

# ARQUITECTURA DE UN FUTURO PASADO

Estudio Comparativo entre diferentes Sistemas Constructivos de Bóvedas y Láminas

## AUTOR

Juan Fernando Cordero Toral

## TUTOR/ES

Ernesto Fenollosa Forner  
Begoña Serrano Lanzarote  
Adolfo Alonso Durá

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA (ETSA)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ARQUITECTURA AVANZADA, PAISAJE, URBANISMO Y DISEÑO  
Curso Académico 2013-2014



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# **ARQUITECTURA DE UN FUTURO PASADO**

Estudio Comparativo entre diferentes Sistemas Constructivos de Bóvedas y Láminas

# **ARQUITECTURA DE UN FUTURO PASADO**

Estudio Comparativo entre diferentes Sistemas Constructivos de Bóvedas y Láminas

## **AUTOR**

Juan Fernando Cordero Toral

## **TUTOR/ES**

Ernesto Fenollosa Forner  
Begoña Serrano Lanzarote  
Adolfo Alonso Durá

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA (ETSA)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ARQUITECTURA AVANZADA, PAISAJE, URBANISMO Y DISEÑO  
Curso Académico 2013-2014



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por otorgarme la oportunidad de vivir una experiencia increíble en el campo de la arquitectura, en lo académico y en lo social. Agradezco de manera especial a mis padres por su apoyo incondicional en todo momento y de manera fraterna a toda mi familia, amigos, compañeros y profesores que han estado en este maravilloso proceso y que sin ellos todo esto no hubiera sido posible.

# ÍNDICE

1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos del estudio.....	3
1.3 Metodología de trabajo.....	5
2. Marco histórico. Evolución del Sistema Estructural .....	7
2.1 Las bóvedas clásicas.....	9
2.2 Láminas y cascarones reforzados.....	12
3. Casos representativos. Obras destacadas.....	19
3.1 Félix Candela y la Capilla de Palmira.....	23
3.1.1 Reseña sobre el autor.....	23
3.1.2 La Capilla de Palmira.....	29
- Introducción.....	29
- Método de cálculo.....	31
- Encofrados y cimbra.....	33
- Puesta en obra del hormigón.....	35
- Revestimientos y acabados.....	38
3.1.3 Obra Póstuma. El Oceanográfico de Valencia.....	39
3.2 Eduardo Torroja y el Mercado de Algeciras.....	41
3.2.1 Reseña sobre el autor.....	41
3.2.2 El Mercado de Algeciras.....	43

- Introducción.....	43
- Método de cálculo.....	44
- Encofrados y cimbra.....	46
- Puesta en obra del hormigón.....	48
- Revestimientos y acabados.....	49
3.3 Eladio Dieste y la Iglesia de Cristo Obrero.....	51
3.3.1 Reseña sobre el autor.....	51
3.3.2 La Iglesia de Cristo Obrero.....	54
- Introducción.....	54
- Método de cálculo.....	56
- Encofrados y cimbra.....	58
- Puesta en obra del hormigón.....	59
- Revestimientos y acabados.....	61
4. La aplicación en viviendas de interés social.....	65
4.1 Las Láminas de hormigón y las bóvedas tabicadas: Su aplicación en vivienda de interés social.....	66
4.1.1 Viviendas con Láminas de Hormigón.....	67
- Características Estructurales.....	68
4.1.2 Viviendas con Bóvedas tabicadas reforzadas.....	68
- Características Estructurales.....	69
4.1.3 Carlos González Lobo y la bóveda prefabricada.....	70
- Elaboración de Bóvedas.....	70
4.1.4 La Bóveda Tabicada y el Programa SUDU en Etiopía.....	72
- Le Corbusier y la bóveda tabicada.....	73
- Unidad de Vivienda Urbana Sostenible.....	74
- Características Constructivas.....	75
- Características Estructurales.....	75
4.1.5 La Bóveda tabicada y su desarrollo en Latinoamérica.....	76
4.1.6 La arquitectura de Diébédo Francis Kéré en Burkina Faso.....	78

5. Evaluación y diagnóstico sostenible .....	83
5.1 Identificación de ventajas y deficiencias de los elementos de estudio bajo los criterios de sostenibilidad.....	85
5.1.1 Material.....	86
- Cascarones de Hormigón.....	86
- Bóvedas de Cerámica.....	86
5.1.2 Encofrado y Cimbra.....	86
- Cascarones de Hormigón.....	86
- Bóvedas de Cerámica.....	87
5.1.3 Iluminación.....	87
5. Conclusiones.....	89
6. Bibliografía.....	95

## RESUMEN

El presente Trabajo Final de Máster hace un repaso entre los sistemas constructivos de Láminas o Cascarones en hormigón y cerámica y la evolución que éstos han tenido a través del tiempo (desde las bóvedas clásicas hasta llegar a la época actual); un estudio que pretende mostrar las diferencias de estas técnicas de la construcción mediante el análisis de tres obras que destacaron en su época y que fueron realizadas por arquitectos como Félix Candela, Eduardo Torroja y Eladio Dieste en contextos sociales muy distintos pero con ideales en común llegando a dar solución a problemas que relacionaban lo económico, lo formal y lo espacial mediante el método de cálculo de esfuerzos, la ejecución de encofrados y cimbras y la mano de obra necesaria para la puesta en obra de los materiales, entre otros, así como la influencia que tuvieron sus aportes, dentro de la arquitectura como de la ingeniería estructural, especialmente en Europa y Latinoamérica; además se intenta dar a conocer cómo fueron utilizadas las láminas de hormigón y las bóvedas de cerámica a nivel de viviendas en su “época de oro” y el desarrollo que han tenido hasta convertirse en una posible respuesta en lo social, en lo económico y en lo medioambiental incluyendo conceptos y soluciones que van por los criterios de la sostenibilidad, tan presente desde 1987 con el Informe Brundtland y que hoy en día sigue buscando la optimización de los recursos humanos, naturales y materiales a través de generar la menor cantidad de residuos, buscando estructuras rentables pero que sobre todo, intenten solucionar los problemas de integración social.



# INTRODUCCIÓN

**introducción**

## ANTECEDENTES

Hoy en día el campo de la arquitectura se encuentra en un proceso de cambio en su pensamiento, tanto en la concepción de las formas arquitectónicas, así como la vida útil de las edificaciones.

La búsqueda de soluciones para resolver los problemas que hoy en día aquejan la arquitectura han llevado a estudiar técnicas y/o sistemas constructivos utilizados en años e incluso en décadas anteriores para mitigar estos consumos y hacer de las edificaciones objetos arquitectónicos sostenibles.

Dentro de los sistemas constructivos que llegaron a marcar una base en el campo tanto de la ingeniería como el de la arquitectura, están las bóvedas tabicadas y las láminas o cascarones de hormigón.

Estos sistemas han sido objeto de varios estudios concentrados en sus formas, atributos y capacidades, sin embargo en la actualidad, muy pocos profesionales son los que estudian estos sistemas para la concepción de sus diseños y propuestas.

Una respuesta a la situación mencionada anteriormente es que estos sistemas constructivos son demasiado costosos al momento de su fabricación y que son objetos con poca capacidad de industrialización, así mismo se dan razones como que son elementos que generan espacios oscuros e incluso que ya han pasado de moda (Cassinello, P. y Schlaich, M., 2010)

A finales del siglo XIX y principios del XX se daban los primeros pasos en la construcción de sistemas de bóvedas tabicadas y de estructuras laminares de hormigón (Ochsendorf, J. 2005 & Cassinello, P. 2013), entre los precursores más importantes de éstas técnicas se encuentran Rafael Guastavino (Fig. 1) y Eugéne Freyssenet (Fig. 2).



(Fig. 1)

Fig. 1: Fotografía del arquitecto valenciano Rafael Guastavino (1842 - 1908)

En los años 20, la aparición del movimiento moderno hizo que gran parte de estos sistemas se vieran relegados.



(Fig. 2)

Luego de la Segunda Guerra Mundial, aparecieron arquitectos que tras varios años de estudios y un poco como muestra de su oposición a la rigidez de las formas modernas, propusieron nuevamente, las técnicas constructivas de las bóvedas y las láminas de hormigón, entre ellos el arquitecto de origen uruguayo Eladio Dieste y el madrileño Félix Candela (Fig. 3) (Krivoshapko, S. 2006); este último sería quien acabaría convirtiéndose en el mayor exponente de los cascarones de hormigón hasta finales de los años 70's.

Existieron por supuesto otras figuras en la arquitectura que llegaron a hacer resaltar las bondades y ventajas de éstos sistemas y a los cuales se ligó el trabajo de Candela, entre ellos Antón Tedesko, Eduardo Torroja, Heinz Isler, entre otros (Norderson, G. 2008).

No obstante, el avance en las tecnologías y el encarecimiento de la mano de obra, hicieron que estos sistemas fueran dejando de lado.

Sin embargo, los criterios por los que se han dejado de lado se basan en temas puntuales, pero no se ha realizado un estudio que compare estos sistemas en la actualidad sin saber con exactitud sus niveles de sostenibilidad en la construcción.



(Fig. 3)

Es tema importante, esclarecer unos patrones lógicos que nos permitan establecer si su uso en la arquitectura contemporánea estaría limitada a quienes poseen las capacidades económicas para adquirirlos o bien si puede ser parte de una solución global en cuanto se refiere a la ejecución de obras con carácter sostenible y duradero, sin dejar de lado los tres principios fundamentales planteados desde la época de Vitrubio en la arquitectura *Firmitas, Utilitas y Venustas*. (Oliver Domingo, 1995).



(Fig. 4)

**Fig. 2:** Fotografía del Ingeniero Eugène Freyssinet (1879 - 1962).

**Fig. 3:** Felix Candela - Capilla Abierta de Cuernavaca, Palmira, México (1957 - 1958).

**Fig. 4:** Eladio Dieste - Estación de Autobuses en Salto, Uruguay (1973 - 1974).

## OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos que se plantean en este trabajo de investigación responden al interés de saber por qué las estructuras abovedadas y las laminas (en hormigón) dejaron de usarse del modo como surgieron para pasar a utilizarse de una forma mucho más utilitaria y con medios y materiales rudimentarios.

Es cierto que al pasar de los años el incremento de valor en la mano de obra ha sido tema fundamental para que esto sucediera, sin embargo, no se puede decir que un sistema es costoso basándose en un sólo indicativo.

Así mismo, la sostenibilidad de una estructura no se puede determinar únicamente por el valor económico de la misma, sino que debe ser sometida a un análisis riguroso donde intervengan parámetros adecuados para saber con exactitud su relación con la sostenibilidad.

De acuerdo a los criterios anteriormente mencionados los objetivos del presente trabajo se resumen en los siguientes puntos:

- Analizar la evolución de los distintos sistemas estructurales ligeros, enfocado a bóvedas y láminas.
- Mostrar las fortalezas y debilidades de este tipo de estructuras desde diferentes aspectos.

- Efectuar un análisis comparativo de los diferentes sistemas considerando los aspectos básicos de la sostenibilidad como son: el medioambiental, social y económico.

- Estudiar los sistemas de bóvedas y láminas y su posible aplicación en la construcción de la denominada "Vivienda Social".

- Evaluar la sostenibilidad de estas estructuras mediante la aplicación de diferentes indicadores: replicabilidad, facilidad de ejecución, durabilidad, costes mantenimiento, costes ejecución, uso de materiales locales, energía embebida, respuesta estructural, etc....

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología a seguir para el desarrollo de este trabajo estará conformada por cuatro fases; una primera fase en la que se recopilará la información pertinente y necesaria para el inicio correcto de la investigación, la misma que se servirá para establecer los parámetros y la extensión del estudio.

En segundo lugar se llevará a cabo una recopilación histórica donde se estudiará la evolución de las estructuras de bóvedas tabicadas al igual que las láminas o cascarones de hormigón. Esta etapa de metodología nos permitirá identificar las características de cada uno de los sistemas que se estudiarán más a profundidad en su forma, estructura y funcionalidad.

En tercer lugar se realizará un análisis comparativo de aquellas estructuras previamente estudiadas y seleccionadas, teniendo en consideración los diferentes conceptos relacionados con la sostenibilidad así como los distintos campos que favorezcan a la mejor comprensión de sus aptitudes en las edificaciones para lo cual se utilizará un análisis multicriterio.

Finalmente se establecerá una propuesta donde se ponga en práctica el análisis anteriormente descrito en estructuras o edificaciones de la actualidad que utilicen los sistemas constructivos que se han estudiado en el desarrollo de la investigación, lo mismo que nos ayudará a establecer conclusiones que

resumirán el estudio y permitirán tener una visión más completa de estos tipos estructurales, los resultados que se lleguen a obtener tendrán el propósito de contribuir al desarrollo de las bóvedas tabicadas y de las láminas de hormigón en el contexto actual, y por qué no, de otras estructuras que pretendan tener parámetros de sostenibilidad al momento de su concepción, además de proponer una serie de conceptos que permitan esclarecer ciertos aspectos controvertidos en apartados similares.

MARCO HISTÓRICO  
**marco histórico**

## EVOLUCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

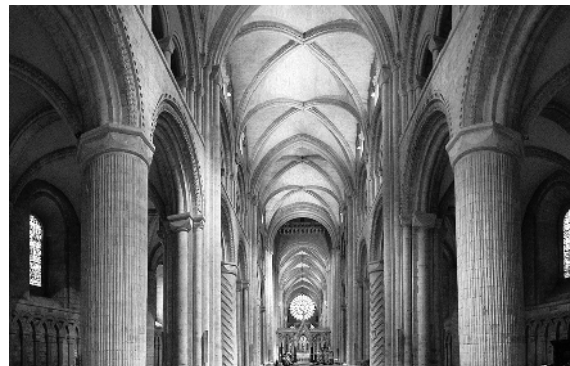
### LAS BÓVEDAS CLASICAS

Las estructuras han formado parte de la vida de las personas prácticamente desde los inicios de la evolución. Sea desde la mecánica de sencillas herramientas hasta los grandes cruceros que navegan en los mares o los grandes edificios que surcan el cielo.

Pero para alcanzar las grandes obras que hoy en día se realizan, fue necesaria la incorporación de diferentes sistemas constructivos; desde aquellos sillares que daban forma a puertas trapezoidales en templos y casas incas en Latinoamérica (Fig. 5) hasta aquellos sillares de piedra de singular presencia y majestuosidad en las catedrales del s. XII con el gótico europeo (Fig. 6).



(Fig. 5)



(Fig. 6)

Pero todo esto no acabaría allí, en el s. XIX se da uno de las aportaciones más grandes en el campo de las estructuras y por supuesto para la ingeniería y la arquitectura, es el descubrimiento del hormigón y el concreto. Para 1824 Joseph Aspdin y James Parker patentan el cemento Portland y para 1845 con la aparición del clinker de la mano de Isaac Johnson (Krivoshapko, S. 2006).

Estas dos grandes aportaciones fueron sin duda el inicio de una serie de investigaciones y pruebas, de aciertos y fracasos pero que sin duda lograron un cambio sin precedentes en el mundo de la edificación.

Las propiedades mecánicas del hormigón, permitían soportar grandes esfuerzos a la compresión, sin embargo era bastante propenso a sufrir fisuras y

Fig. 5: Puerta trapezoidal inca (s. XV).

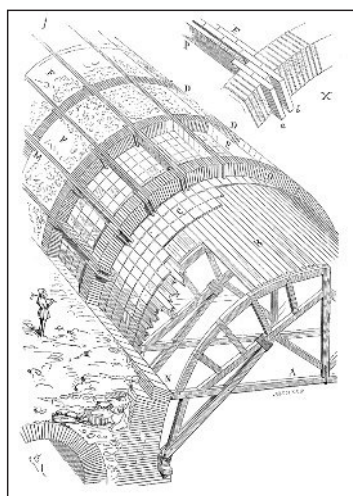
Fig. 6: Interior de la Catedral de Durhan, Inglaterra (s.XII).

roturas a la flexión, torsión, tracción e incluso cortante, pero esto se solventó con la implementación del acero como parte fundamental en la concepción de estructuras (Strike, J. 2004), es así como aparece el hormigón armado y por supuesto grandes obras de arquitectura e ingeniería que no se habían pensado concebirlas en tiempos anteriores.

Es así que para principios de los 1900 aparecen obras y conceptos dentro de la rama de la construcción, el más importante e influyente, el movimiento moderno a mediados de los años '20, sin embargo, también hacen un gran adelanto en su concepción las bóvedas tabicadas y las láminas de hormigón.

Las bóvedas son elementos constructivos conformados por aparejos de ladrillo o piedra, son estructuras que están formadas por la sucesión de arcos a lo largo de un eje; existen varios tipos de bóveda de acuerdo a la forma de éstas, siendo la más común: la bóveda de cañón (Fig. 7).

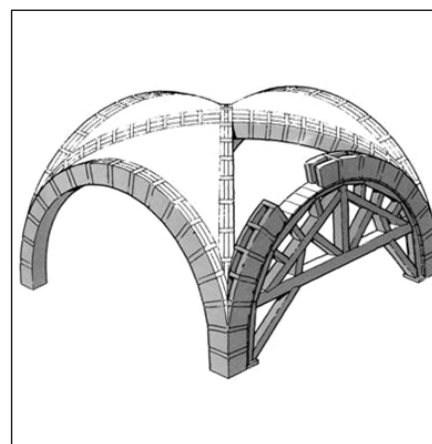
La evolución de las bóvedas va desde las primeras composiciones de piedra o ladrillo en épocas romanas, donde la construcción de dichas bóvedas era un simple ejemplo de intuición estructural, hasta las de tipo aliviadas o tipo cascarones, conocidas como bóvedas catalanas, por su tradición constructiva en la península ibérica.



(Fig. 7)

**Fig. 7:** Construcción de Bóveda de cañón. Grabado. Viollet le Duc (1868).

**Fig. 8:** Esquema de Bóveda de Arista. Filomena López y Francisco Fernández "Matemáticas con mucho arte: antigüedad" (2012).



(Fig. 8)

No obstante, es en el siglo XIX en que el funcionamiento de las bóvedas llegan a comprenderse a un nivel científico, esto gracias a los trabajos de investigación por parte de W. Wittman en 1879 sobre el funcionamiento de las bóvedas de crucería.

Los diferentes tipos de bóvedas se caracterizan de acuerdo a su forma siendo las siguientes:

- **Bóveda de Cañón**

Usada desde la época romana, esta bóveda está formada generalmente por la sucesión de arcos de medio punto a través de una directriz, se puede subclasificar en bóvedas rebajadas y bóvedas ojivales, este último muy usado en la arquitectura gótica, la subclasificación se da dependiendo de la forma de arco que es extruido.

Los arcos romanos tuvieron su evolución principalmente con los arcos de arista.

- **Bóveda de arista**

La bóveda de arista es una pequeña evolución en la técnica arquitectónica del arco de medio punto y consiste únicamente en el cruce de dos bóvedas de cañón que se intersectan de manera perpendicular (Fig. 8).



- **Bóveda de lunetos**

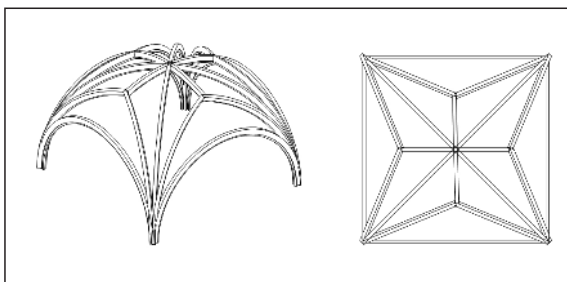
Las innovaciones de las bóvedas no se hicieron esperar al intentar tener una arquitectura más llamativa y que demostrara los estándares de aquellos que habitaban dichas edificaciones, una de estas innovaciones es la bóveda de luneto, que no es otra cosa que una bóveda de cañón de menores dimensiones que se incrusta en una bóveda principal.

- **Bóveda de rincón de claustro o claustral**

Es una bóveda de planta cuadrada, muy utilizada en el románico español, generalmente se la estudia como una tipología dentro de las cúpulas, aunque sus derivaciones en bóvedas esquinadas fueron usadas para cubrir plantas rectangulares y de ahí que se la incluya dentro de la rama de las bóvedas.

- **Bóveda de crucería o nervada**

Esta bóveda es característica del estilo gótico en la arquitectura, la principal particularidad es la utilización de nervios estructurales que transmiten los esfuerzos de las bóvedas hacia los apoyos, es la primera vez donde partes de la bóveda sirven únicamente de rellenos, las mismas que se denominan *plementos* (Fig. 9).

