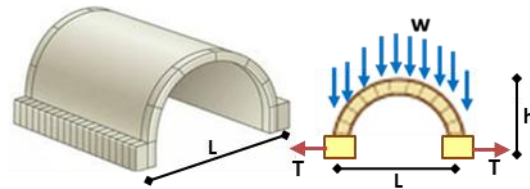


Imagen 2. Diagrama de Cuerpo Libre, Sección transversal Bóveda de Empuje.

Fuente: Elaboración Propia

El diseñador podrá sugerir la implementación de tensores entre apoyo que controlen el desplazamiento horizontal del mismo arco y garanticen su estabilidad. Los apoyos de este tipo de estructura se encuentran sometidos a flexiones biaxiales que demandan grandes dimensiones.

De acuerdo, al diagrama de cuerpo libre de la sección transversal presentado en la imagen 02, el momento flector en el centro de la luz del arco está definido como:

$$M_{max} = \frac{wL^2}{8} - Th \quad \langle Ec. 01 \rangle$$

Para el cual w es la carga vertical uniformemente distribuida, L es la luz entre apoyos del arco, T es el empuje horizontal y h es el diferencial de altura entre el centro de luz y los apoyos del arco (2).

1.2. BÓVEDA TIPO VIGA LAMINAR O MEMBRANA

Las bóvedas tipo viga laminar, también denominadas membranas o cascaras delgadas, son elementos en concreto reforzado sometidos a flexión y cortante, salvando la mayor luz entre sus apoyos, al contrario de las bóvedas de empuje. Su geometría consiste en superficies curvas (como por ejemplo tipo arco, arco plegado, arcos dobles paraboloides, entre otras), de pequeño espesor que garantice una resistencia al pandeo y sin verse afectada por las tensiones de flexión, como se observa en la imagen 03. Estas membranas son construidas monolíticamente en toda su extensión, permitiendo que sean elementos a flexión y su comportamiento se compare con el de las vigas. (3)

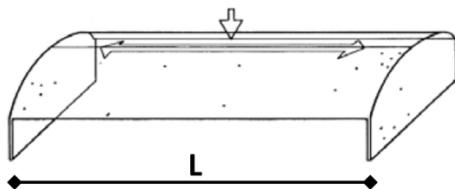


Imagen 3. Esquema General Bóveda en Viga Laminar

Fuente: Requena Ruiz, Ignacio (3)

Al comparar las membrana con una viga, se estable un símil entre el diferencial de altura de las crestas y valles de la bóveda, y la altura de la viga donde en elementos simplemente apoyados la deflexión será controlada con una altura mayor a $L/20$.

No se permite la construcción de elementos que restrinjan la membrana y modifiquen su comportamiento estructural. (4)

Con el fin de evaluarse el desempeño de la bóveda, se deberá determinar las zonas de tensiones superficiales por compresión y tracción, verificar la deflexión, así como los esfuerzos de corte en los apoyos. El área de refuerzo solicitado es mínimo y puede ser suministrado con mallas en grafiles.

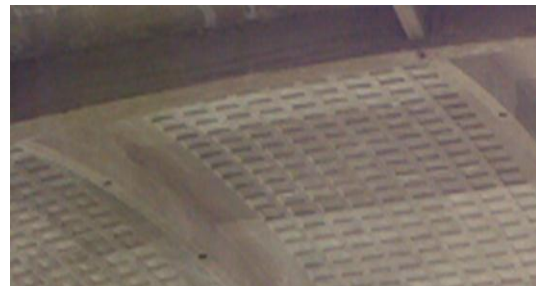


Imagen 4. Cubierta tipo Bóveda en Concreto, sistema de membranas nervadas.

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA. Estadio de Béisbol Mariano Ospina Pérez, Premio Nacional de Ingeniería (Cartagena, 1947).

Las membranas son construidas con espesores totales entre 2 y 10 centímetros, al igual que las placas se acostumbra adoptar por un sistema nervado, para las membranas la

plaqueta se diseña y construye con un espesor de 1 centímetro (ver imagen 4). Como se observa en la imagen 5, las zonas de mayor compresión o esfuerzos de corte se implementa membranas macizas.

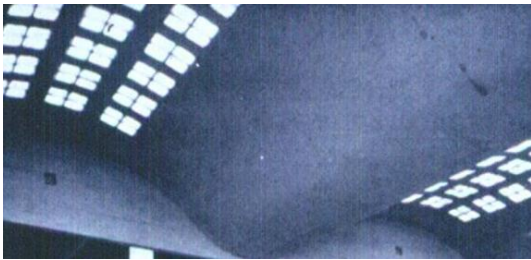


Imagen 5. Cubierta tipo Bóveda en Concreto, sistema de membranas maciza en zonas de concentración de esfuerzos.

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA. Compañía Volkswagen, Actual Colsubsidio de la Calle 26 (Bogotá, 1955).

2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Para la revisión conceptual y precisar la diferencia estructural entre ambos sistemas de cubierta, se realiza un análisis mediante modelos de elementos finitos, configurados para el análisis de elementos tipo shell y membrana basados en la teoría recopilada por G. Ramaswamy. (2)

Considerando un área de 15m x 4.8m, la estructura deberá soportar su peso propio más una sobrecarga de 70kg/m², concreto de f'_c 4000 psi, y un módulo de elasticidad E de 20636.86 MPa.

2.1. BÓVEDAS DE EMPUJE

Las bóvedas de empuje consisten en una secuencia de arcos, que pueden ser construidos de forma independiente, motivo por el cual para su modelación se implementan elementos tipo *frame*, de una sección de 0.20x0.20m, ubicados cada 20 centímetros y seccionados en longitudes máxima de 50cm, como se observa en la imagen 6, apoyado sobre vigas de 0.40x0.60.

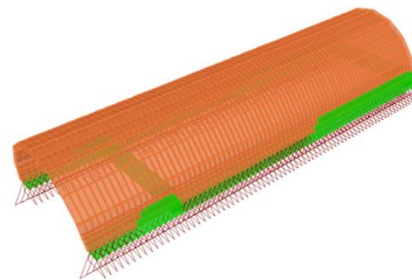


Imagen 6. Modelo Matemático Bóveda de Empuje.

Fuente: Elaboración Propia

Como resultados de la modelación matemática se obtienen las siguientes solicitantes últimas, ver tabla 1, la deformada de la estructura es presentada en la imagen 7, si se elimina el apoyo continuo el muro en la bóveda su deformada verticales aumenta en un 200%, la sección de apoyo lateral es insuficiente y la bóveda se deformaría lateralmente perdiendo su estabilidad.

Tabla 1. Solicitantes últimas Bóveda de Empuje.

Compresión (ton/m)	1.12
Tracción (ton/m)	0.00
Cortante (ton/m)	0.30
Momento (ton.m/m)	0.20

Fuente: Elaboración Propia

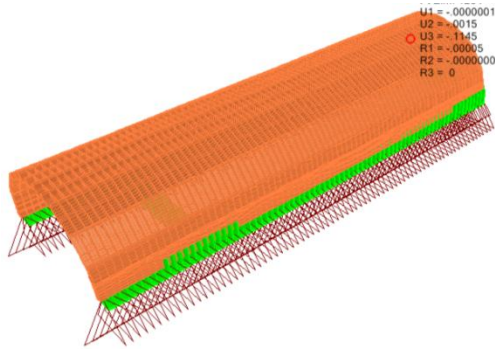


Imagen 7. Deformada Bóveda de Empuje (cm).

Fuente: Elaboración Propia

2.2. BÓVEDA TIPO VIGA LAMINAR O MEMBRANA

Las bóvedas en membrana o viga laminar son fundidas monolíticamente lo que garantiza un comportamiento tipo *shell*, en la modelación se considera un membrana de 5cm, con arcos de empuje en la zona de los apoyos, como lo muestra la imagen 8.

La estructura esta soportada en dos pórticos arqueados, con una luz de 12 metros y un voladizo de tres metros.

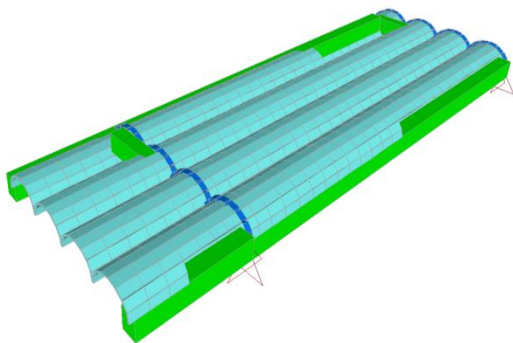


Imagen 8. Modelo Matemático Bóveda tipo Membrana 15x4.8m.