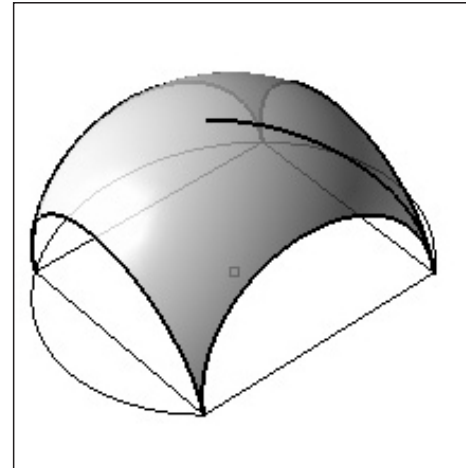


(Fig. 9)

- **Bóveda vaída o de pañuelo**

Su nombre se debe a la forma similar que toma un cuadrado o rectángulo de tela mojada sujetada desde sus cuatro vértices a una misma altura y dejada actuar

por los efectos de la gravedad (Fig.10). La diferencia entre la bóveda vaída y una cúpula sobre pechinas es justamente que la bóveda vaída actúa como un único elemento mientras que la segunda son dos elementos independientes que funcionan conjuntamente, la bóveda vaída daría paso a las bóvedas tabicadas.



(Fig. 10)

A partir del siglo XIX, debido a los estudios para la comprensión, tanto estructurales como funcionales de las bóvedas, hace que aparezcan novedosas formas y nuevas técnicas constructivas.

Uno de los más grandes exponentes de esta avanzada composición de formas fue el arquitecto catalán Antonio Gaudí, sus investigaciones sobre las catenarias con pequeñas maquetas basadas en el estudio de las parábolas (Fig. 11) le permitieron elaborar arquitecturas muy avanzadas para su época y que hoy en día siguen asombrando a todo aquel que las observa, inclusive profesionales de la arquitectura y la ingeniería.

Su obra más aclamada, la aún incompleta Sagrada Familia, cuyo interior muestra un indescrutable mundo de volúmenes y geometrías capaces de alterar el sentido de cualquiera (Fig. 12) es un claro ejemplo de lo descrito anteriormente.

Dentro de la arquitectura catalana, existe una

**Fig. 9:** Bóveda de crucería. Infografía. Laura Argüeso Estrado (2012).

**Fig. 10:** Bóveda vaída o de pañuelo. Infografía. Celia Díaz Blanco (2012).

bóveda tradicional de la cual ni siquiera Gaudí dejó de lado, ésta es la bóveda catalana (Fig. 13), bóveda que se sustenta únicamente con el traslape de dos a tres capas de rasilla y cerámica y que tiene una gran capacidad para soportar los esfuerzos a la compresión, sin la necesidad de estructuras nervadas ni grandes dimensiones en su sección. El mayor expositor de esta técnica fue el arquitecto, también de origen español, Rafael Guastavino, quien hizo uso de tan maravillosa técnica en innumerables edificios, especialmente en los Estados Unidos de Norteamérica (Fig. 14).



(Fig. 13)



(Fig. 11)

Este particular estilo de construcción de bóvedas tuvo un auge en la posguerra española, donde la falta de recursos de hormigón y hierro, hicieron que se retomaran las técnicas locales y que no necesitaran de dichos materiales en la construcción.



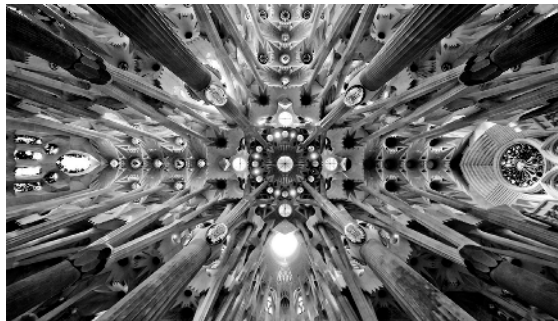
(Fig. 14)

**Fig. 11:** Maqueta polifuncional para la iglesia de la colonia Güell. Museo Sagrada Família. Antonio Gaudí. Barcelona.

**Fig. 12:** Iglesia Sagrada Família. Nave central. Detalle del cielo raso. Antonio Gaudí. Barcelona (1882- --).

**Fig. 13:** Escuela de la Sagrada Família. Antonio Gaudí. Barcelona (1909).

**Fig. 14:** Construcción de la Biblioteca Pública de Boston. Rafael Guastavino. Norteamérica. (1889) (Ochsendorf, J. 2005)..



(Fig. 12)

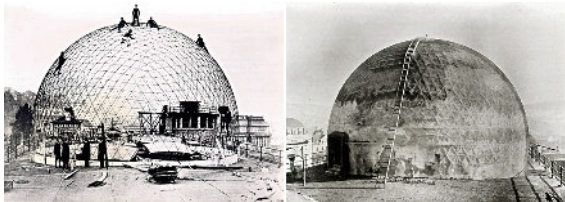
La geometría de las bóvedas hace que sus componentes trabajen a compresión. Por regla general este elemento constructivo sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros o una serie de pilares alineados. (Gargollo y Parra, M. 1878). Sin embargo, veremos que llegamos a un momento en el que esta definición pierde peso con la aparición de las bóvedas modernas llamadas en adelante, láminas o cascarones de hormigón, especialmente aquellas conformadas por los paraboloides hiperbólicos.

## LÁMINAS Y CASCARONES REFORZADOS

Con el descubrimiento a principios del siglo XX del hormigón armado, las bóvedas empezaron a tener otro carácter dentro de las estructuras, la determinación de cubrir espacios diáfanos de gran envergadura, así como el uso mínimo de materiales llevaron a crear lo

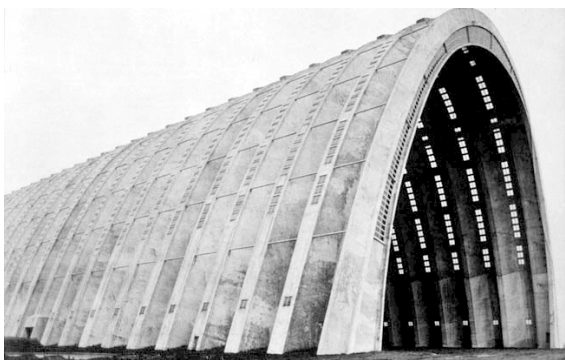
que hoy en día conocemos como láminas o cascarones de hormigón.

En 1922 se construye en Jena, Alemania el planetario Zeiss por parte de los ingenieros de origen alemán Franz Dischinger y Walther Bauersfeld, así se desarrolló el icosaedro subdividiéndolo según la frecuencia 16, la estructura constaba de 3480 nervios y cubierta con hormigón armado. (Históptica.org, 2014). Esta estructura está considerada internacionalmente como la primera lámina de hormigón dentro de la edificación (Fig. 15). (Cassinello, P. 2013).



(Fig. 15)

Para 1923 Eugene Freyssinet diseña los hangares de Orly, bóvedas de cañón cilíndricas con una sección transversal parabólica de superficie corrugada, con 144 metros de largo y abarcando una distancia de 75 metros en su base, sería junto con estructuras similares las que determinarían el camino en el desarrollo de las estructuras reforzadas de acero y hormigón en las décadas siguientes. (Kurrer, K. 2008).



(Fig. 16)

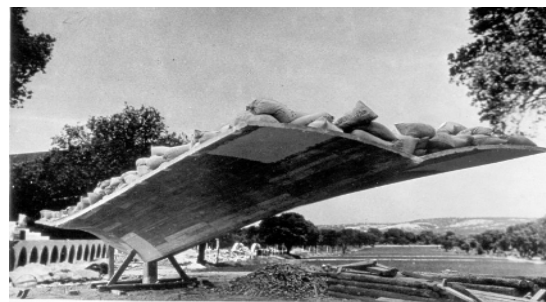
Luego de estos primeros pasos dentro de las estructuras, surgieron otros nombres de ingenieros y arquitectos con innovadores diseños que lograron destacar mundialmente logrando un auge de estas estructuras en la década de los años 50 y 60 especialmente.

Por mencionar a algunos de los más destacados tenemos a los arquitectos españoles Ildelfonso Sánchez del Río (Fig. 17), *Eduardo Torroja* (Fig. 18) y *Félix Candela*; este último sería quien daría a conocer mundialmente las estructuras laminares con sus espectaculares y a la vez delicadas obras realizadas en México.



(Fig. 17)

También destacaron los arquitectos e ingenieros Simon Boussiron, Auguste Perret, Franz Dischinger, Pier Luigi Nervi, Nicolás Esquillan, Oscar Niemeyer, Mario Salvadori, Eero Saarinen, Bernard Louis Zehruss, Auguste Perret, Pier Luigi Nervi, Anton Tedesko y Heinz Isler (Fig. 19) entre otros con significantes obras dentro del mundo de las láminas de hormigón. (Cassinello, P. 2010).



(Fig. 18)

**Fig. 15:** Planetario Zeiss. Bauersfeld y Dischinger. Jena-Alemania (1922).

**Fig. 16:** Hangares de Orly. Eugène Freyssinet. Orly, Francia (1923).

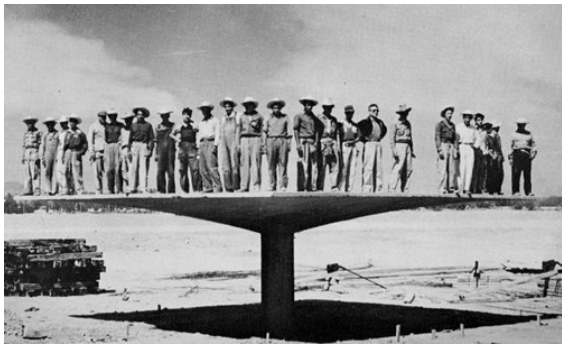
**Fig. 17:** Palacio de Deportes. Ildelfonso Sánchez del Río. Oviedo, España (1976).

**Fig. 18:** Hipódromo de la Zarzuela, prueba de carga sobre módulo, Eduardo Torroja. Madrid, España (1935).



(Fig. 19)

Pero no sólo en Europa se vio la fuerte influencia de las estructuras laminares, en América también surgieron arquitectos muy ligados a la ingeniería que lograron dar un espacio a sus edificaciones en el mundo de las estructuras laminares; uno de ellos, posiblemente el más influyente dentro de esta rama y mencionado anteriormente fue el arquitecto de origen español el arquitecto madrileño Félix Candela pero que debido a los conflictos políticos de la época en España se vio obligado a radicar en México por muchos años, con su admiración por el mundo de las matemáticas y su preocupación por implementar nuevas formas, posiblemente para mostrar una cara distinta a las del movimiento moderno de las líneas rectas, logra concebir dentro de la arquitectura diseños basados en los paraboloides hiperbólicos, conocidos desde entonces como *Hypar* (Fig. 20).



(Fig. 20)

**Fig. 19:** Complejo deportivo de Tennis. Heinz Isler. Heimgberg, Suiza. (1982).

**Fig. 20:** Prueba de Carga de una estructura HYPAR. Félix Candela. Ciudad de México, México. (1953).

**Fig. 21 - 21a:** Pabellón de Rayos Cósmicos. Félix Candela. Ciudad de México, México. (1951).

Desde su primera incursión en el mundo de las estructuras laminares con el Pabellón de los Rayos Cósmicos, Candela realiza una de la primera estructura laminare de hormigón con tan sólo 16mm de espesor,

la misma, que se encuentra en las instalaciones de la facultad de Odontología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Fig. 21), hasta el paraguas invertido utilizado en el Mercado de Arriaga en Chiapas o el restaurante Los Manantiales en Xochimilco, cuya espectacularidad se vio duplicada en su obra póstuma, L' Oceanografic en Valencia, España.



(Fig. 21)



(Fig. 21a)

Durante muchos años este singular arquitecto aportó variadas formas y elegantes diseños que se convirtieron hasta el día de hoy en referentes de la arquitectura laminar.

Para finales de la década de los años 60, Candela ya había construido una gran cantidad razonable de proyectos mundialmente reconocidos, sin embargo, el incremento en el coste de la mano de obra de aquella época, hizo que se dejara de optar por los cascarones de hormigón como solución constructiva

de bajo costo, debido a los complejos sistemas de andamiajes requeridos en la elaboración de dichas estructuras.

En esas mismas décadas al sur del continente Latinoamericano a manos del ingeniero uruguayo Eladio Dieste aparece un nuevo capítulo dentro de las estructuras laminares, una arquitectura que retomaba las enseñanzas de las antiguas bóvedas con la tecnología de las láminas de hormigón.

Con las premisas antes mencionadas, Eladio Dieste crea innovadoras formas de construcción con el simple uso de materiales tan sencillos como la cerámica y el acero de refuerzo, dicho uso, posiblemente fue la búsqueda de un sistema que demandara una economía en la edificación en un país cuya generosidad de recursos propios para la construcción no son precisamente alentadoras.

Los conocimientos adquiridos por Dieste le permitieron plantear dos sistemas constructivos dentro de las bóvedas en tabiquería reforzada, el primero de ellos fue la bóveda “auto portante”, la misma que consistía en la elaboración de largas bóvedas abiertas con sencillos soportes lo que le permitieron obtener grandes voladizos en ambos sentidos (Fig. 22).



(Fig. 22)

La clave en el funcionamiento de estas bóvedas es el acero pretensado que utilizó Dieste para su fabricación, lo que hacía de la bóveda una gran viga en sí, la misma que obtenía su espesor por el uso de una simple “cama curvada” de bloques cerámicos.

La espectacularidad de estas magníficas obras arquitectónicas radica en que a diferencia de las bóvedas tradicionales, los apoyos laterales no son grandes muros de apoyo, sino que se convierten en apoyos puntuales a través de elementos verticales que podían estar muy distantes unos de otros, ejemplo de esto lo podemos observar en la Terminal municipal de autobuses en Salto, Uruguay construido a principios de la década de los años 70 (Fig. 23).

Eladio Dieste definió este primer sistema como “Cáscaras auto portantes de directriz catenaria sin tímpanos”. (Pedreschi, R. 2000).



(Fig. 23)

El segundo sistema de bóvedas de Eladio Dieste, fueron las bóvedas “gaussianas” nombradas así en honor al matemático que describió la geometría de curvas, el alemán K.F. Gauss (1777 - 1855).

Son bóvedas donde la doble curvatura se convierte en protagonista de las edificaciones, a parte del respectivo refuerzo que Dieste las otorgó para mayor resistencia; las formas y superficies que generó son de una exquisitez arquitectónica única donde la espacialidad se funde con la piel del edificio, claro ejemplo de esta afirmación es la iglesia de Jesucristo Obrero en la ciudad de Atlántida, Uruguay (Fig. 24).

Naves industriales, gimnasios e iglesias, dentro y fuera de América fueron y son algunos de los espacios que cubrieron las magníficas obras en tabiquería reforzada que Eladio Dieste.

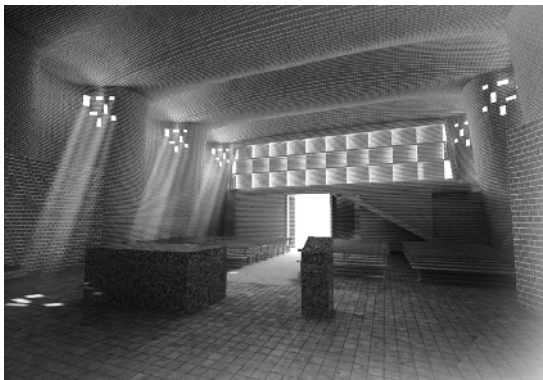
Fig. 22: Estación de Servicio Barbieri e Langgire. Eladio Dieste. Salto, Uruguay (1975 - 76).

Fig. 23: Estación Municipal de autobuses. Eladio Dieste. Salto, Uruguay (1971 - 74).

Tanto Eladio Dieste como Félix Candela junto a otras figuras de la construcción como Eduardo Torroja se convirtieron en grandes influentes de la arquitectura contemporánea, posiblemente porque compartían ideales comunes, la necesidad de usar materiales y técnicas constructivas que fuesen apropiadas en sus países y que hayan tenido el papel de constructores para conformar la relación entre estructura y arquitectura.



(Fig. 24)



(Fig. 24a)

Al finalizar la década de los 70, tanto las láminas de hormigón como las bóvedas tabicadas reforzadas vieron un declive en su producción, siendo el más afectado el propio Félix Candela quien podría decirse que era el arquitecto con mayor especialización en este campo.

Ya lo dijo el propio Candela en una conferencia realizada en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1969: (...) *La verdad es que yo estoy tan perdido y desorientado como ustedes. Tengo cerca de 60 años, me he pasado 20 de ellos como constructor y diseñador de estructuras, conozco el oficio de arquitecto tradicional razonablemente bien, y no encuentro mercado ni uso para unas habilidades que me ha costado muchos años conseguir. Soy una persona desplazada en el mundo actual y no sé lo que hacer ni si valgo para algo...* (Candela, F. 1985).

Estas palabras demostraban en su momento la dura realidad que se debió sobrellevar en aquellos años, donde las láminas de hormigón ya no veían sitio dentro de la construcción contemporánea de nuevos materiales.

Dentro de las principales causas por las que estos sistemas constructivos llegaron a perderse en su momento están: que fueron una moda de aproximadamente 60 años; que la construcción de los cascarones resultaba excesivamente costosa por el incremento de la mano de obra y los intrincados andamiajes necesarios; que eran poco prácticos de acuerdo a la funcionalidad de ciertas edificaciones, especialmente en viviendas; que los cascarones creaban espacios oscuros y con iluminaciones naturales muy difusas, lo que impedía un confort total en los espacios; la incompatibilidad de los cascarones frente a las necesidades actuales de aislamiento térmico; y por último, las normativas y ordenanzas de construcción y similares son poco aclaratorias al momento de aprobar una edificación mediante cascarones de hormigón (Casinello, P. 2010).

A pesar de todo, hoy en día existen universidades y profesionales tanto en la rama de la arquitectura como de la ingeniería que tratan de demostrar que con un poco de iniciativa se puede optar nuevamente por este tipo de sistemas constructivos.

El caso del arquitecto español Justo García Rubio quien con su diseño de la estación de autobuses en el poblado de Casar de Cáceres (Fig. 25 y 25a), demuestra que los cascarones de hormigón pueden ser hoy en día verdaderas obras de arte con

una competitividad económica, siendo una buena herramienta en caso de tener presupuestos muy ajustados e incluso tener la factibilidad funcional de acuerdo a los usos establecidos.

La utilización de la doble curvatura como elemento de rigidización en la estructura única muestra la sencillez en una forma donde la escultura dentro de la arquitectura se hace presente.

Las formas suaves y ondulantes de la estación, evocan las arquitecturas de Oscar Niemeyer, la iraquí Zaha Hadid, o incluso las del propio Félix Candela y se entroncan dentro de lo que puede denominarse como *organicismo plasticista*, corriente arquitectónica en la que por encima de los elementos estructurales se impone la libertad de las formas, tratando los edificios como si fuesen esculturas. (Durán, G. 2013).



(Fig. 25)



(Fig. 25a)

De alguna manera, los casos que se pueden ver hoy en día son lamentablemente casos aislados, en gran parte debido a masificación de los sistemas

constructivos convencionales establecidos desde los años de Le Corbusier y Mies Van der Rohe.

Otro caso donde la búsqueda de abaratar los costos en construcción, son las obras sociales realizadas en países de escasos recursos, tanto económicos como naturales, es el caso de los países africanos donde se ha puesto en marcha la iniciativa de utilizar sistemas constructivos utilizados en décadas pasadas, donde la tecnología no era un privilegio y que responden de maneras acordes a sus necesidades y sobre todo, a sus realidades.

Un ejemplo de este tipo de iniciativas es la del programa *SUDU* por sus siglas en inglés para Unidad Urbana de Viviendas Sostenibles en la ciudad de Addis Ababa, Etiopía, donde más del 80% de sus habitantes viven en la pobreza.

Este proyecto dirigido por Dirk Hebel, en conjunto con las organizaciones ETH Zürich y la EiABC, donde con la capacitación de los propios habitantes de la zona (en este primer caso, la gente en Etiopía) y la utilización de materiales cerámicos de la zona, se ha llegado a hacer uso de las tradicionales bóvedas tabicadas (Fig. 26) y que han demostrado ser motivo de satisfacción entre aquellos que han sido partícipes de tan sugerente proyecto.



(Fig. 26)

Con este tipo de actividades se ha llegado a demostrar que las capacidades económicas y de capacitación local pueden al mismo tiempo llegar a presentar grandes ventajas dentro de las sociedades beneficiándose de este tipo de sistemas constructivos.

**Fig. 25 - 25a:** Estación de Autobuses de Casar de Cáceres. Justo García Rubio. España. Fotografía: Gonzalo Durán (2004).

**Fig. 26:** SUDU Project. Dirk Hebel y Asociados. Ethiopia (2010).

# CASOS REPRESENTATIVOS

**casos representativos**



## OBRAS DESTACADAS

En este apartado, nos adentraremos más en el funcionamiento de dos de los sistemas constructivos que se han mencionado ya en el capítulo anterior (láminas de hormigón y bóvedas tabicadas reforzadas) y que servirán de base para el desarrollo de la investigación planteada en este trabajo.

Los motivos que llevan a escoger las obras que a continuación se enumeran muestran primero la diversidad de ideas que pueden llegar a presentarse en diferentes países teniendo metas y objetivos en común.

La influencia o no influencia de obras anteriores por parte de los técnicos, que desarrollaron los sistemas constructivos mediante un pensamiento único y singular de ver las estructuras y la arquitectura. En el caso de los dos primeros, su relación maestro - alumno y su evolución desde los años 30 hasta mediados de los años 70.

Para ello, se han elegido a estos tres máximos exponentes de estas técnicas constructivas:

Por una parte, se encuentra el arquitecto de origen español pero que hizo su vida profesional en México, reconocido mundialmente por sus láminas de hormigón con formas basadas en los paraboloides hiperbólicos, Félix Candela.

El segundo exponente de una arquitectura e ingeniería que en su momento fue un referente arquitectónico en España, sobre todo por sus espectaculares diseños en estructuras laminares, el ingeniero Eduardo Torroja Miret.

Y por último tenemos a quien puede ser uno de los más importantes referentes en la ingeniería y la arquitectura en Uruguay y cuya innovadora técnica en el uso de bóvedas tabicadas lo pusieron como un ícono en el desarrollo de las mismas, el ingeniero Eladio Dieste.

El estudio de los proyectos seleccionados se centrará en aspectos como la geometría de los mismos y de por qué fueron concebidos de esta manera en concreto, hablaremos también de las características que los hace importantes como para ser parte de dicho análisis y sin olvidar por supuesto de la materialidad, tanto el hormigón como el ladrillo cerámico y sus consecuencias en el entorno en el cual fueron emplazados.

Por otra parte, no podemos dejar de lado la relación con el lado humano y la vinculación con los aspectos que hoy en día se deben tener en cuenta para lograr una arquitectura sostenible, pensando cómo responderían a las condiciones climáticas que nos afectan con más intensidad.

Los proyectos a analizar serán: la Capilla abierta en Lomas de Cuernavaca (México, 1958) del arquitecto Félix Candela; como segundo proyecto está el Mercado de Algeciras (Bahía de Gibraltar, España, 1959-1962) obra del ingeniero Eduardo Torroja en colaboración con Manuel Sánchez Arcas y finalmente será parte de esta investigación la iglesia de Cristo Obrero en el poblado de Atlántida (Uruguay, 1952) obra del ingeniero Eladio Dieste.

Se puede advertir que los proyectos seleccionados están relacionados por la manera de percibir la realidad existente, la economía en su proceso constructivo y donde la forma es la base del diseño en todas sus etapas.

Además encontramos que son proyectos que se levantan en diferentes situaciones geográficas muy distantes entre sí, el clima, las condiciones sociales y la visión incierta de lo que vendrá más adelante.

Otro aspecto importante es que estos sistemas constructivos pueden considerarse como *estructuras mínimas*, que siguiendo su definición que dice: que cumpliendo con todas las necesidades que presentan los distintos sistemas constructivos de una obra real, necesitan la mínima cantidad de energía de construcción para su realización; energía que se traduce en la cantidad de material y ésta a su vez al peso, volumen, costes y trabajo, tanto en la fabricación como en el montaje de la obra (Ronald, C. 1973).

## FÉLIX CANDELA: Los Paraboloides Hiperbólicos (*Hypar*) y el caso de LA CAPILLA DE PALMIRA (CUERNAVACA, MÉXICO. 1958-1959).

Félix Candela Outeriño, nace el 27 enero de 1910 en Madrid, España; culmina sus estudios en la Escuela de Arquitectura de Madrid y se licencia como arquitecto en 1935. Fallece en 1997 en la ciudad de Durham en Carolina del Norte, Estados Unidos. (Structures. International Database and Gallery of Structures. 2014).

Para 1939 Félix Candela se ve obligado a exiliarse a México a causa de la Guerra Civil Española donde años más tarde, en 1941, obtiene la nacionalidad de dicho país y donde empieza su protagonismo en la “aventura laminar de la arquitectura moderna” (Cassinello, P. 2010). (Fig. 27).



(Fig. 27)

Tras sus primeros años como arquitecto en México, Candela realiza algunas obras de carácter residencial en algunas ciudades, entre ellas Acapulco y México D.F. atraído siempre por las estructuras livianas, especialmente los cascarones de concreto. A inicios de la década de los años 50 y luego de fundar su propia empresa constructora llamada *Cubiertas Ala*, Candela da el paso más importante al construir un prototipo experimental de cascarón basado en la forma funicular o catenária (del Cueto Ruiz-Funes, J. 1997) (Fig. 28).



(Fig. 28)

Para 1957, cuando hay la propuesta para construir la Capilla abierta de Palmira en Cuernavaca, Félix Candela ya tenía una experiencia inigualable en

**Fig. 27:** Documento de identificación de Félix Candela en su arribo a México (1939). (Billington, D. 2010)

**Fig. 28:** Cascarón de Hormigón Catenario. Modelo experimental, Félix Candela. San Bartolo, México (1949). (Cassinello P. 2010).

el campo profesional en la construcción de estructuras laminares de hormigón, en su haber ya poseía más de un centenar de edificaciones con esta técnica constructiva.

Entre las más destacadas se encuentran: el *Pabellón de los Rayos Cósmicos* en México D.F. (1951), la *Iglesia de la Medalla Milagrosa* (1953) y la *Bolsa de Valores* (1955) también en ciudad de México, el *Restaurante Los Manantiales* en Xochimilco (1957) y el Mercado de Coyoacán (1956) entre otras, es decir, Félix Candela había ya poseído todo un legado en el cual sustentar sus decisiones.

Como ya se ha mencionado en líneas anteriores, los sistemas constructivos por los que Félix Candela fue mundialmente conocido, están basados en los paraboloides hiperbólicos que no son otra cosa que geometrías que por medio de dos series de líneas rectas que se mueven en el espacio (directrices y generatrices) generando superficies regladas de doble curvatura inversa que tienen la cualidad de transmitir casi exclusivamente esfuerzos a compresión. (del Cueto Ruiz-Funes, J. 2011).

En el diagrama explicativo de distribución de esfuerzos del Pabellón de Rayos Cósmicos en la UNAM, se aprecia como las fuerzas se distribuyen de manera directa hacia los arcos de rigidez de la lámina y pasando de manera adecuada los esfuerzos a los soportes o apoyos (Fig. 29). Esto demuestra que Candela supo aprovechar estas características para obtener así una mayor rigidez en la conformación de las láminas de hormigón.

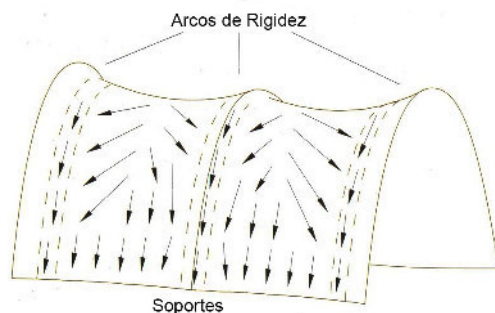
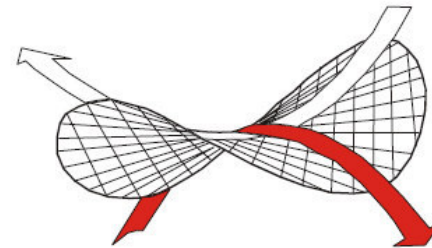
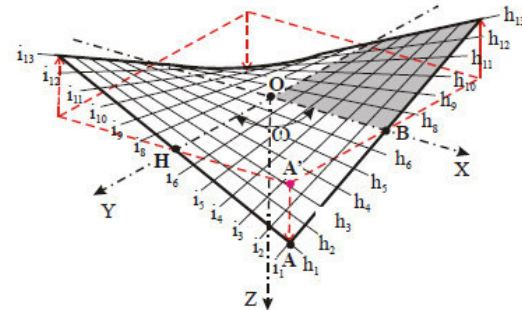


Fig. 29: Diagrama de distribución de esfuerzos. Pabellón de Rayos Cósmicos. México D.F. Archivo de Félix Candela. Dorothy Candela.

Fig. 30: Tipos de Hypar utilizados por Félix Candela. Arriba: Hypar de borde recto. Abajo: Hypar de borde curvo.

(Fig. 29)

Dos fueron los conceptos o “variaciones” en los que Candela usó la geometría de los paraboloides hiperbólicos: las estructuras de borde recto (paraguas) y las de borde curvo, siendo las primeras las que más desarrollo tuvieron por parte del arquitecto (Fig. 30) (Ruiz-Funes, J. 2011).



(Fig. 30)

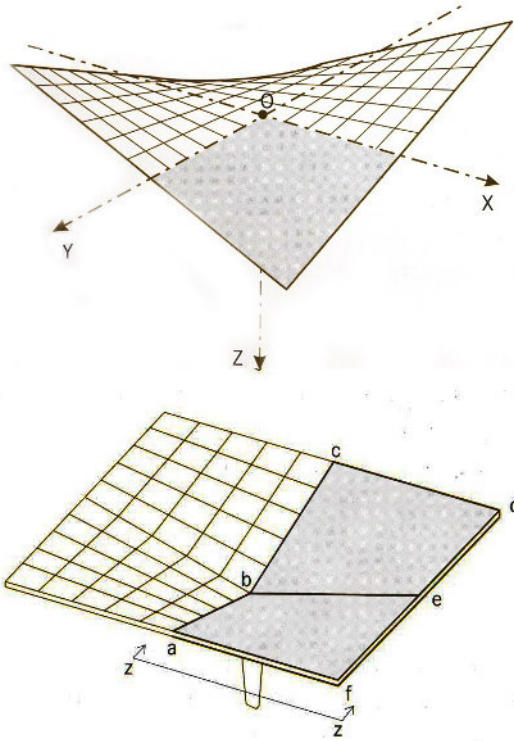
- **Paraboloides Hiperbólicos de Borde Recto.**

Fue la firma constructiva de la empresa *Cubiertas Ala*, fue la más utilizada por Félix Candela y la que más desarrollo tuvo en el campo investigativo. Además de cubrir hangares y mercados, sirvieron también otro tipo de cubiertas de forma llamativas hasta tal punto de adquirir un carácter mucho más escultórico.

Esta estructura singular tuvo su origen en 1936 con el esquema realizado por F. Aimonds, del cual Félix Candela partió para evolucionar en formas más esbeltas y elegantes donde las soluciones incluso han llegado a tener un carácter más atrevido en una de sus obras más destacadas.

- **Descripción**

En sus inicios la estructura de *paraguas*, como se la denominó posteriormente, estuvo formado por cuatro secciones de Hypar unidos por su borde recto, como se aprecia en la Fig. 31, a cada una de estas cuatro secciones se las denominó *tímpano*.



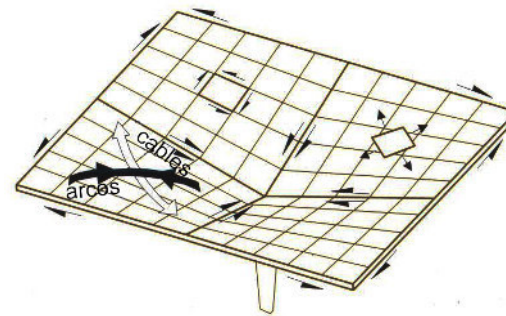
(Fig. 31)

Para el cálculo de estas estructuras Candela utilizó un método que simplificaba sustancialmente su análisis, por un lado utilizó la “teoría de membranas” para determinar las fuerzas de la lámina de cada tímpano, asumiendo uniformidad por parte de las compresiones y tensiones a través de su espesor sin ninguna clase de flexión. (Hasley, S. 2008).

- **Análisis**

El análisis a través de la teoría de membranas que utilizó Candela, indicaba que las direcciones de las fuerzas de tensión y compresión actuaban a  $45^\circ$  de los bordes rectos de la estructura. Se decía entonces que

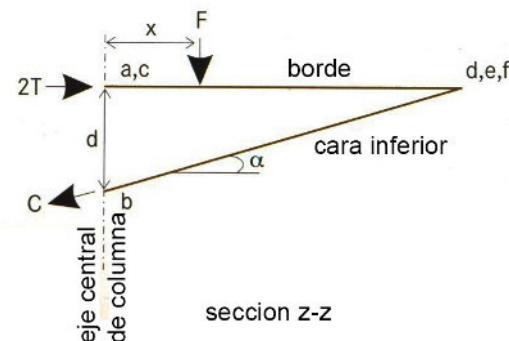
las fuerzas de compresión actuaban como arcos y las de tensión como cables lo que de algún modo explicaba que el mallado para soportar dichos esfuerzos se colocara con una rotación de  $45^\circ$  con respecto a sus bordes (Fig. 32).



(Fig. 32)

Además de este análisis, Félix Candela completó los cálculos de diseño a través del sencillo análisis de voladizos donde se asumía que todas las fuerzas por gravedad y carga eran soportadas por los bordes y la cara inferior que une los tímpanos entre sí.

En la Fig. 33 se puede observar una representación del diagrama con el cual Félix Candela trabajaría para encontrar las tensiones (T) en los bordes así como las compresiones (C) en la cara inferior.



(Fig. 33)

Las fórmulas de análisis fueron las siguientes empezando por el equilibrio de fuerzas, donde:

**Fig. 31:** Diagrama explicativo del origen de la forma de los Hypar de borde recto. (Billington, D. 2008)

**Fig. 32:** Diagrama de la teoría de membranas usada por Candela. (Billington, D. 2008).

**Fig. 33:** Diagrama de cálculo de voladizo usada por Candela para calcular tensiones y compresiones en los hypar. (Billington, D. 2008).

$$F \cdot x = 2T \cdot d$$

Para obtener las tensiones despejamos T y entonces se obtiene que:

$$T = (F \cdot x) / (2 \cdot d)$$

Debido a que la fuerza T es la componente horizontal de la fuerza C, obtenemos que:

$$C = 2T / \cos \alpha$$

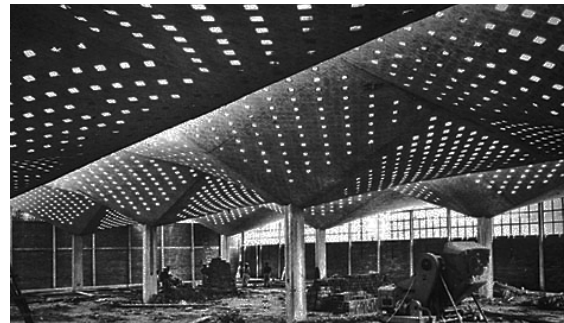
De esta manera se obtienen las fuerzas de compresión en la cara inferior.

Sin embargo, en estudios recientes se ha utilizado la “teoría de elementos finitos” para develar las incógnitas que en su tiempo tuvo Candela, éstos determinaron que en realidad las fuerzas actúan paralelas a los bordes rectos, pero a pesar de este hecho, las estructuras no sufrían deformaciones ni ponían en riesgo la integridad de la estructura debido a su esbeltez, de esta manera los esfuerzos calculados por Candela contaban con la precisión suficiente y así el mallado empleado podía absorber dichos esfuerzos. (Shaaban, A. 1976).

Entre los proyectos que vieron la luz a través del uso de estas estructuras están el *Mercado de Chiclayo* en Perú, el también *Mercado de Coyoacán*, en ciudad de México (Fig. 34) y los hangares para la fábrica *High Life Textile* (hoy bajo el nombre de *Industrias Cavalier*) (Fig. 35) donde Candela utilizó el esquema *Diente de Sierra* (Fig. 36) para el ingreso de luz natural, en éste último a pesar de haber tenido la incorporación de bloques de vidrio en su diseño, éstos no funcionaron debido al excesivo calor que generaban en su interior (Garlock, M. 2008).



(Fig. 34)



(Fig. 35)

Hoy en día los bloques de vidrio están cubiertos por una capa de asfalto impermeabilizante sobre la cubierta, lo cual ha mitigado los efectos del clima.



(Fig. 36)

La gran capacidad de Félix Candela por desarrollar sus estructuras lo llevaron a experimentar con la forma, tanto que a través de dicha inventiva construyó sus obras más apreciadas y que serían reconocidas por todo el mundo.

**Fig. 34:** Mercado de Coyoacán, México D.F. Félix Candela (1955). Museo de Arte de la Universidad de Princeton.

**Fig. 35:** Industrias Cavalier. Coyoacán, México D.F. Félix Candela (1954-1955). Fotografía de Erwin Lang. Museo de Arte de la Universidad de Princeton.

**Fig. 36:** Hangares de Río. Linda Vista, México D.F. Félix Candela (1954). Museo de Arte de la Universidad de Princeton.



(Fig. 37)

El mayor logro con los hypar de borde recto fue la Iglesia de Nuestra Señora de la Medalla de la Milagrosa en Narvarte, ciudad de México, considerada 100% de su autoría por el propio Candela y construida por los años 1953 y 1955 (Fig. 37) y que a lo largo de sus atrevidas líneas pudo conseguir una edificación donde la elegancia y la majestuosidad se unen con el paso de la luz desde el exterior hacia su interior dejando estupefacto a quien tiene la oportunidad de contemplarla.

- **Paraboloide Hiperbólico de Borde Curvo.**

Tras el éxito que supuso la construcción del Pabellón de Rayos Cósicos en la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), Candela pudo realizar edificaciones con una estética y una economía envidiable para cualquier otro profesional.

- **Descripción**

Las estructuras a través del uso de hypars de borde curvo no son otra cosa que una “derivación” de aquellos hypars de borde recto; se podría decir que uno está contenido en la forma del otro.

Félix Candela entendía que la economía de una edificación se encontraba en lograr cubrir el mayor espacio posible con la menor cantidad de material

Sin embargo, el factor determinante de estas estructuras se encuentra en conseguir su estabilidad. Fue el propio Candela quien advertía que una de las principales limitaciones de dichas estructuras se debía a que los esfuerzos han de calcularse con gran exactitud para lograr distribuir las cargas tanto propias como externas a través de la lámina de manera uniforme.

**Fig. 37:** Iglesia de Nuestra Señora de la Medalla Milagrosa. Narvarte, México D.F. Félix Candela (1953-1955). Fotografía de Bruce M. White.

Candela señaló posteriormente: (...) fue en ellas, en las "Estructuras Laminadas", donde el hormigón armado encontró la más racional manifestación de su razón de ser, optimizándose el aprovechamiento de sus características formáceas y adecuo-resistentes. (Candela, F. 1978).

La gran dedicación y el compromiso de Candela hacia su trabajo hizo que lograra la esbeltez de la forma con una gran capacidad resistente, liberando sus bordes (Fig. 38) y dotándola de una racional belleza (Cassinello, P. 2010).



(Fig. 38)

Si bien los elementos de borde eran elementos rigidizadores en las estructuras laminadas, a Candela nunca le fueron de su total agrado. Confesaba Candela que por ejemplo, en la Iglesia de la Medalla Milagrosa no se apreciara del todo la gran esbeltez de su obra por culpa de estos elementos. (del Cueto Ruiz-Funes, J. 2011).

A causa de esta disconformidad, Félix Candela supo entender que la clave para lograr su propósito se encontraba en la simetría, lo que haría que los esfuerzos que eran normales o tangenciales hacia los arcos perimetrales no se produjeran y de esta manera poder eliminar los elementos rigidizadores.

Bajo los encargos de los arquitectos Enrique de la Mora y Fernando López Carmona para las cubiertas de las naves de la parroquia de San Antonio de las Huertas, en 1956 Candela logra diseñar y hacer realidad los primeros hyperpar por arista de borde libre, prescindiendo de elementos indeseados en los arcos

periféricos y dando el ansiado efecto de liviandad que esperaba Candela en sus propuestas (Fig. 39).



(Fig. 39)

#### • Análisis

A diferencia de los paraguas descritos anteriormente, el análisis de las bóvedas era un poco más complejo, pero dado el valor intuitivo y sobre todo la capacidad de simplificación a través del entendimiento de esfuerzos, Candela supo encontrar los métodos necesarios aplicando la teoría de membranas para la estabilidad en sus estructuras.

La forma catenaria dada por los paraboloides hiperbólicos, la simetría en la planta de las edificaciones y sobre todo, el lograr que los esfuerzos de compresión y de tensión recorrieran de manera uniforme el cascarón hasta llegar hacia los apoyos y conociendo las capacidades del material empleado, en este caso el hormigón, fueron las claves que Félix Candela tuvo en cuenta y que supo aprovechar en sus creaciones.

Muestra de ello es la poca información sobre los cálculos previos en sus estructuras, hoy en día se pueden encontrar en los archivos que dejó Candela y que gracias a la tecnología con la que contamos ahora se logran hacer estudios y así comprobar los aciertos del arquitecto hispano mexicano a través de los planos estructurales de sus proyectos.