Fuente: Elaboración Propia

La deformada de la estructura es presentada en la imagen 9, así como

las solicitantes máximas de diseño se organizan en la tabla 2.

Tabla 2. Solicitantes últimas Bóveda en Membrana.

Compresión (ton/m)	6.73
Tracción (ton/m)	2.32
Cortante (ton/m)	0.57
Momento (ton.m/m)	0.17

Fuente: Elaboración Propia

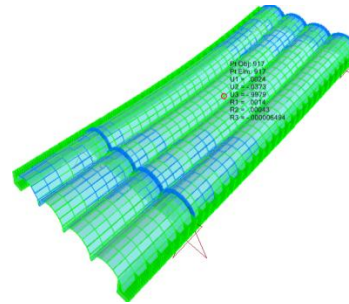


Imagen 9. Deformada Bóveda tipo Membrana (cm).

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 3 permite sintetizar el anterior ejercicio comparativo y establecer la relación entre el consumo de materiales, la respuesta estructural de ambas alternativas, considerando como punto base los parámetros propios de la bóveda de membrana.

Tabla 3. Relación Bóveda de Empuje vs. Bóveda en Membrana.

	Bóveda Empuje	Bóveda de Membrana
Concreto (m ³ /m ³)	3.50	1
Acero (kg/kg)	4.07	1
Deformación Max (cm/cm)	1	1
Sumatoria de Reacciones Verticales	1.92	1
Sumatoria Absoluta de Reacciones Horizontales	2.74	1

Fuente: Elaboración Propia

3. EXPERIENCIAS DE BÓVEDAS TIPO VIGA LAMINAR EN COLOMBIA

El principal diseñador estructural de bóvedas en membrana, fue el Ing. Guillermo González Zuleta. La primera obra diseñada y construida con cubierta tipo membrana fue 1945 en la Plaza de Mercado de Girardot, imagen 10, su cubierta se compone de 198 membranas de 5cm. (5)



Imagen 10. Panorámica de la Cubierta de la Plaza de Mercado de Girardot.

Fuente: blogdebiologianegro.blogspot.com.co

Sistema que fue implementado en la Penitenciaría de Popayán (1952), bóvedas nervadas, con valles macizos debido a los altos esfuerzos de flexión, las bóvedas se encuentran apoyadas sobre pórticos arqueados como se observa en la fotografía de la imagen 11.



Imagen 11. Bóveda Membrana de la Penitenciaría de Popayán (1952).

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

La cubierta del Estadio Mariano Ospina Pérez, también conocido como el estadio de Beisbol de Cartagena, consiste en bóvedas membrana de doble curvatura de 4 centímetros de espesor con nervios de rigidez, como se observa en las imágenes 12 y 13, la cubierta tiene un voladizo de 19 metros y es apoyada cada 10.75 metros por arcos parabólicos.



Imagen 12. Estadio de Beisbol Mariano Ospina (Cartagena, 1947).

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA



Imagen 13. Membrana en Concreto, Cubierta del Estadio de Beisbol Mariano Ospina.

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

En 1953 como solución a la cubierta del Teatro de la Comedia, hoy llamado Teatro Libre de Bogotá, el Ing. González desarrollo una bóveda

membrana compuesta por “ladrillos tipo sombrero” (imagen 14), membrana de 1 pulgada, nervada, cada espacio entre nervios tiene una forma circular y una plaqueta de 1 centímetro de espesor, la sección transversal entre nervios se asemeja a un sombrero tipo copa, los nervios se encuentran reforzados con 4 mallas en distintas direcciones de barras de 1/4 de pulgada.