Los proyectos que más se destacaron mediante el uso de los paraboloides hiperbólicos

Fig. 38: Restaurante los Manantiales. Detalle. Xochimilco, México. Félix Candela (1958). <http://arquitecturamuy mexicana.blogspot.com.es/>

Fig. 39: Vista del primer Cascarón de borde libre. San Antonio de las Huertas, México (1956). Félix & Dorothy Candela Archive, Princeton University



de borde curvo se encuentran: El Laboratorio de los Rayos Cósmicos (1951), la cubierta para la Bolsa de Valores de México (1955), las naves de la parroquia de San Antonio de las Huertas (1956), el restaurante Manantiales de Xochimilco (1958) (Fig. 40), la Capilla de Abierta de Palmira en Lomas de Cuernavaca (1958), y el restaurante del Casino de la Selva en Cuernavaca (1959) y la fábrica de Ron Bacardí en Cuautitlán (1971).

características estructurales, como sus concepciones artísticas y espaciales.

Estas tres últimas serán las que más reconocimiento recibirían a nivel mundial tanto por sus



(Fig. 40)

### CAPILLA DE PALMIRA o LOMAS DE CUERNAVACA

Ubicada en Cuernavaca, estado de Morelos fue diseño de los arquitectos Guillermo Rosell, Manuel Larrosa y Félix Candela, este último como colaborador en el diseño estructural y con quien ya tenían una relación laboral previa (Fabra, C. 1963).

La capilla de la Palmira (Fig. 41) se presentó como una gran oportunidad para llevar un paso más allá los conceptos de los paraboloides hiperbólicos y de mostrar que una forma simple pero bien entendida puede tener una infinidad de posibilidades al momento

de definirla, es así como Félix Candela hace uso de la más simple de las formas que un hyper puede ofrecer, la *silla de montar*, la misma que usó en el proyecto de Los Rayos Cósmicos pero con criterios de mayor envergadura, con un carácter un poco más dramáticos, si cabe la mención, y aspectos que pondrían a prueba la capacidad estructural de la forma y del ya reconocido procedimiento del *borde libre* que el propio Candela se había encargado de afinarlo en proyectos anteriores.

La Capilla de Cuernavaca está formada por dos parábolas idénticas y opuestas, las mismas que se transforman en los apoyos en el terreno transfiriendo

**Fig. 40:** Restaurante Los Manantiales, Xochimilco, México Félix Candela (1957). <https://www.flickr.com/photos/hipodromocondesa/>

las cargas de la estructura al suelo; perpendiculares a éstas se encuentran las dos aberturas que conforman las “bocas” de la capilla, son bordes hiperbólicos donde la diferencia de alturas entre ellos le otorgan la llamativa forma de “*silla de montar*” que la caracteriza, con la particularidad que esta asombrosa estructura se soporta sobre sí misma, es decir, que a diferencia de la primera lámina diseñada por Candela en 1951 (el Laboratorio de los Rayos Cósmicos), la Capilla de Cuernavaca no utiliza tipo alguno de soporte o arco.

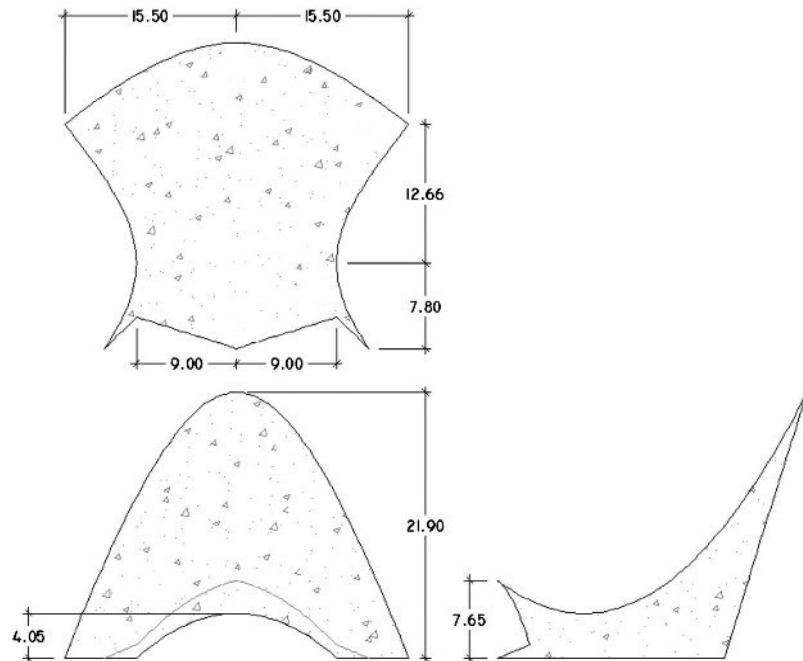


(Fig. 41)

A pesar de ser una estructura auto-portante, Candela incorporó en el arco trasero, el de menor dimensión, una viga que actuaría ante esfuerzos externos del viento (Draper, P. 2007). La lámina de hormigón de la capilla cubre un longitud de aproximadamente 20 metros, las aberturas de los arcos paraboloides salvan luces de 31 y 18 metros respectivamente. La altura máxima actual del arco frontal alcanza los 21,90 metros y la posterior unos 7,65 metros (Fig. 42).

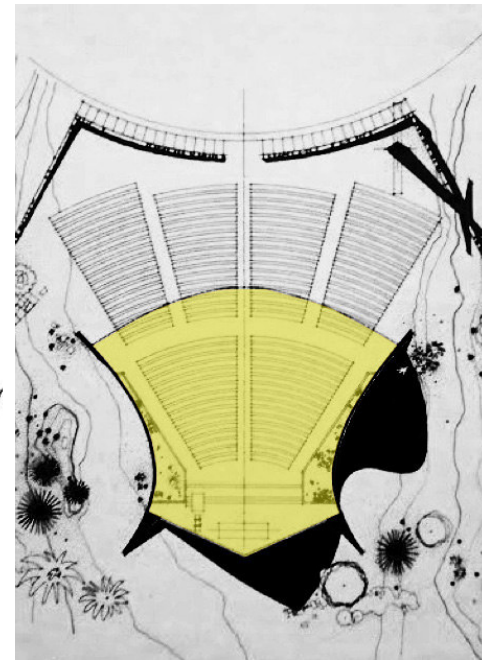
Estaba claro que la luz máxima que soportaban las estructuras laminares de “borde libre” de Candela no debían sobrepasar los 30 metros (Cassinello, P. 2010), límite que ninguna de ellas sobrepasa por más de un metro, y es debido a que los métodos de cálculo se volverían más complejos y sobre todo la esbeltez de los cascarones podría verse afectada por la implementación de elementos de mayor espesor para su rigidización.

Por otra parte el cascarón que había configurado Félix Candela para la capilla de Cuernavaca despliega un manto blanco con un espesor mínimo de 4cm., teniendo en cuenta que las cargas y esfuerzos son



**Fig. 41:** Vista actual de la Capilla de la Palmira, Cuernavaca, México (1958). Fotografía de Bruce M. White.

**Fig. 42:** Dimensiones y Planta de conjunto de la Capilla de la Palmira, Cuernavaca, México (1958). (Draper, P. 2008) y <http://www.pinterest.com> (Daniel Retana)



(Fig. 42)

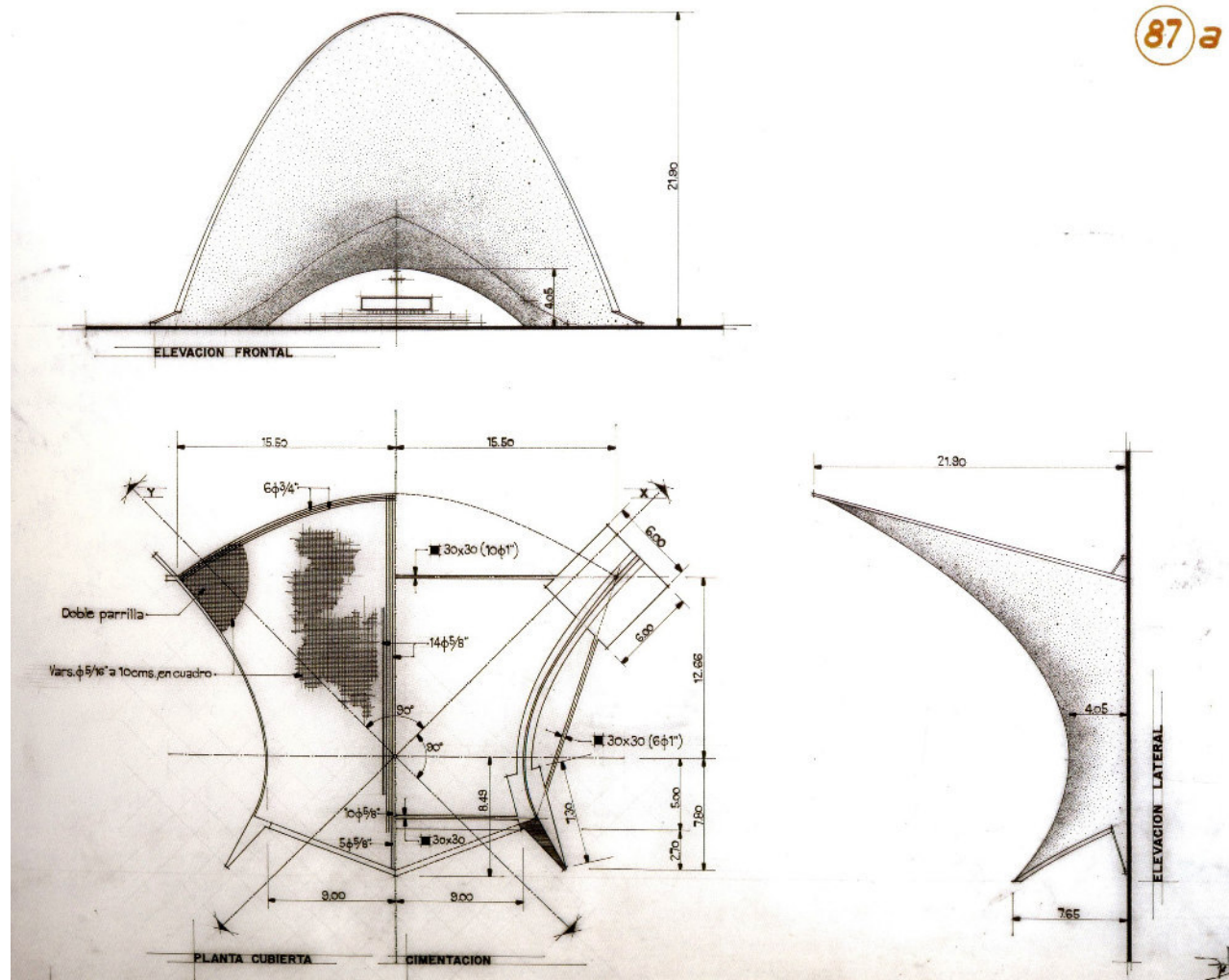
transmitidos al suelo de manera uniforme hacia los apoyos situados a lo largo de sus lados parabólicos.

A lo largo de los lados que sirven de apoyo, la estructura sufre un engrosamiento en la lámina, no se han encontrado todos los detalles específicos de estas regiones engrosadas, con excepción de las observaciones realizadas in situ y publicadas en otros artículos de estudio sobre esta estructura. Por ejemplo, en la base de la abertura más alta, la cáscara llega a tener 52 cm de ancho (Holzer, C. 2008).

#### • Método de cálculo

Se sabe que el método de cálculo que aplicaba Candela a sus estructuras eran sistemas simplificados mediante la teoría de membranas, teniendo en cuenta los esfuerzos más básicos que actuaban en los cascarones de hormigón y que el arquitecto intuía luego de su auto preparación en ese campo.

Muy poca es la información a la que se puede tener acceso en cuanto a los registros de cálculo de estructuras que empleaba Félix Candela, debido a que son muy pocos los documentos que existen

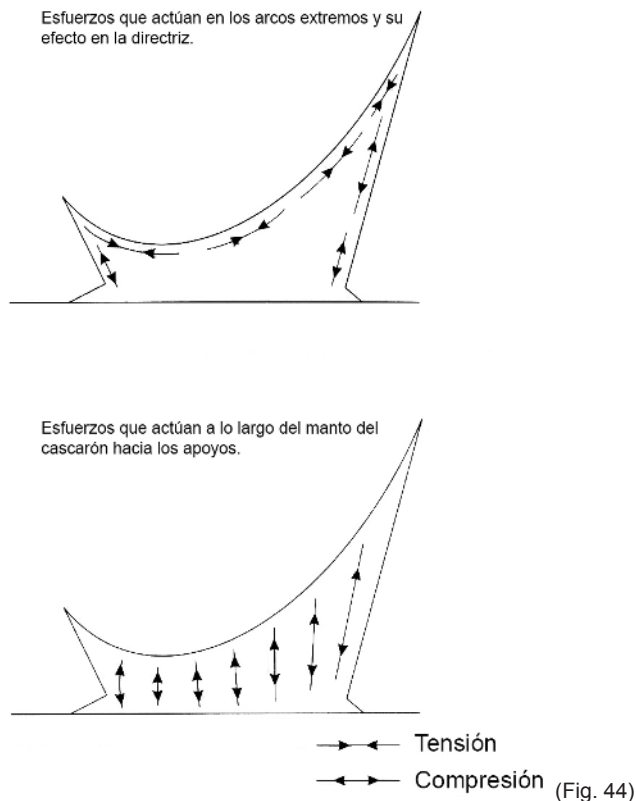


(Fig. 43)

Fig. 43: Capilla Abierta de Cuernavaca. Plano Estructural. México. Félix Candela (1958). Avery Architectural & Fine Arts Library.

en la actualidad; sin embargo, tanto los sistemas computarizados que hoy en día existen, así como los planos estructurales de las edificaciones que permanecen en archivos internacionales (Fig. 43), permiten realizar una comparación entre las soluciones que daba Candela a sus estructuras y los esfuerzos que sobre ellas actúan, llegando de esta manera a comprobar las condiciones reales de los proyectos con las aproximaciones que el arquitecto hispano mexicano obtenía a través de sus cálculos.

En el caso de la capilla de Cuernavaca el flujo de esfuerzos que Candela pudo intuir para definir los refuerzos estructurales necesarios los podemos observar en la ilustración siguiente (Fig. 44), donde la mayor tensión se produce en la directriz del *hypar*. Esto lleva a Candela a colocar un refuerzo de acero extra a lo largo de la “espinas dorsal” de la estructura.



De igual manera que las tensiones, las compresiones son calculadas con esmero por parte de Candela, éste entiende que la distribución de las cargas al suelo tiene su importancia y que la estabilidad de la estructura radica de la relación entre la lámina y sus apoyos (Draper, P. 2007).

En la Fig. 43 podemos observar que aparte del enmallado colocado sobre toda la superficie de la capilla, existe un refuerzo en las bases de la apertura frontal, que según la infografía se trata de un doble emparrillado con varillas de  $\varnothing 5/16''$  a 10cm. Candela entendía que en estos puntos, debido a la gran verticalidad de la abertura y por consiguiente el material que llevaba, soportarían grandes esfuerzos de compresión.

Del mismo modo, para asegurar la correcta distribución de las cargas al terreno la cimentación que Candela diseñó corresponde a los esfuerzos que sobre la lámina se aplican y mediante dos zapatas conectadas entre sí por cadenas rigidizantes, lo que confiere un estado de funcionamiento en conjunto de toda la cimentación, condicionado también a las características del suelo en el que se emplaza la capilla (Fig. 45).



(Fig. 45)

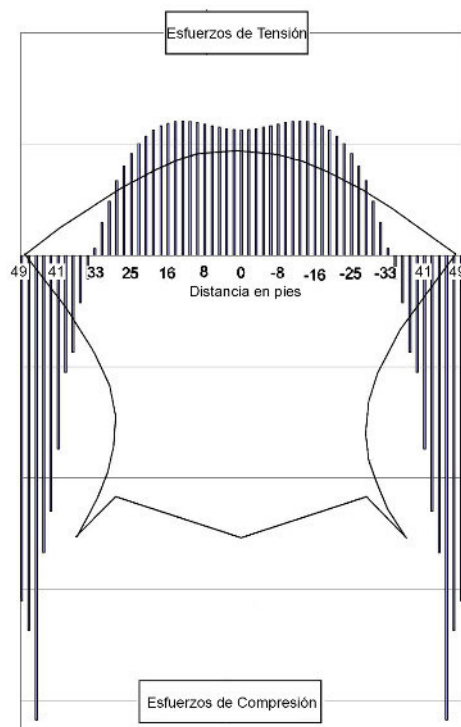
Con el uso de sistemas operativos actuales se ha podido dar paso a la verificación de las respuestas estructurales dadas por Candela. La aplicación de la teoría de los Elementos Finitos se ha llegado a comprobar que Félix Candela entendía a la perfección

las estructuras que diseñaba y que a pesar de tener algún inconveniente en ellas, no sería por fallas de cálculo.

Los resultados que dichas comprobaciones han sido publicadas en varios artículos, siendo los más relevantes el de Basterra, Alfonso (2001), Draper, Powell (2007) y Holzer, Christin (2008). Todos ellos mediante la teoría de los Elementos Finitos.

Dentro de estos artículos, la verificación general se la llevó a cabo con los parámetros de un espesor continuo de la lámina de 4cm. y con la altura de la boca frontal de 21 metros.

En la Fig. 46 que corresponde a la verificación realizada por Powell se pueden apreciar que los resultados dan por acertadas las decisiones dadas por Candela. No solamente en lo que se refiere a actuación de esfuerzos, mostrando también la capacidad que la forma y el material tienen para soportar dichos esfuerzos con márgenes de seguridad muy por encima de sus límites.

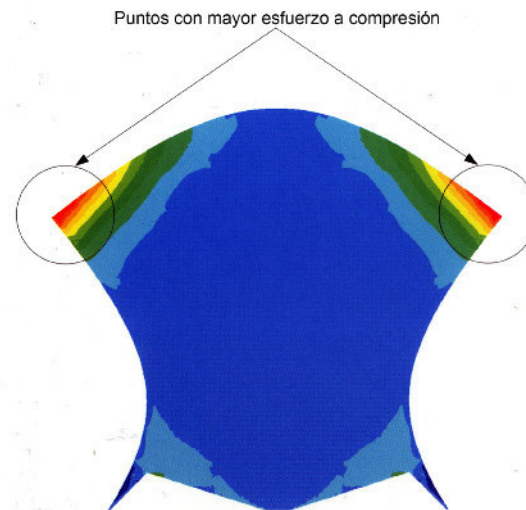


(Fig. 46)

Se estima que en sus estructuras Candela aplicaba un hormigón de características similares. Los datos que se han podido recoger de su trabajo, específicamente de los Hangares del Río, es un hormigón de condiciones modestas, si cabe el término.

Se trata de un hormigón con una resistencia igual a  $1.41 \cdot 10^6$  kg/m<sup>2</sup> (2.000 psi) a la compresión y de 155.000 kg/m<sup>2</sup> (220 psi) a la tracción (Creighton, T. 1955).

Los resultados de las diferentes verificaciones estudiadas arrojaron en su momento datos muy similares obteniendo unos esfuerzos máximos a la compresión de 458.000 kg/m<sup>2</sup> (651psi), de igual manera en el caso de las tensiones y los desplazamientos, donde los resultados estuvieron muy por debajo del máximo admisible (Fig. 47) (Billington, D. 2008).



(Fig. 47)

#### • Encofrados y Cimbra

La construcción de la Capilla de Cuernavaca no fue tarea sencilla, presentó desde sus cimientos situaciones que debían tenerse en consideración.

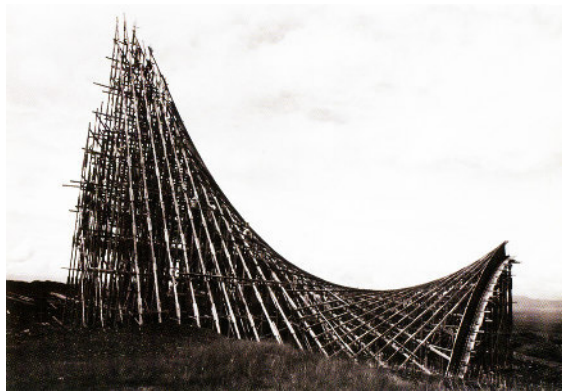
Habíamos dicho anteriormente que los cálculos para la construcción estaban dentro de los parámetros

Fig. 46: Diagrama de esfuerzos a Compresión y Tensión que se producen en la Capilla de Cuernavaca. (Draper, P. 2007).

Fig. 47: Diagrama que muestra los puntos con esfuerzos a Compresión en la Capilla de Cuernavaca. (Draper, P. 2007).

necesarios para su correcta estabilidad y que las fundiciones o cimentaciones estuvieron determinadas por éstos y por las características del terreno; pues bien, el suelo era un suelo de piedra volcánica, pero no cualquiera, se trataba de una piedra denominada *tezontle*, una roca de origen volcánico de condiciones muy livianas debido a su gran porosidad, lo mismo que hacía que tuviera poca resistencia para soportar cualquier tipo de esfuerzo, incluyendo los esfuerzos de resistencia lateral que debía proporcionar el suelo hacia la cimentación (de Garay, G. 1995).

Quizás el tema más complicado al momento de realizar una superficie curva es la concepción de los elementos de encofrado, gracias a las formas regladas de los paraboloides hiperbólicos, Candela logra concebir sus más atractivos proyectos a través de líneas rectas (Fig. 48) reduciendo el costo notablemente al no usar elementos curvos, lo que en su momento significaba un estar un paso adelante en la factibilidad de la construcción. Obviamente, a pesar de las facilidades que proporcionaban los *hypar* al momento de elaborar los encofrados y cimbras necesarios, la mano de obra que se requería para levantarlos debía ser muy numerosa.



(Fig. 48)

**Fig. 48:** Armado de los elementos rectilíneos en la estructura de encofrado en la Capilla de Cuernavaca, México (1958). Félix & Dorothy Candela Archive, Princeton University.

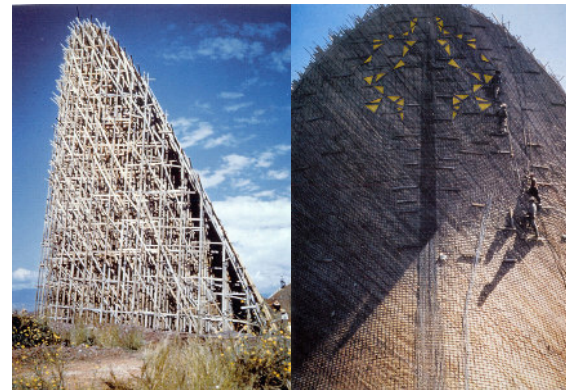
**Fig. 49:** Detalles del encofrado usado en la Capilla de la Palmira. Cuernavaca, México (1958). Félix & Dorothy Candela Archive, Princeton University.

En los años 50 y 60 en México, los encofrados metálicos no se utilizaban, por consiguiente, la estructura que se encargaría de soportar el material era realizado únicamente con madera, las formas regladas facilitaban mucho esta tarea a los albañiles, es difícil pensar que hoy en día se pueda realizar una

estructura de encofrado de similares características, tanto por el material como por su gran envergadura, ya que la mano de obra dispararía los costes de la obra desmesuradamente. La economía que el país mexicano tenía en esos momentos fue un factor a favor de Candela.

La posición de los encofrados estaba diseñada también por Candela, los documentos que formaban parte de la documentación general, mostraban las alturas de cada uno de los elementos rectilíneos que componían la estructura (Fig. 50).

Aquí, debemos hacer una acotación sobre la capilla de Cuernavaca, ésta fue diseñada en una primera instancia con una altura máxima de 24 metros, lo que implica que el trabajo de encofrados y cimbras debían ser de unas características monumentales, lo que podemos comprobar en la Fig. 49, además, la primera propuesta realizada por Candela, incorporaba unas aberturas en el manto, distribuidas de manera simétrica y cercanas al punto más alto lo que hubiera dado un plus en el ámbito estético a la estructura.



(Fig. 49)

Una de las causas por las que las obras de Candela dejaron de ser competitivas fue a causa de la unificación de salarios en la construcción, pues hizo que la mano de obra se encareciera y por tanto las complejas obras de encofrados no pudieran ser solventadas económicamente, pero esto no sucedería

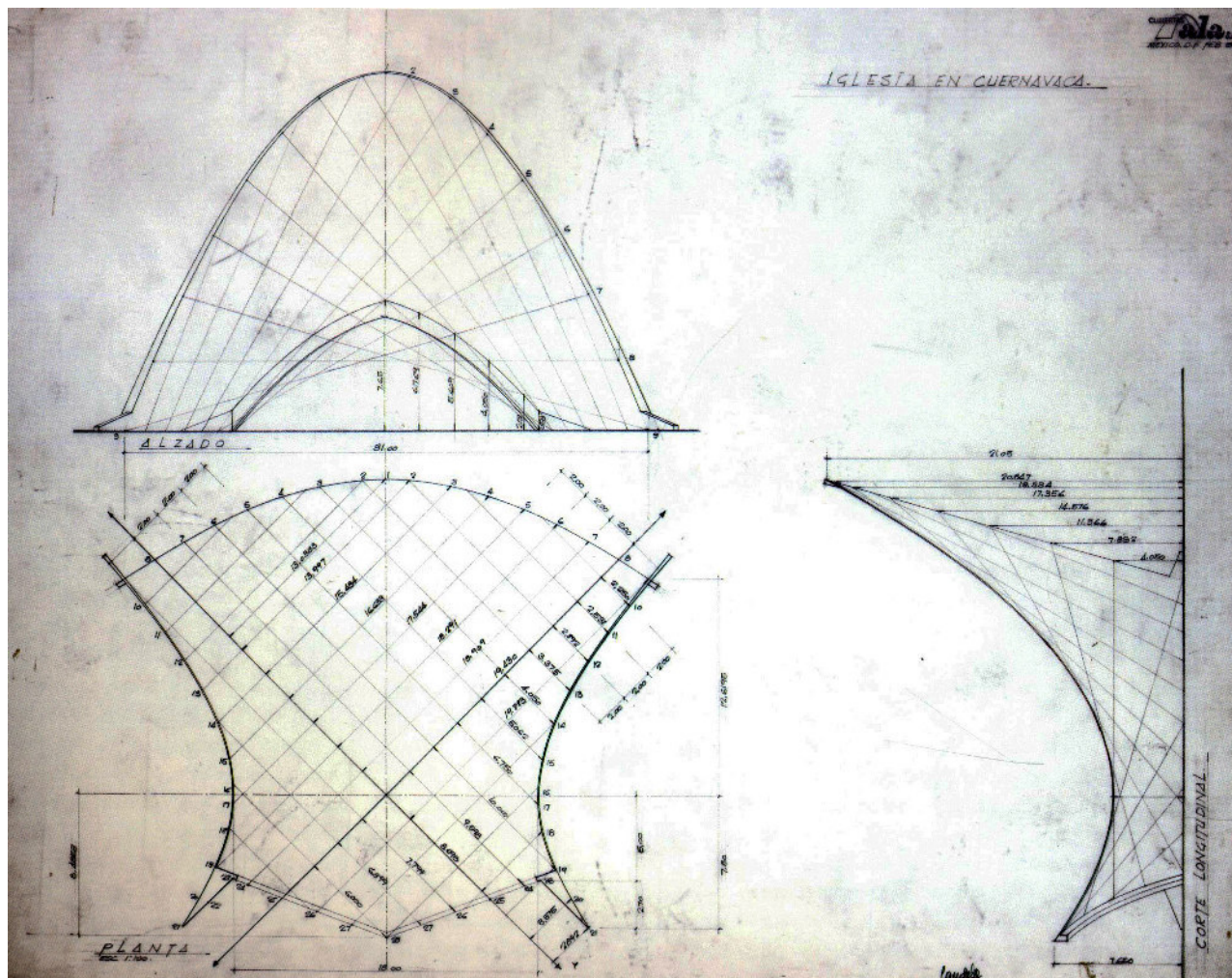
hasta finales de los años 60.

- **Puesta en obra del Hormigón**

Una vez terminada la tarea de encofrado, se daría paso al vertido del material principal y el cual adoptaría la forma pre-establecida por el encofrado y que en los cálculos de diseño debía soportar su peso, así como las acciones externas dadas por el viento y otros fenómenos naturales. Hablamos del hormigón, material por el cual Félix Candela sentía un gran respeto por las condiciones plásticas de éste.

El problema que se presentaba en la capilla de Cuernavaca, así como en otras edificaciones que poseían las formas *hypar* de Candela, no era la calidad del hormigón, que como hacíamos mención en párrafos anteriores constaba de características suficientes para su estabilidad dentro de los esfuerzos acometidos por las estructuras, el mayor problema era el vertido del hormigón en obra.

Dado que en aquellos años no se aplicaba el *hormigón bombeado* y peor aún el *hormigón proyectado*, al menos no ocurría en América Latina, Candela recurría a los métodos tradicionales en dicha



(Fig. 50)

Fig. 50: Capilla Abierta de Cuernavaca. Plano de generatrices para el encofrado. México. Félix Candela (1958). Avery Architectural & Fine Arts Library, New York.

actividad, que no era otra cosa, que el traslado del hormigón a través de verdaderas cadenas humanas, con la ayuda de cubetas y elementos de madera para estabilizar el hormigón recién preparado (Fig. 51).

En el caso de la capilla de Cuernavaca la situación se complicaba aún más, debido a la prominente verticalidad, resultado de la altura que poseía la abertura frontal de la estructura (Fig. 52).



(Fig. 51)

**Fig. 51:** Vertido de hormigón. Restaurante Los Manantiales. Xochimilco, México (1958). Félix & Dorothy Candela Archive, Princeton University.

**Fig. 52:** Detalle del encofrado usado en la Capilla de la Palmira. Cuernavaca, México (1958). Félix & Dorothy Candela Archive, Princeton University.

**Fig. 53:** Detalle del hormigonado en la cáscara inferior. Capilla de la Palmira. Cuernavaca, México (1958). Félix & Dorothy Candela Archive, Princeton University.



(Fig. 52)

No obstante, Candela ya contaba con la experiencia suficiente para poder resolver dicha situación.

En 1955 el arquitecto de origen español terminaba de construir la iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa, obra que constaba de más de una docena de sus *paraguas*, ocho de ellos con inclinaciones muy pronunciadas.

Candela explicaba que cuando él vertía el concreto en superficies tan empinadas como era el caso de la iglesia de la Milagrosa y la capilla de Cuernavaca, era necesaria una mezcla *más seca*, que junto a una armadura de acero más compacta lograba sostener el concreto fresco (Fig. 53). (Billington, D. 2008)



(Fig. 53)

Una vez que el hormigón adquiriera su capacidad estructural, se daría paso al desencofrado, posiblemente uno de los momentos más críticos en toda estructura laminar, una vez más, volviendo sobre el primer diseño de la capilla, debemos acotar que ésta se desplomó al momento de empezar el desmontaje de las cimbras, con la fortuna de no haber causado ninguna clase de daños a personas (Fig. 54).

Luego de lo ocurrido, como frase anecdótica por parte de Candela y para bajar los ánimos, dijo que él “solía cobrar el doble por sus trabajos, debido a que algunas veces, estos fallaban y había que reconstruirlos” (Basterra, A. 2001).





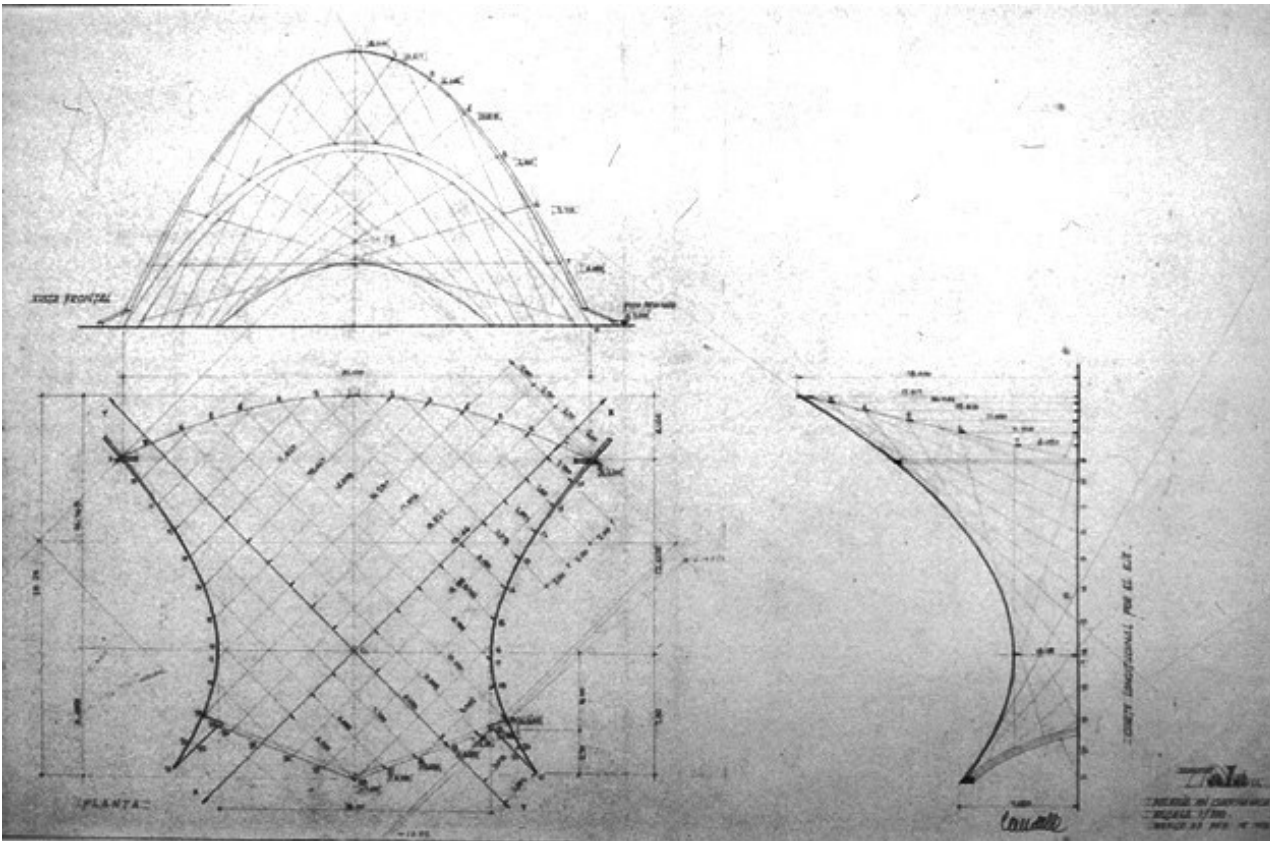
(Fig. 54)

El colapso del primer diseño de la capilla La Palmira, llevó a Candela a replantearse si la altura máxima de la capilla era la indicada, esto llevó al

arquitecto a reducir la altura de la abertura frontal a unos 18 metros aproximadamente, añadiendo también una costilla a media altura de ésta para su rigidización e inclusive se omitieron en el segundo diseño las aberturas en el cascarón (Fig. 55), aduciendo que la discontinuidad de la lámina, pudo haber provocado dicho acontecimiento (Basterra, A. 2001).

En los análisis que se llevaron a cabo en el estudio de la estructura a través de la *teoría de elementos finitos*, se constató que los motivos de colapso no estarían relacionados con los cálculos de dimensionamiento realizados por parte de Candela y que el desplome pudo deberse a motivos relacionados con una mala práctica en el vertido o fraguado del hormigón o directamente en el desencofrado de la estructura (Billington, D.2008).

Finalmente la altura máxima de la capilla se



(Fig. 55)

**Fig. 49:** Capilla Abierta de Cuernavaca. Colapso de la primera estructura. México. Félix Candela (1958). Avery Architectural & Fine Arts Library.

**Fig. 55:** Capilla Abierta de Cuernavaca. Plano de Reforma. México. Félix Candela (1958). Avery Architectural & Fine Arts Library. New York.

determinó a 21 metros aproximadamente y el elemento de rigidización se omitió, solamente se realizó un regreoso a todo lo largo del borde libre, el mismo que aportaría rigidez a la estructura (Cassinello, P. 2010).

- **Revestimientos y/o Acabados**

Las obras de Candela siempre han tenido como propósito el mostrar el material y sus capacidades. En cuanto a los materiales de revestimiento no son otros que el mismo hormigón que se ha vertido en obra y con la huella de los tableros que se usaron el momento del encofrado (Fig. 56).

Pocos son las estructuras que han sido revestidas por un empaste o enlucido en las paredes interiores, más no se han utilizado otro tipo de elementos para cubrirlos.



**Fig. 56:** Detalle del interior de la Capilla de Palmira en Cuernavaca, México. Foto de Bruce M. White. (Billington, D. 2008).

**Fig. 57:** Detalle de la cubierta del restaurante Los Manantiales. Xochimilco, México. Foto de Luis Castañeda (2000). [www.pinterest.com/](http://www.pinterest.com/)

(Fig. 56)

En el caso de las cubiertas, los revestimientos que se han utilizado capas impermeabilizantes para evitar los efectos de la humedad por parte de la lluvia (Fig. 57) que actúa directamente sobre la estructura, un claro ejemplo, es la cubierta del restaurante Los Manantiales donde se puede apreciar que el agua al limpiado la pintura y ha dejado a vista (de aquellos que suben a la estructura en casos excepcionales) del recubrimiento impermeable de color rojo.



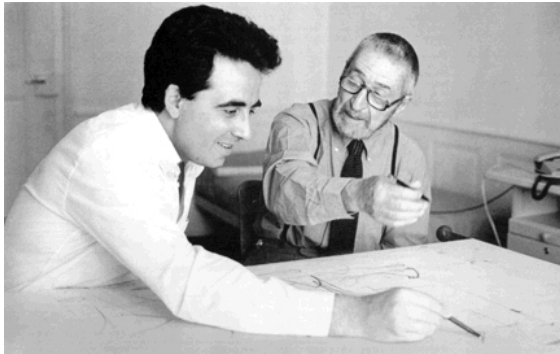
(Fig. 57)

En la capilla de Cuernavaca, la sencillez y las características tanto del material como de la forma utilizada, hacen que la lámina de hormigón se vuelva estructura y revestimiento a la vez, no se tiene constancia de que ésta posea ninguna capa impermeabilizante, de ser el caso, sería algún tipo de esmalte o pintura, para lo cual el mantenimiento sería mínimo.

Sin lugar a dudas, las láminas o cascarones que Félix Candela diseñó son obras que hasta el día de hoy han resistido el pasar de los años y su durabilidad se ha puesto a prueba tras casi sesenta años o más, el buen estado que hoy en día muestran estas estructuras demuestran que una arquitectura atractiva, duradera y funcional puede tener también la característica de ser una pieza sencilla, liviana y sobre todo volverse hitos importantes de las ciudades en las que se emplazan, llenando de emociones a quien puede apreciarlas.

- **Obra póstuma. El Oceanográfico de Valencia**

A finales de los años 90, como parte del proyecto de *La Ciudad de las Artes y las Ciencias* que estuvo bajo la dirección del reconocido arquitecto de origen valenciano Santiago Calatrava se decidió que un aporte interesante sería tener una obra de Félix Candela, sobre todo, debido a la gran admiración que tenía Calatrava hacia Candela (Fig. 58).



(Fig. 58)

A un extremo del antiguo cauce del río Turia, el cual luego de la riada del año 1957 que trajo consigo un devastador daño para la ciudad fue desviado al sur de la ciudad y convertido en un parque lineal de gran extensión recorriendo toda la ciudad de Valencia, se sitúa el complejo de La Ciudad de las Arte y las Ciencias, conformada por cinco grandes edificaciones entre ellas el proyecto del Oceanográfico (Fig. 59) (Landa, A. 2010).



(Fig. 59)

A su vez el Oceanográfico se trata de un enorme complejo de investigación sobre la vida marina no sólo de la región sino con un carácter universal, con sus 80.000 m<sup>2</sup> de extensión (Vinat, S. 2011) que cada año atrae a miles de turistas (el mayor acuario de Europa con más de 500 especies marinas) (Landa, A. 2010).

En este proyecto Candela decide realizar una reproducción de su afamado cascarón del restaurante Los Manantiales de Xochimilco (Fig. 60), con algunas variaciones en sus dimensiones, debido a las exigencias del Código Técnico de la Edificación.



(Fig. 60)

Algunas de las diferencias entre los restaurantes de Xochimilco y de Valencia se pueden ver en la siguiente tabla comparativa:

	Los Manantiales	Oceanográfico
<b>Dimensiones Generales</b>	42,4m * 42,4m	46,15m * 46,15m
<b>Altura mínima</b>	5,90 mts.	8,12 mts.
<b>Altura máxima</b>	9,95 mts.	12,75 mts.