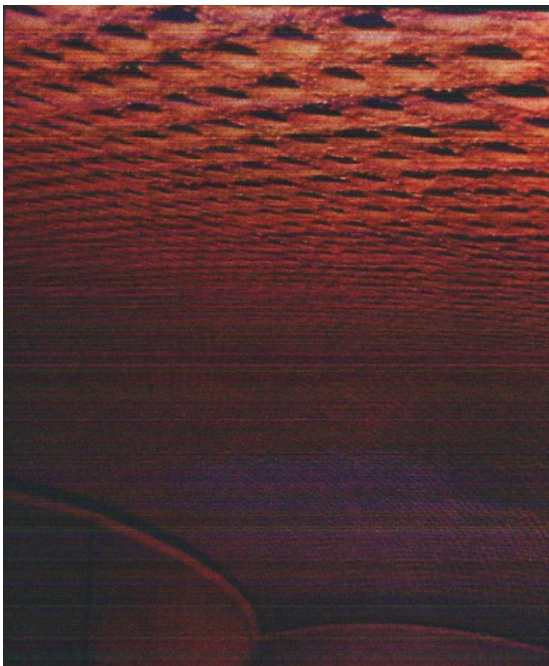


Imagen 14. Cubierta en Membrana, Teatro La Comedia (Bogotá, 1953).

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

La cubierta del Teatro del Centro Urbano Antonio Nariño, está formada por bóvedas membrana de doble curvatura, espesores de 3 centímetros, los radios de la cubierta varían entre los 13 y 30.5 metros.



Imagen 15. Centro Urbano Antonio Nariño (Bogotá, 1955).

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

La compañía Volkswagen, actualmente Colsubsidio de la Calle 26, cuenta con una cubierta con luces de 36 metros en bóvedas onduladas, las bóvedas tienen un espesor de 5 centímetros, las bóvedas principales son apoyadas por una viga en sus extremos, mediante tirantes las bóvedas principales soportan las bóvedas interiores, como se observa en la imagen 16. (6)

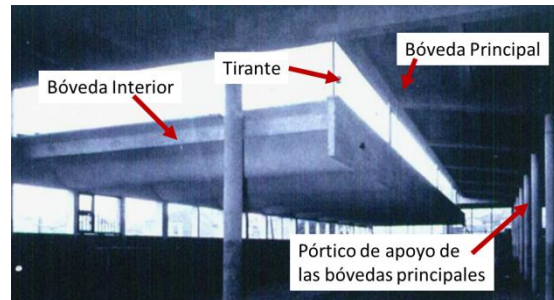


Imagen 16. Volkswagen de la Calle 26 (Bogotá, 1955).

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

Para el supermercado Rayo, hoy Carulla de la calle 63, se implementó una membrana de doble curvatura y espesor de 5 centímetros, aligerado con ladrillo hueco, apoyada en 4 arcos atirantados, como se observa en la imagen 17, esta gran bóveda cubre un área de 450m².



Imagen 19. Membrana de doble curvatura, Supermercado Rayo (Bogotá, 1955).
Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

El Ingeniero González desarrollando bóvedas de paraboloides hiperbólicas en la Iglesia de Fátima de Bogotá y la Capilla de Gimnasio Moderno (Bogotá, 1956), compuestas por cuatro membranas parabólicas de 6 cm de espesor rigidizadas por arcos internos en los extremos, ver imagen 18, estas membranas se encuentran aligeradas con ladrillo hueco, formando nervios cuadrados de 12 centímetros.



Imagen 18. Capilla de los Santos Apóstoles Gimnasio Moderno (Bogotá, 1956).
Fuente: Dan Gamboa B. (lauravision.com)

En 1956 se emplean nuevamente las bóvedas membrana para la cubierta del Hipódromo de Techo, con voladizos de 23 metros, con membranas circulares de 2

centímetros. Los nervios están dispuestos en ambos sentidos con un ancho de 10cm, como se observa en la fotografía de la imagen 19.



Imagen 19. Cubierta en Membrana Circular. Hipódromo de Techo.
Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA



Imagen 20. Cubierta en Membrana. Estadio de Fútbol Pedro Heredia (Cartagena, 1958)
Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

Entre otras obras está el estadio Pedro de Heredia, imagen 20; el estadio Pascual Guerrero de Cali, con la bóvedas de doble curvatura, luces entre apoyos de 20 metros y sobresale con un voladizo de 18metros.



Imagen 21. Estadio Pascual Guerrero (Cali, 1971)

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

El Ingeniero González desarrollo membranas plegada “folded plates” en el Coliseo Humberto Perea, como se observa en la imagen 22, estas cubierta fue aligerada con ladrillos huecos.