**Fig. 58:** Santiago Calatrava junto a Félix Candela. Fuente: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com.es/2009/05/calatrava-estacion-orientel-isboa.html>

**Fig. 59:** Vista general del complejo del Oceanográfico en Valencia, España. Fuente: <http://minuevocasa.blogspot.com.es/2011/11/loceanografic.html>

**Fig. 60:** Arriba el restaurante Los Manantiales en xochimilco México (1957). Abajo el restaurante del Oceanográfico en Valencia, España (2005). Fuentes:  
 - <http://www.deutsches-museum.de/presse-2011/felix-candela/>  
 - <https://www.studyblue.com/notes/note/n/lecture-13-latin-america-and-japan/deck/6637179>

	<b>Los Manantiales</b>	<b>Oceanográfico</b>
<b>Espesor de la Láminade H°</b>	4 centímetros	6 centímetros
<b>Características del Hormigón</b>	Hormigón simple elaborado en situ con resistencia $1,41 \cdot 10^6 \text{Kg/m}^2$	H° con fibras de vidrio elaborado en laboratorio con resistencia de $30 \text{N/mm}^2$
<b>Vertido del H°</b>	Manual	Mecánica (H° proyectado)
<b>Protección exterior</b>	Rasante de H° con láminas impermeabilizantes	Capas de resinas epóxicas impermeabilizantes sobre malla de fibra de vidrio

Lamentablemente, antes que se iniciaran los trabajos de construcción, Félix Candela fallece en 1997 en los Estados Unidos de Norteamérica, por lo que el restaurante del Oceanográfico se convirtió en la obra póstuma del arquitecto hispano mexicano.

Luego del lamentable deceso de Candela los trabajos del restaurante del Oceanográfico estuvieron bajo la dirección de los técnicos Alberto Domingo Cabo, Carlos Lázaro Fernández y José María Tomás Llavador como colaborador (Vinat, S. 2011).

A diferencia del restaurante de Xochimilco, el restaurante en Valencia es un proyecto donde la tecnología y las nuevas técnicas constructivas demostraron que aún se pueden realizar muchos avances dentro de la investigación en obras con láminas de hormigón.

El análisis a través de sistemas operativos como SAP ayudan a definir con gran exactitud los esfuerzos que actúan sobre las láminas, esto ayudó

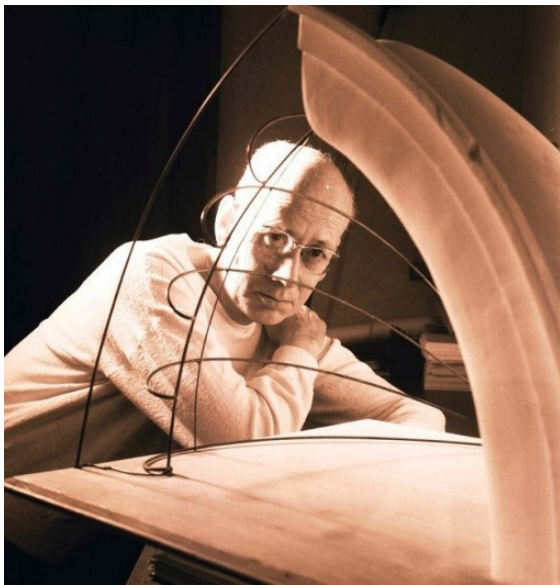
para la incorporación de fibras en el hormigón para solventar algunos de los esfuerzos e incluso para llegar a pensar que se puede prescindir de algunos elementos constructivos como las *armaduras pasivas* (Vinat, S. 2011) que en el caso de Candela fueron fundamentales para absorber los esfuerzos de tensión.

Siguiendo con este proceso, el diseño de las cimbras y encofrados también se convirtió en un reto para los técnicos encargados del restaurante del Oceanográfico, que supieron salir adelante con una solución adecuada y sobre todo sencilla que no produjo excesos en el armado de los mismos pero que requirió paciencia y mucha dedicación desde el principio hasta el desmontaje de los mismos que lo comentaba el propio Carlos Lázaro en un encuentro tras una conferencia de la Universidad politécnica de Valencia.

Está claro que Félix Candela fue un verdadero maestro en el tema y que es posible que hoy en día nos encontremos con ciertos obstáculos al momento de construir este tipo de edificaciones, sin embargo, sabemos que todo es parte de un proceso de experimentación y de análisis para obtener la mayor ventaja que los cascarones nos puedan aportar y que el restaurante del Oceanográfico en Valencia es un ejemplo de muchos otros cascarones que se realizan en el mundo gracias al legado de Félix Candela Outeriño.

## EDUARDO TORROJA MIRET: EL MERCADO DE ABASTOS DE ALGECIRAS (BAHÍA DE GIBRALTAR, ESPAÑA. 1933-1935).

Ingeniero de Caminos, Eduardo Torroja Miret (Fig. 61), nace un 27 de agosto de 1899 en la ciudad de Madrid, España, a sus 62 años fallece en la misma ciudad el 15 de junio de 1961.



(Fig. 61)

Dedicado no sólo a la actividad de la construcción, también fue un renombrado docente e investigador en el campo de las estructuras. Su

incursión en el ámbito profesional empezó poco antes de obtener su licenciatura como ingeniero en 1923, fue llamado a trabajar junto a su maestro, el profesor José Rivera en la empresa de éste, Hidrocivil (Arnau, F. 2014).

Fundador del ITCE (Instituto Técnico de la Construcción y Edificación) en 1927, así como de la revista Hormigón y Acero en 1934. Fue director del Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento, institución que fue creada tras la unión del ITCE y el CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), donde por primera vez en 1948 se publica los *Informes de la Construcción*, recogiendo los avances científicos, técnicos y arquitectónicos, nacionales e internacionales, dándose a conocer las obras de Saarinen, Aalto, Nervi, Salvadori, Neutra, Le Corbusier, Lloyd Wright, Van der Rohe, Hossdorf o Candela entre otros (Fundación Eduardo Torroja, 2014).

Para 1954 junto a otros profesionales y tras la fusión de varias asociaciones se crea el ACHE (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural) (Arredondo, F. 1977).

Co-fundador y primer presidente de la International Association for Structural Shells (IASS) en 1959, asociación que sería renombrada luego como Association for Shell and Spatial Structures. (Arnau, F. 2014).

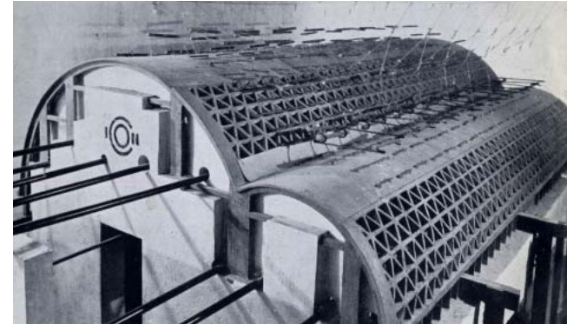
**Fig. 61:** Eduardo Torroja Miret en su despacho junto a un modelo a escala de uno de sus proyectos. (1952). Fotografía: Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja".

Eduardo Torroja, fue profesor de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid a partir de 1939 de la asignatura de “Cálculo de Estructuras”. A partir de este momento, su dedicación a la docencia universitaria le acompañará hasta su muerte. A lo largo de los años, Eduardo Torroja Miret impartió diferentes asignaturas en la Escuela; Resistencia de Materiales y Elasticidad, Fundamentos de Cálculo y Ejecución de Obras de Hormigón Armado y Pretensado, Cálculo de Estructuras y Tipología Estructural. (Fundación Eduardo Torroja, 2014).

Eduardo Torroja fue colaborador de varios proyectos de carácter arquitectónico, entre las obras más representativas se encuentran:

El Mercado de Algeciras (Fig. 62) en la Bahía de Gibraltar (1933), El Frontón de Recoletos en Madrid (1935) (Fig. 63) que lastimosamente se desplomó tras bombardeos ocurridos durante la Guerra Civil, Los Graderíos del Hipódromo de la Zarzuela (1935) también en Madrid (Fig. 64), fue nombrado como Monumento Histórico en 1980 y fue sometida a un proceso de restauración en 2008, y la Iglesia de San Nicolás de Bari en el Grao de Gandía (Fig. 65) terminada en 1962 y que Torroja no pudo verla finalizada debido a que falleció un año antes.

Eduardo Torroja también realizó varias obras civiles como viaductos, puentes y acueductos (Fig. 63).



(Fig. 63)



(Fig. 64)



(Fig. 62)

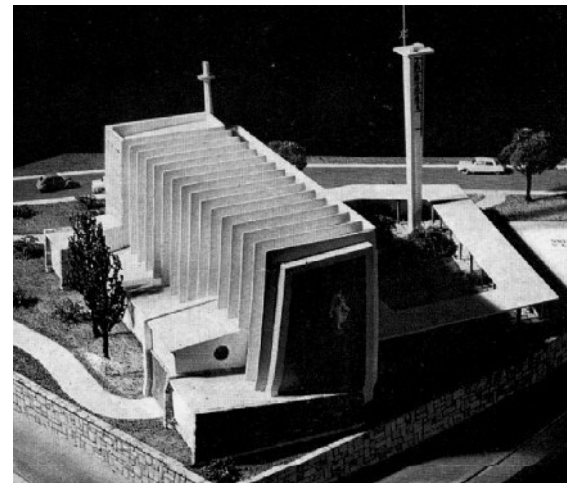
**Fig. 62:** Mercado de Algeciras. Bahía de Gibraltar, España. Eduardo Torroja (1933). (Krivoshapko, S.N. 2014).

**Fig. 63:** Frontón de Recoletos. Maqueta de Estudio. Madrid, España. Archivo Eduardo Torroja (1935). (Fabra, J. 2012).

**Fig. 64:** Hipódromo de la Zarzuela. Madrid, España. (1935). Fotografía: Junquera Arquitectos. (Fabra, J. 2012).

**Fig. 65:** Iglesia de San Nicolás de Bari en el Grao. Gandía, España. (1962). Modelo a Escala. Archivo Torroja. (Nuñez-Collado, G. 2013).

A demás de las obras antes mencionadas, también intervino en la construcción de la Iglesia de Pont de Suert en Lérida y en el diseño de la cubierta para el Club Táchira en Caracas, Venezuela, proyecto que no llegó a hacerse realidad.



(Fig. 65)

## MERCADO DE ABASTOS “EDUARDO TORROJA” en ALGECIRAS

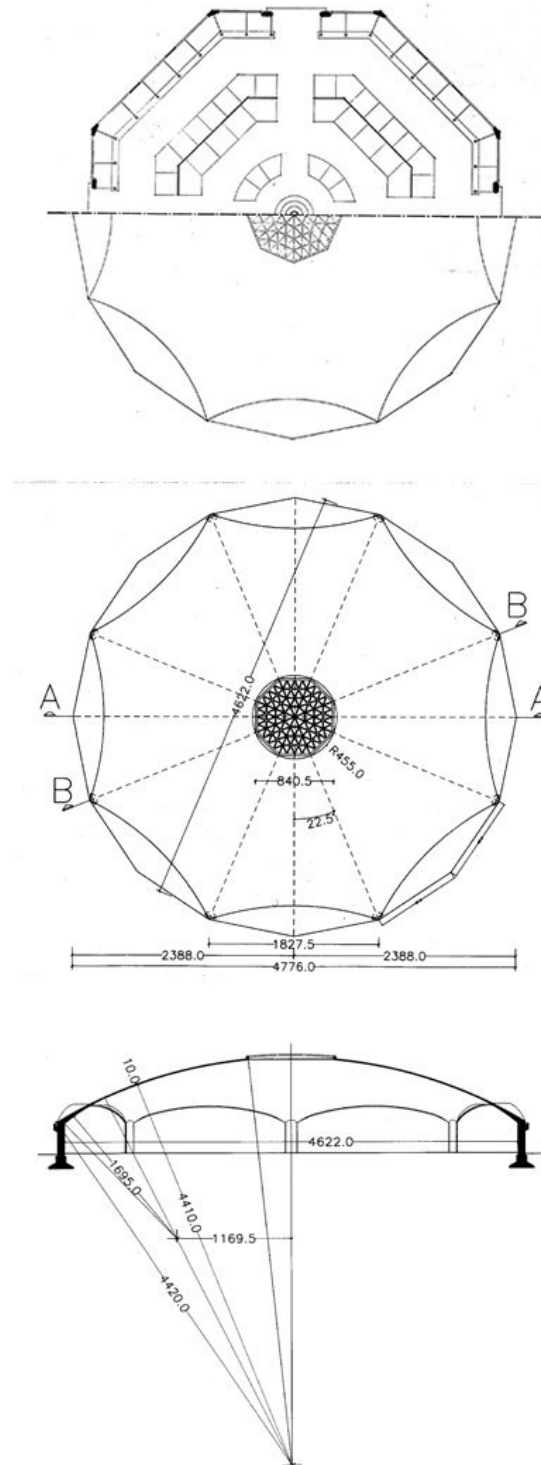
El Mercado de Abastos de Algeciras se proyecta en 1933 como una propuesta del ingeniero Eduardo Torroja Miret en colaboración con el arquitecto y urbanista Manuel Sánchez Arcas tras la paralización de la entonces construcción del “nuevo” mercado por problemas de seguridad para los transeúntes, debido a que la edificación se situaría a las afueras de la ciudad , cerca de la carretera general, esto ocurría en el año de 1929 (Sierra, M.R.1989).

Situado en la Plaza de Nuestra Señora de la Palma, el proyecto definido por Eduardo Torroja está compuesto por una planta de forma octogonal de 18,20 metros de largo, con cuatro accesos hacia el espacio comercial, la estructura principal consta de ocho columnas en cada uno de los vértices de la planta más columnas de carácter secundario en las caras perimetrales de la planta acompañadas con mamposterías de ladrillo.

La cubierta está formada por una cúpula laminar de hormigón armado inscrita en una plata octogonal (Sierra, M.R. 1989), la misma que se encuentra apoyada únicamente en las ocho columnas de los vértices (Fig. 66 y Fig. 67). Con un radio de 44,1 metros y un espesor mínimo de 10cm que va incrementando gradualmente hasta llegar a 52 centímetros en los apoyos, lo que permite la correcta distribución de cargas. Esta cubierta es el elemento que caracteriza a esta obra, ya que fue una de las primeras obras de estas características en ser construida en la Península Ibérica (Fabra, J. 2012).

La estructura de columnas está coronada por un anillo de hormigón reforzado. La función de éste es la de absorber y equilibrar las tensiones producidas por el domo, evitando así que la cúpula ceda en sus apoyos. El anillo está compuesto por 16 varillas de acero tensionadas (Fig. 67), las mismas que fueron recubiertas por concreto una vez puestas en tensión.

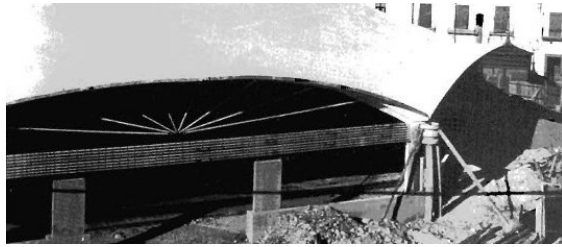
La forma octogonal de la planta se conecta con la forma cilíndrica de la cubierta a través de ocho bóvedas en voladizo (Fig. 67). Estas bóvedas además de brindar ventilación y una protección evidente contra el ingreso de agua al complejo, tienen la función de evitar deformaciones de la cúpula y ayudan al encausamiento de esfuerzos producidos por ésta hacia



(Fig. 66)

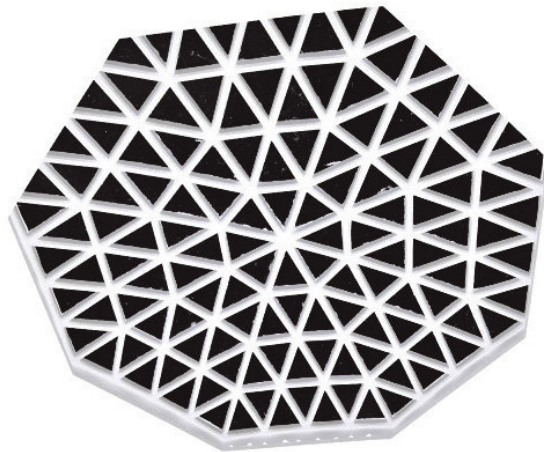
Fig. 66: Diagramas generales en planta y sección del Mercado de Algeciras. (Sierra, M.R. 1989 y Antuña, J. 2002).

los apoyos (Sierra, M.R. 1989).



(Fig. 67)

La cubierta tan particular proyectada por Torroja agrega un elemento en su punto más alto, se trata de un lucernario que permite el ingreso de luz cenital al complejo comercial y que está conformado por un anillo rigidizador de 9,1 metros de diámetro, así como de una peculiar retícula conformada por 128 paneles que forman cuatro octágonos concéntricos incluyendo el anillo periférico (Fig. 68).



(Fig. 68)

**Fig. 67:** Mercado de Algeciras. Etapa de construcción del anillo periférico. Archivo Eduardo Torroja. (Fabra, J. 2012).

**Fig. 68:** Detalle del lucernario del Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja. (Fabra, J. 2012).

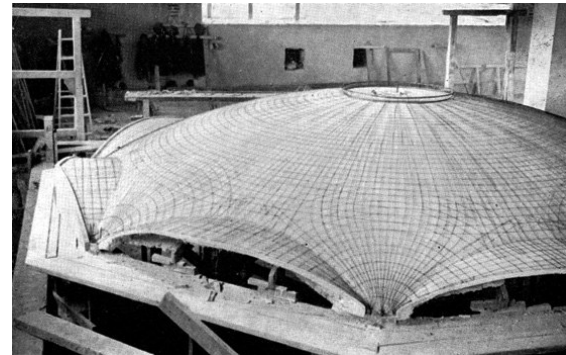
**Fig. 69:** Modelo a escala del Mercado de Algeciras para pruebas de laboratorio. Archivo Eduardo Torroja. (Antuña, J. 2002).

## • Método de cálculo

La estructura laminar de doble curvatura utilizada para la cubierta del mercado supone un análisis complejo y difícil de afrontar mediante procedimientos simplificados, sin embargo, el ingeniero español utilizando la teoría de membranas logra cálculos muy aproximados y de gran utilidad para demostrar la estabilidad de la estructura, prueba de ello, es los presentados en la memoria del proyecto que se presentó al ayuntamiento, donde Eduardo Torroja indica que el análisis de dicha estructura que:

*(...) al disminuir el espesor y prescindir de los esfuerzos de flexión se pueden considerar como una membrana rígida, (...), aunque quedan flexiones que hay que controlar (Antuña, J. 2002).*

No obstante, el cálculo como un elemento único fue difícil de afrontar, Torroja tenía claro que los distintos elementos que componían la lámina aportaban a la misma diferentes esfuerzos que no podían ser calculados en una misma ecuación, de esta manera, el análisis toma cuatro apartados que luego serán verificados, con lo que podríamos decir, fue un hito importante en el método de cálculo dentro de las estructuras experimentales, el uso de modelos a escala (Fig. 69).

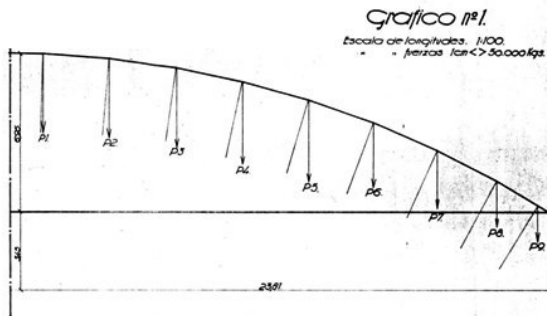


(Fig. 69)

En primer lugar, se calcularon los esfuerzos dentro de la cúpula, el elemento de mayor superficie dentro en la estructura laminar. En el cálculo, la lámina se dividió en nueve secciones concéntricas,

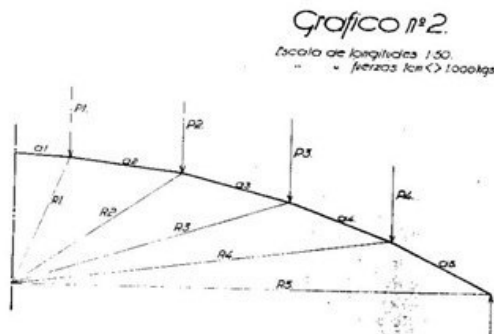


prescindiendo de la presencia del lucernario central, donde las condiciones por peso propio y cargas externas serían calculados en estos puntos (Fig. 70), prescindiendo de los esfuerzos de flexión y los cortantes, gracias al espesor de la lámina (Antuña, J. 2002).



(Fig. 70)

Los arcos comprendidos entre las columnas de apoyo de la cubierta analizan de manera independiente, a través de la utilización de un polígono funicular (Fig. 71), en este caso, los esfuerzos de compresión en el arco son definidos en los puntos que generan la intersección de los radios de la poligonal con la curvatura directriz (Antuña, J. 2002), similar al utilizado para el cálculo de la lámina principal y sonde ya se conocen las cargas por peso propio.



(Fig. 71)

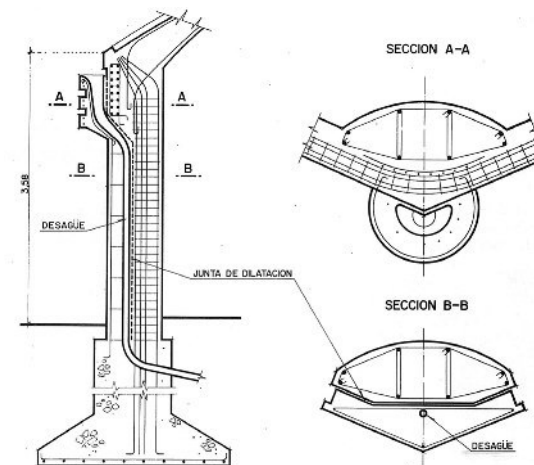
El análisis a través de la teoría de membranas permitió a Eduardo Torroja establecer las tensiones que

en la cúpula actuarían, de manera que ésta ayudaría al cálculo del refuerzo, el mismo que constaría de una malla de acero paralela a la base circular de la cubierta.

El análisis del lucernario ubicado en el centro de la cubierta, fue más sencillo, debido a que las cargas generadas por la estructura reticulada y el acristalamiento eran mucho menores que al haber considerado como elemento cerrado a la cubierta, lo que facilitó a Torroja en el diseño.

Un dato curioso y que se encontró en los escritos sobre los resultados obtenidos en el laboratorio con el modelo a escala, es que una hora después de haber puesto en carga al modelo y de que Torroja y sus colaboradores estuvieran dentro de la misma estudiando los diferentes comportamientos del modelo, éste se desplomó, sin consecuencia personal alguna ya que no se encontraba nadie trabajando en esos momentos. Torroja alegó que un mal armado del acero de refuerzo en el anillo de borde (Antuña, J. 2002).

El cuarto y último componente que se analizó independientemente fueron el anillo periférico y las columnas de apoyo. con todas las cargas y esfuerzos definidos, no presentaría mayor dificultad al momento de su cálculo (Fig. 72). El detalle característico en el diseño fue el tensado de los hierros de refuerzo del anillo, tensados antes del vertido del hormigón.



(Fig. 72)

**Fig. 70:** Diagrama de cálculo de esfuerzos en la Lámina de la cúpula del Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (Antuña, J. 2002).

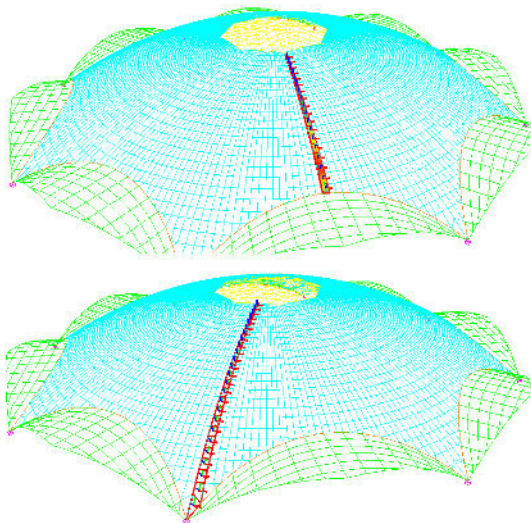
**Fig. 71:** Diagrama de cálculo de esfuerzos en las bóvedas periféricas del Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (Antuña, J. 2002).

**Fig. 72:** Detalle constructivo de las columnas de apoyo y del anillo periférico en el Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (Sierra, M.R. 1989).

Las comprobaciones de los esfuerzos que intervienen en la estructura y que fueron calculados y analizados por Eduardo Torroja se han realizado mediante la teoría de los Elementos Finitos, que no podían de ser de otra manera, han dejado constancia de la capacidad y la gran aproximación de los resultados.

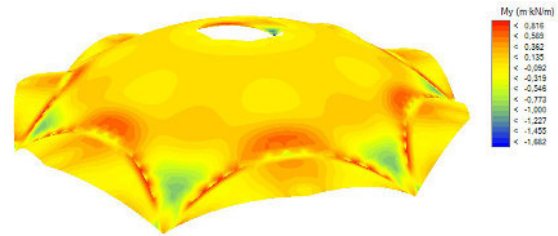
En la Fig. 70 se han escogido dos bandas pertenecientes a la cúpula principal, una que parte desde el centro de los arcos periféricos de la cubierta y otra que inicia desde uno de los ocho apoyos de la estructura, ambos casos toman en cuenta el elemento del lucernario central, los resultados generales arrojan momentos máximos de  $540\text{KN/m}^2$  y  $580\text{KN/m}^2$  respectivamente con respecto a los elementos paralelos y meridianos del modelo.

Por otro lado, tanto en los resultados a la flexión como a los esfuerzos de compresión y tracción, identifican la eficacia de la estructura con valores dentro, con amplio margen, de las capacidades de los materiales así como de los niveles de seguridad exigidos (Fig. 73-76) (Fabra, J. 2012).

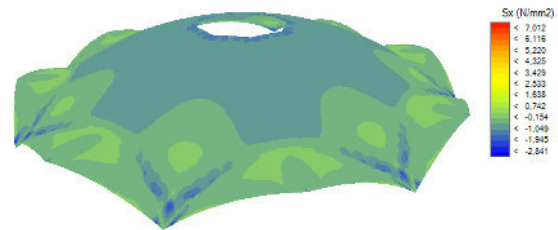


(Fig. 73)

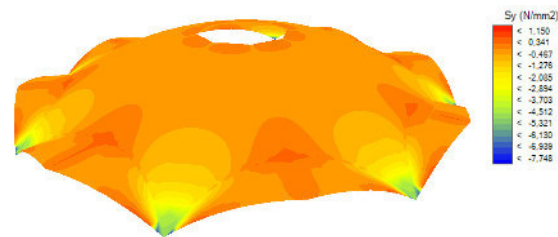
Fig. 73-76: Diagramas resultantes del estudio de comprobación mediante la teoría de los elementos finitos. (Fabra, J. 2012).



(Fig. 74)



(Fig. 75)



(Fig. 76)

#### • Encofrados y Cimbra

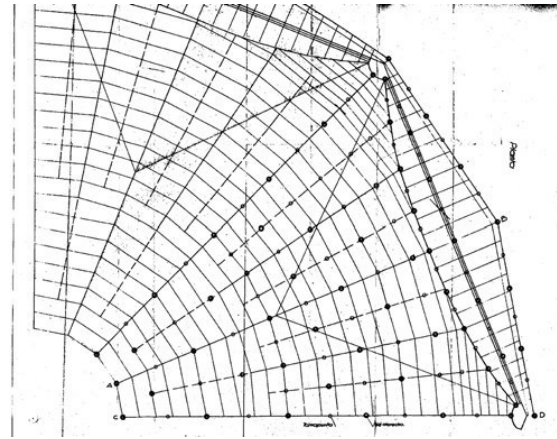
Los encofrados y cimbras utilizados en el proceso de construcción fueron cuidadosamente analizados por Eduardo Torroja debido a que en aquellos años no se contaba con información exacta para construcciones de este tipo en España.

La fabricación de éstos se los debió haber realizado mediante elementos de madera, como puede intuirse al observar la Fig. 77, la misma que muestra parte de la estructura de cimbras en una etapa anterior a la colocación de los encofrados y que Torroja había detallado en los planos de construcción del edificio (Fig. 78 y Fig. 79).

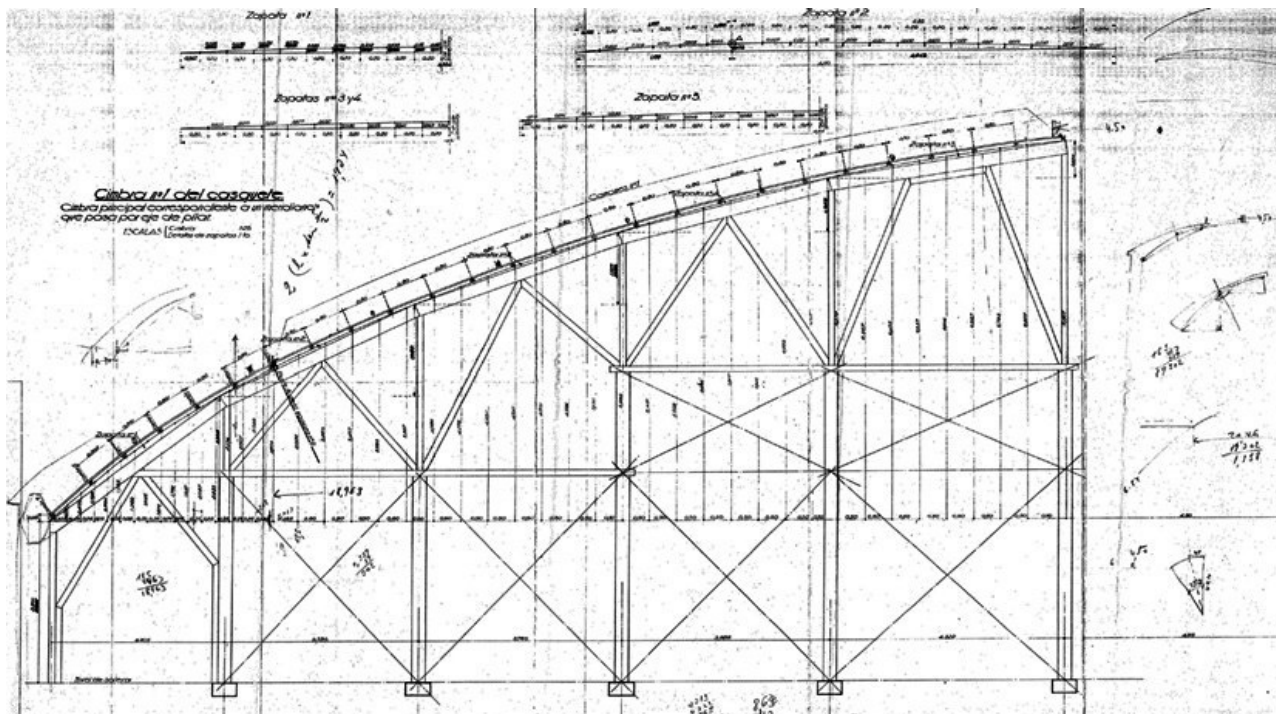


(Fig. 77)

Dentro de este tipo de encofrados, parte más compleja es el poder otorgar la forma curva mediante elementos rectos como son las vigas de madera o hierro, así mismo este pequeño detalle hace que la mano de obra sea de confianza, y fue esta confianza que depositó Torroja en las manos del constructor



(Fig. 78)



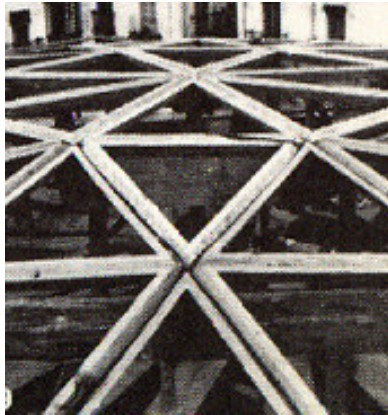
(Fig. 79)

Ricardo Barredo, que ya había sido encargado de la obra del acueducto de Tempul, obra realizada también por Eduardo Torroja (Fabra, J. 2012).

**Fig. 77:** Fotografía que muestra el complejo armado de los encofrados y cimbras del Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (Revista del I.E.S. Ventura Morón, 2014). <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/iesventuramoron/titular03.htm>

**Fig. 78:** Plano Explicativo de la distribución del andamiaje y encofrado del Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (Antuña, J. 2002).

**Fig. 79:** Detalle constructivo del cimbrado en el Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (Antuña, J. 2002).

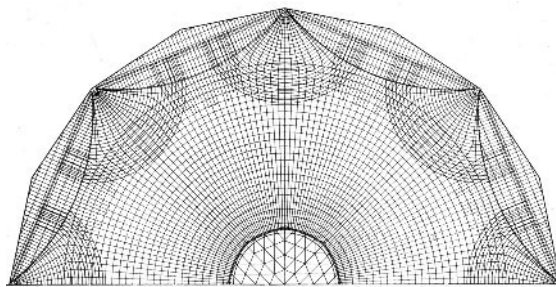


(Fig. 80)

- **Puesta en obra del Hormigón**

Como es conocido, los principales materiales que componen la cubierta del mercado de Algeciras son el hierro y el hormigón.

Una vez terminada la intrincada tarea de armado de las cimbras y encofrados y siguiendo las indicaciones de Eduardo Torroja, se procedió a la colocación de los refuerzos de hierro, éstos estaban distribuidos de tal manera que se generaba una malla cuadrangular sobre toda la superficie de la cubierta (Fig. 81).



(Fig. 81)

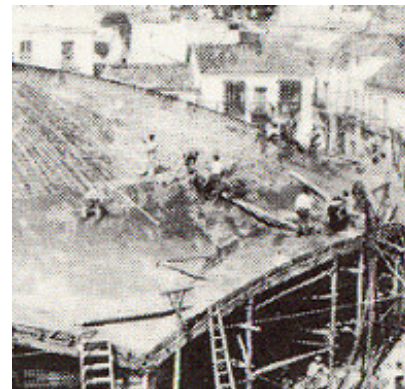
De acuerdo a los cálculos de tensiones que había realizado el ingeniero español podemos apreciar los refuerzos, en este caso un doble mallado, en los puntos donde se apoya la lámina con las columnas de la planta octogonal del mercado (Fig. 82), así como un

refuerzo de barras de acero en donde se intersecta la cúpula con las bóvedas perimetrales, los mismos que evitan cuarteamientos o fisuras en esos puntos críticos.



(Fig. 82)

Si observamos la Fig. 83 nos daremos cuenta que el hormigonado de la cubierta se la ha realizado de forma tradicional, donde son los obreros quienes vierten las cubetas de hormigón, debido a la inexistencia de más documentos que muestren con más detenimiento esta etapa, deducimos que no fue necesaria una mano de obra numerosa dentro de esta etapa de la construcción.



(Fig. 83)

**Fig. 80:** Encofrado perteneciente al lucernario del Mercado de Algeciras. Bahía de Gibraltar, España. Archivo Eduardo Torroja (1933).

**Fig. 81:** Dibujo del acero de refuerzo para el Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (1933).

**Fig. 82:** Puesta en obra del acero de refuerzo del Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (1933).

**Fig. 83:** Puesta en obra del hormigón en el Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja (1933). Revista del I.E.S. Ventura Morón. 2014). <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/iesventuramoron/titular03.htm>

- **Revestimientos y/o Acabados**

Los acabados del Mercado de Abastos en Algeciras son de carácter muy sencillos, se basan en mostrar los materiales empleados, sin ningún otro tipo de recubrimientos, exceptuando algún aplicado de pintura sobre el establecimiento.

Las paredes de mampostería de ladrillo caravista, también son un reflejo de la ventaja de trabajar con este material (Fig. 84).

El único cambio considerable que ha sufrido, ha sido con el mobiliario interior, que en primera instancia fue de carácter portátil que hoy en día se mantienen de mampostería (Sierra, M.R. 1989).

Han pasado cerca de 80 años desde su finalización y el mercado mantiene su estructura intacta hasta la fecha, el correcto mantenimiento de sus instalaciones han permitido que los trabajos sean mínimos.



(Fig. 84)

Su formalidad y fácil acceso desde cualquier punto desde la plaza en la que se encuentra, han hecho de este centro de abastos una verdadera joya de historia y patrimonio en Algeciras (Fig. 85).



(Fig. 85)

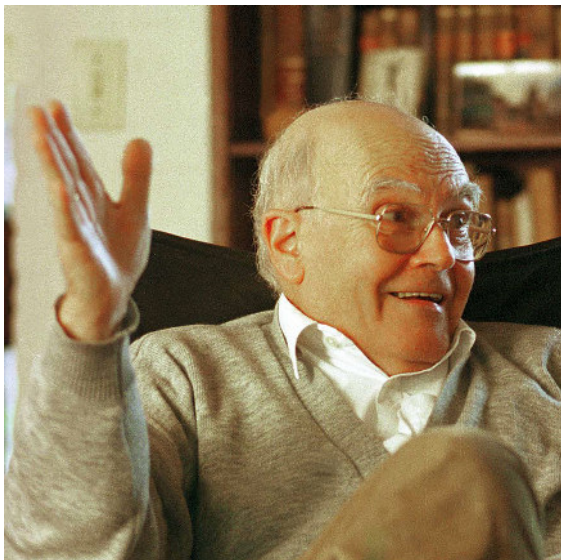
**Fig. 84:** Detalle de uno de los accesos al Mercado de Algeciras. Archivo Eduardo Torroja.

**Fig. 85:** Fotografía aérea del Mercado de Algeciras dentro de la traza urbana. <http://www.epdip.com/edificio.php?id=4913>.

## ELADIO DIESTE: Las bóvedas tabicadas reforzadas o cerámica armada y la **IGLESIA DE CRISTO OBRERO EN ATLÁNTIDA** (DEPARTAMENTO DE CANELONES, URUGUAY. 1960).

Eladio Dieste Saint Martin (Fig. 86), ingeniero uruguayo nacido en la ciudad de Artigas, al extremo norte del país, el 10 de julio de 1917, es considerado uno de los más grandes ingenieros estructurales del siglo XX.

De ascendencia española, su familia era originaria de Rianjo al norte de España, fue un gran apasionado de la poesía y la literatura.



(Fig.86)

Se licenció en 1934 en la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Montevideo, fue allí donde desarrolló sus grandes habilidades en matemáticas, física y la teoría mecánica (Pedreschi, R. 2000).

Apenas terminada la carrera universitaria, inicia su vida profesional trabajando en una constructora noruega (Cristiani & Neilson) donde colabora en varios proyectos incluyendo algunas estructuras con láminas de hormigón. También trabajó bajo la tutela del arquitecto español Antoni Bonet donde tendría un mayor acercamiento con las bóvedas laminares de cerámica con la propuesta para la Casa Berlinghieri en Punta Ballena (Fig. 87).



(Fig.87)

**Fig. 86:** Eladio Dieste durante una entrevista en su domicilio. La Plata, Uruguay (1996). Foto: Carlos Contreras.

**Fig. 87:** Casa Berlinghieri, Punta Ballena, Uruguay. Antonio Bonet (1947).

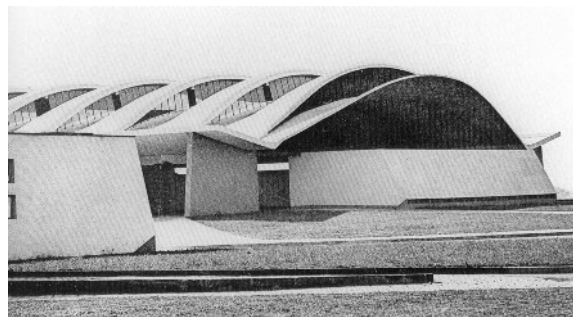
Para entonces, la propuesta de Dieste se desarrolló bajo la dirección de Bonet y consistió en cuatro láminas cilíndricas paralelas dentro de la técnica de bóvedas catalanas, la mayor de ellas cubría una luz de 6 metros (Pedreschi, R. 2000).

Ésta se convirtió en una de las obras más conocidas de Antoni Bonet, apareciendo en varias revistas de arquitectura contemporánea de la época.

En 1955 Eladio Dieste junto a su amigo y compañero de aulas de la universidad, Eugenio Montañez, empiezan su firma constructora, Dieste & Montañez, donde Eladio Dieste retomaría la idea de las bóvedas tabicadas reforzadas luego de una etapa dedicada a la docencia universitaria.

Las habilidades de diseño y cálculo de Dieste en la empresa fueron proporcionalmente compensados por las habilidades comerciales y gerenciales de Montañez lo que ayudaría a la consolidación y comercialización de las ideas innovadoras de Eladio Dieste (Pedreschi, R. 2000).

La firma constructora Dieste & Montañez llegó a diseñar y construir más de 1,5 millones de metros cuadrados hasta el retiro de Dieste y Montañez a mediados de los años 90, demostrando la eficacia y las capacidades de la técnica constructiva y formal alcanzadas por la tabiquería reforzada.



**Fig. 88:** Mercado de Porto Alegre, Pabellón de Productores. Porto Alegre, Brasil (1972). Archivo Dieste (Pedreschi, R. 2000).

**Fig. 89:** Terminal de Ómnibus. Salto, Uruguay. (1974). Foto: Pedro Bustamante. Fuente: <http://migrand-tour.blogspot.com.es/2010/04/creo-en-dieste-arquitecto-ingeniero.html>

**Fig. 90:** Agro-industria Massaro. Canelones, Uruguay (1978). Archivo Dieste. Fuente: <https://benhuser.wordpress.com/2010/11/28/la-biennale-di-venezia-people-meet-in-architecture/>

Como se mencionó con anterioridad, los dos grandes grupos que usó Dieste para la construcción con el sistema de cerámica reforzada fueron: las bóvedas auto portantes y las bóvedas Gausas. Entre

las principales obras dentro de estas agrupaciones tenemos el espacio para el mercado en Porto Alegre con sus 35.000m<sup>2</sup> (Fig. 88) o las bóvedas autoportantes de la Estación Municipal de Autobuses en Salto, Uruguay (Fig. 89).