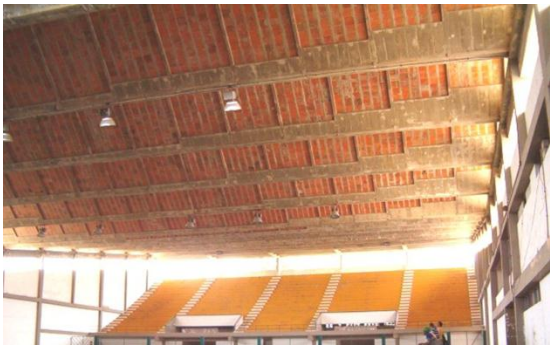


Imagen 22. Bóvedas Plegadas, Coliseo Humberto Perea (Barranquilla, 1961).

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

Las bóvedas del Palacio de Justicia de Cúcuta (imagen 23), fueron diseñadas por la compañía de González Zuleta en el año de 1989, con una luz entre apoyos de 24.5 metros, un voladizo de 4.5 m, un espesor de 5 centímetros aligerada con ladrillos huecos; bóvedas que en su proceso de construcción fue necesario el uso de cables de post-tensionamiento para el proceso de retirar la formaleta sin sufrir daño alguno.



Imagen 23. Cubierta en Membrana Circular. Palacio de Justicia de Cúcuta.

Fuente: www.worldtravelservers.com

Incluso en los últimos años de su vida el Ing. Guillermo, acompañado de su hijo el Ing. Jorge González G, continuaron con el diseño y construcción de las bóvedas membrana, como las del Estadio General Santander (Cúcuta, 1983) y el anteriormente mencionado Palacio de Justicia de la ciudad de Cúcuta. En 1993 para el Edificio Torres de San José los ingenieros González, implementaron bóvedas membrana sin torta en los espacio entre nervios, como se observa en la imagen 24, este espacio fue reemplazado con vidrio mejorando la iluminación del proyecto.



Imagen 24. Edificio Torres de San José (Bogotá, 1993).

Fuente: Guillermo González Zuleta & CIA

4. CONCLUSIONES

El desconocimiento del comportamiento de las bóvedas membrana no nos ha permitido su implementación como solución estructural. A la fecha un gran número de estas membranas han sido retiradas por falta de mantenimiento o recomendación de un ingeniero que desconoce el comportamiento del sistema. Sin embargo como se observó en la implosión del coliseo Humberto Perea en Barranquilla, incluso después de su detonación, gran parte de las bóvedas se mantuvieron en buen estado.

Las bóvedas membranas son estructuras económicas, como se observa en la tabla 3 el consumo de materiales es un 30 a 80% menor al de las bóvedas de empuje. Las bóvedas de empuje requieren un apoyo continuo de gran sección para soportar cargas verticales y el empuje horizontal, lo que demanda mayores secciones en el sistema estructural y de cimentación; mientras las membranas pueden ser soportadas mediante sistemas aporticados de menor sección.

La resistencia de estas secciones es alta para su pequeño espesor y ofrecen una alternativa de cubierta económica, resistente y duradera pues después de más de 50 años están se mantienen en condiciones estructurales admisibles.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a la Ing. Nohra Gómez Galindo, con más de 30 años de experiencia en el diseño estructural. Al Ing. Jorge González González, gerente de la firma Guillermo González Zuleta & CIA Ltda. Al Ing. Jorge Corredor Rivera, director del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Militar Nueva Granada.

REFERENCIAS

1. **Basset Salom, Luisa.** Estructuras laminares. Valencia, España : Universidad Politecnica de Valencia.
2. **Ramaswamy, G.** *Design and Construction of Concrete Shell Roof. Chapter 12 Cylindrical Shell and Folded Plates.* s.l. : McGRAW HILL BOOK COMPANY.
3. **Ruiz, Ignacio Requena.** *Análisis de Tipologías Estructurales.* 2007.
4. **American Society of Civil Engineers (ASCE).** *Design of Cylindrical Concrete Shell Roof.* New York : s.n., 1952. 31.
5. **Asociación Colombiana de Productos de Concreto (ASOCONCRETO).** *Arquitectura Colombiana en Concreto.* s.l. : ASOCONCRETO, 1996.
6. **Guillermo Gonzalez Zuleta & CIA Ltda.** *Estructuras.* Bogota : s.n.