(Fig.89)

A pesar de estar dentro de la rama de investigación y de teorías mecánicas de las estructuras de láminas tabicadas, Dieste no desarrollaba con frecuencia modelos a escala de sus diseños estructurales.

Otras obras que destacaron por su sencilla majestuosidad fueron por ejemplo las bóvedas para las Agroindustria Domingo Massaro de 1977 (Fig. 90), o las de la Planta Embotelladora de Fagar Cola en 1990 (Fig. 91), las grandes bodegas para Julio Herrera & Obes de 1979 (Fig. 92) así como la impresionante estructura del silo CADYL en Río Negro que metafóricamente hablando podría techar una montaña (Fig. 93).

Incluso su propia casa en Punta Gorda y terminada en 1968, es digna de admiración y estudio. Diseñada para su familia (un matrimonio de 12 hijos).



(Fig.90)



(Fig.91)



(Fig.92)

En los aproximadamente 40 años que duró la firma bajo la dirección de sus fundadores únicamente ocurrieron dos incidentes constructivos con diferentes suertes; el primero ocurrió en 1978 donde sufren el colapso durante la construcción de una de sus bóvedas al momento de retirar los apuntalamientos, la causa, la omisión del pretensado del acero en uno de los bordes

de la estructura, en este hecho no ocurrieron desastres personales, no obstante en 1987 el segundo percance que tuvieron dentro de la construcción de una de sus estructuras mató a varios trabajadores tras el colapso de otra bóveda, las investigaciones del caso determinaron que el motivo del desastre no eran fallos en el cálculo o en el proceso constructivo, se estableció que la calidad del cemento utilizado poseía características de fraguado más lento de lo establecido por el fabricante. Tras lo ocurrido y luego de la reconstrucción de las bóvedas, la firma Dieste & Montañez destinó el dinero de la obra a las familias de los obreros afectados en el accidente (Pedreschi, R. 2000).



(Fig.93)

Pero Dieste no solamente realizaría cubiertas para grandes bodegas industriales, la construcción de la iglesia de Cristo Obrero le abriría la puerta para crear verdaderas obras dentro del ámbito religioso, una de ellas fue la construcción de la iglesia de San Pedro en Durazno (Fig. 94) donde las láminas plegadas de cerámica crean un espacio de total liviandad en el interior de la iglesia.

Eugenio Montañez deja la empresa en 1991 debido a problemas de salud y tras cuatro años y con 78 años Dieste también se retira de la firma por causas similares a las de Montañez pero con varios proyectos realizados en España que básicamente fueron reproducciones de dos obras anteriormente realizadas; estas obras son la iglesia para la parroquia de San Juan de Ávila en Alcalá de Henares (Fig. 95),

**Fig. 91:** Planta Embotelladora Fagar Cola. Colonia, Uruguay (1990). Foto: Sala de arte "Carlos Federico Sáez". Fuente: <http://www3.mtop.gub.uy/salasaez/fotosdieste.htm>

**Fig. 92:** Depósito Julio Herrera & Obes, Montevideo, Uruguay. (1979). (Torrecillas, A. J. 1996).

**Fig. 93:** Silo CADYL. Young, Río Negro, Uruguay (1978). Foto: Sala de arte "Carlos Federico Sáez". Fuente: <http://www3.mtop.gub.uy/salasaez/fotosdieste.htm>



la Parroquia de la Madre del Rosario en Mejorado del Campo (Fig. 96) y La Sagrada Familia en Torrejón de Ardoz.



(Fig.94)

Hoy en día, la empresa sigue su funcionamiento bajo el mismo nombre de sus fundadores bajo la dirección de Eduardo Dieste (hijo de Eladio) y el también ingeniero Gonzalo Larrembebere Díaz.

Eladio Dieste falleció a la edad de 82 años el 20 de julio de 2000 en la ciudad de Montevideo.

**Fig. 94:** Iglesia San Pedro en Durazno, Uruguay (1971). Archivo Dieste (Torrecillas, A. J. 1996).

**Fig. 95:** Parroquia San Juan de Ávila. Alcalá de Henares, Madrid, España (1996). Foto: Ángel Luis Alfaro. Fuente: <http://en.wikipedia.org/>

**Fig. 96:** Parroquia Madre del Rosario durante su Construcción. Mejorada del Campo, Madrid, España (1996). Archivo Dieste (Torrecillas, A. J. 1996).



(Fig.95)



(Fig.96)

### IGLESIA DE CRISTO OBRERO en ATLÁNTIDA, URUGUAY

Esta iglesia de características tan particulares se encuentra cerca del balneario por el cual recibe su nombre. A 40 km. de Montevideo se levanta una de las obras más reconocidas de Eladio Dieste. Bajo la utilización de bóvedas gausas de directriz catenaria y de superficies regladas Dieste concibe una obra que le tomaría varios años definirla debido a las condiciones en las que se le había presentado el proyecto.

Para 1952, le encargan al ingeniero uruguayo la construcción de “una bóveda” en el terreno en el que hoy se encuentra tan maravillosa iglesia. Cuenta el propio Dieste que esta iglesia fue su primer encargo como obra “arquitectónica” (Torrecillas, A.J. 1996).

La iglesia de Atlántida está formada por una planta rectangular de 30 metros de largo por 16 metros de ancho, incluyendo los voladizos, donde los muros son superficies regladas formalmente curvas y con una cubierta compuesta por bóvedas gausas (Fig.85). y establecida como una gran cáscara de doble curvatura que se sostiene en el terreno a través de pilotes construidos “in situ” (Pedreschi, R. 2000).

Su altura máxima es de 8,55 metros y con una altura mínima regular de 7 Metros debido a la curvatura de las bóvedas gausas que conforman la cubierta.

Todo el conjunto está conformado por cerámica reforzada y dejada a la vista, los muros tienen un espesor de 30 cm. con una cámara interior de 6 cm. de hormigón armado (Mas Gundall, A. 2005).

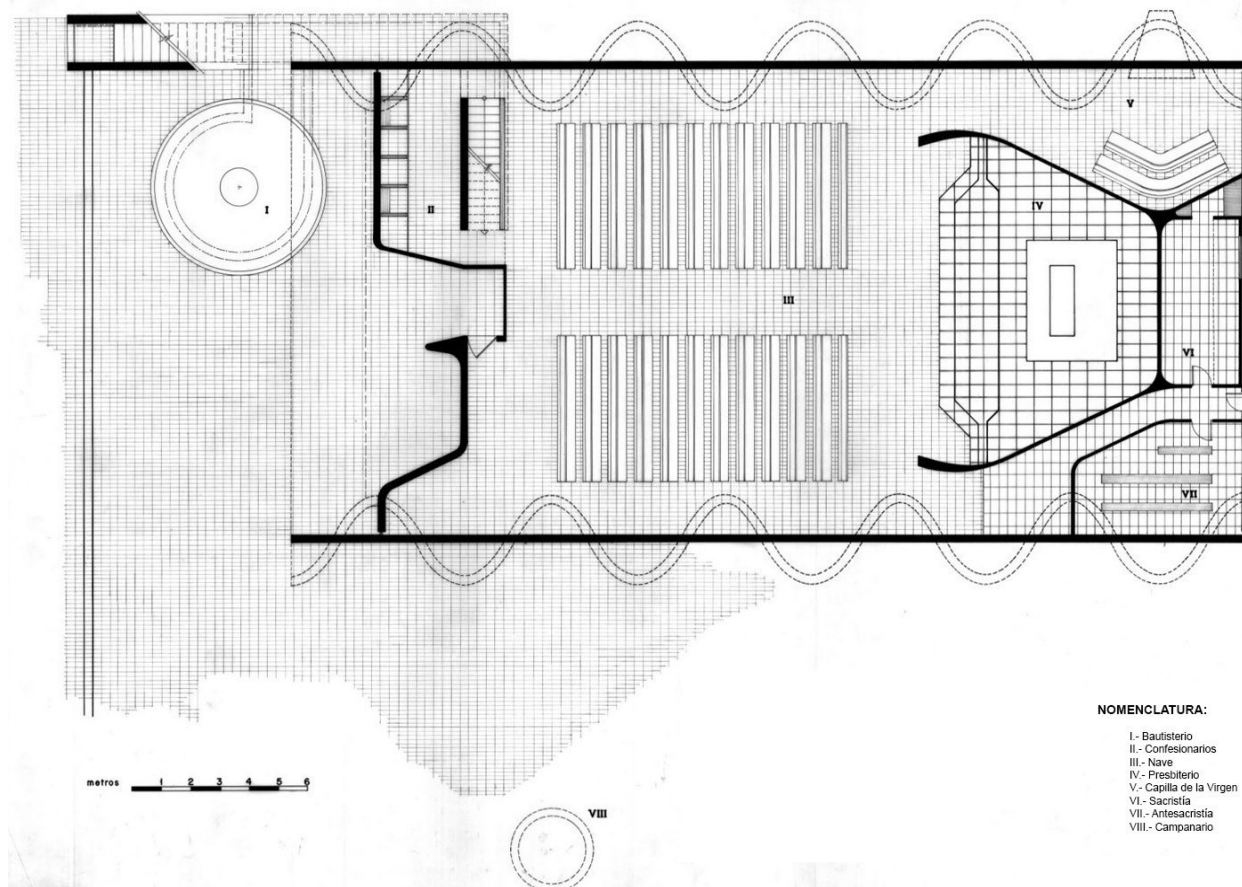
De composición sencilla, consta de una sola nave (iii) que se une al presbiterio (iv) a través de tres escalones muy sutiles, éste a su vez, está envuelto por un muro de mediana altura (Fig. 97) que confiere unidad a todo el espacio, sin perder la intimidad y la importancia con respecto a los demás.

A los costados del presbiterio se ubican la capilla de la Virgen de Lourdes (v) y la antesacristía (vii), lugares de mayor recogimiento pero que no pierden su vinculación con el resto de espacios.

El coro se encuentra en un segundo nivel, al cual se accede por una escalera ubicada en la parte posterior de la nave, la misma que sirve de elemento divisor para dar mayor privacidad a los confesionarios (ii) situados en los bajos del coro.

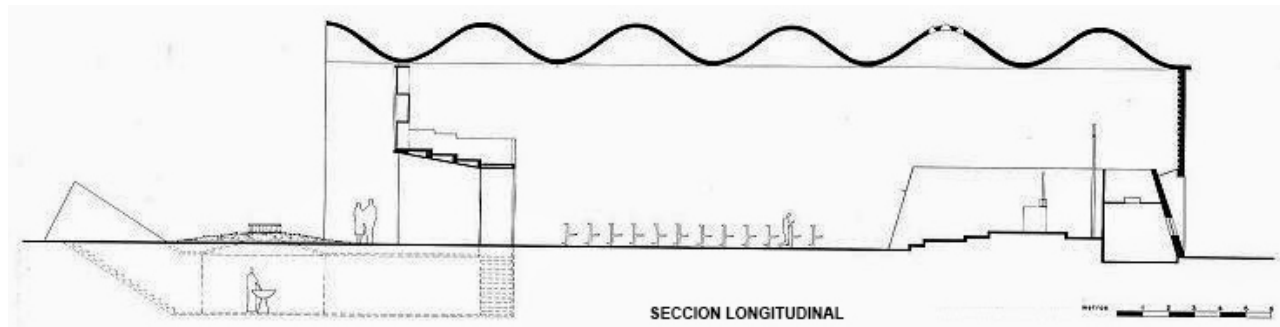
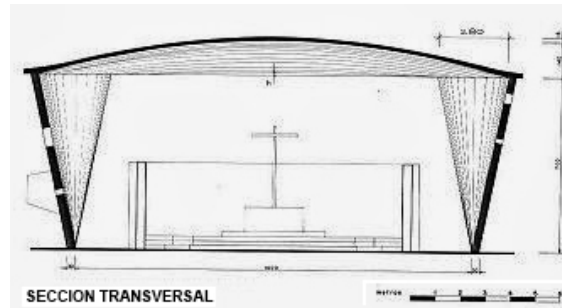
Un elemento llamativo es la ubicación de la

sala bautismal o bautisterio (i) ya que se ubica a un nivel por debajo de la cota cero que mediante un doble acceso, uno exterior (prisma triangular y otro desde el interior de la iglesia a manera de una cripta circular, su iluminación y ventilación naturales se obtienen a través de una cúpula con un lucernario de ónyx traslúcido visible desde el atrio de la iglesia. (Fig 98).



(Fig. 97)

Fig. 97: Planta Arquitectónica de la iglesia de Cristo Obrero (1960). Archivo Dieste (Torrecillas, A. J. 1996).



(Fig. 98)

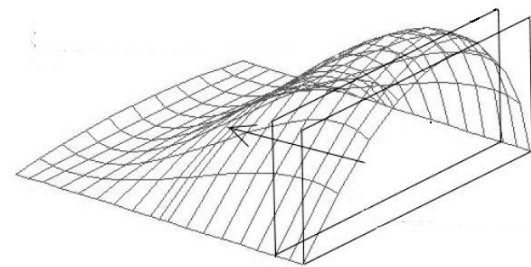
- **Método de cálculo**

El cálculo de la estructura no es algo que fácilmente se pueda concebir, claramente Eladio Dieste a través de la forma desarrolla dos sistemas constructivos donde el protagonista es el ladrillo y el acero.

Al igual que las dos obras analizadas anteriormente, la capilla abierta de Palmira en Cuernavaca y el mercado de Algeciras, donde el material predominante era el hormigón, los proyectos de cerámica armada de Dieste, no eran fáciles de calcular, y mucho menos bajo las condiciones desarrolladas por el ingeniero uruguayo. Por otra parte sí estaba claro el desarrollo de una mecánica estructural basada en la economía de medios que en aquellos años ponía en evidencia las bondades de un material utilizado por muchos años pero desvalorizado con el pasar del tiempo.

La forma de proyectar de Eladio Dieste mostró la dimensión moral que él otorgaba a cada una de sus obras como medio para salir del subdesarrollo.

Los estudios realizados sobre las formas catenarias y su estabilidad mostraban que el mayor problema en esta forma era la susceptibilidad al pandeo, incluso bajo las condiciones de peso propio, no así con las fuerzas a compresión; Dieste asegura la estabilidad de la estructura a través del correcto uso de la forma, es decir, aplicado una doble curvatura a estas estructuras y que de esta manera definen las bóvedas gausas (Fig. 99). A pesar de ser un sistema complejo de cálculo de esfuerzos y de comportamiento estructural en general, Dieste logra desarrollar una teoría que le facilitaría este proceso (Wiley, J. & Sons. 2008).



(Fig. 99)

Fig. 98: Sección Transversal y Longitudinal de la iglesia Cristo Obrero en Atlántida (1960). Archivo Dieste (Torrecillas, A. J. 1996).

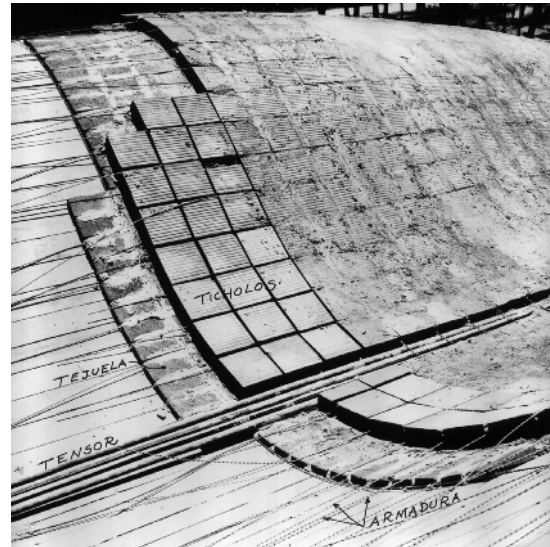
Fig. 99: Diagrama de bóveda gausa (Pedreschi, R. 2008).

Una consideración que tuvo el ingeniero Eladio Dieste es que al momento de elaborar la cubierta ésta respondía por su forma, durante la construcción el techo trabajaba como bóveda gausa, pero una vez finalizada ésta lo haría como cáscara autoportante (Torrecillas, A.J. 1996).

El propio Dieste, explicaba en una de sus entrevistas que la expresión matemática de la ecuación de la superficie era muy compleja pero que durante la construcción de formas similares se podían establecer dos zonas claramente identificables en la estructura, una que trabajaba como bóveda gausa, la misma que se apoyaba en la carrera de coronamiento de los muros y la otra que poseía una curvatura menor y que por tanto colgaba de la anterior; así la primera parte tenía una rigidez enorme y donde las tensiones no llegaban a superar los  $15\text{kg/m}^2$  y el pandeo estaba en el orden de magnitud 40, lo que no presentaba riesgos en su estabilidad, lo complejo en este apartado era el establecer las magnitudes de las cargas de empuje en los muros. Luego de establecer los esfuerzos que actuarían sobre los muros, el cálculo de las carreras de borde o vigas alero (Fig. 101) no se alejaría de los métodos tradicionales (Torrecillas, A.J. 1996).

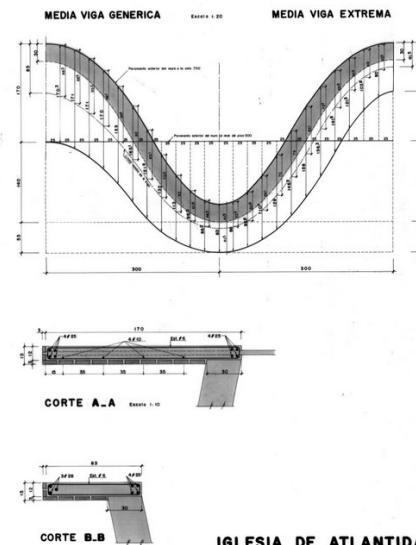
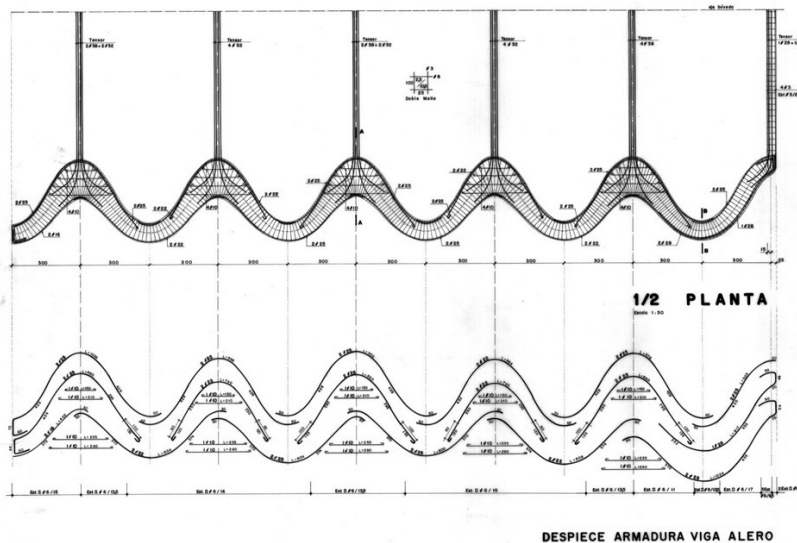
Es interesante ver que muchos de los esfuerzos que pueden poner en riesgo una estructura tienen valores despreciables, lo que asegura que no se

sufran problemas por fisuras a lo largo de las bóvedas o de las láminas de hormigón.



(Fig.100)

La forma reglada de los muros fue diseñada como un gran pórtico que junto a las bóvedas generan una gran rigidez transversal, disminuyendo

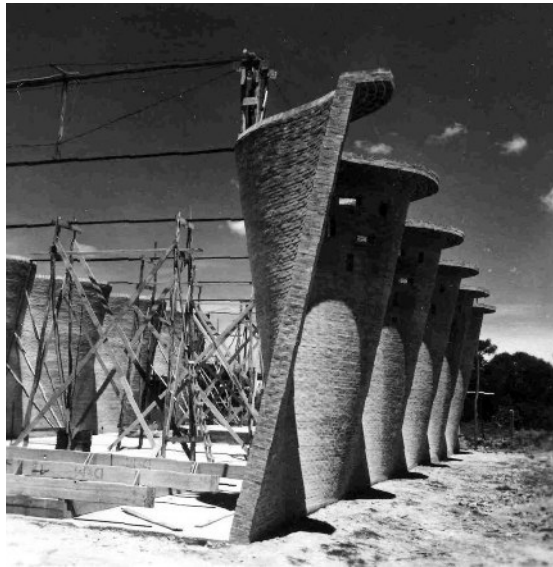


(Fig.101)

**Fig. 100:** Construcción de las bóvedas gausas en la iglesia Cristo Obrero en Atlántida (1960). Archivo Dieste (Adell, J. M. 1992).

**Fig. 101:** Detalle constructivo y despiece de la viga alero (Torrecillas, A. J. 1996).

considerablemente las posibilidades de desplazamiento de los elementos (Fig. 101).



(Fig.102)

#### • Encofrados y Cimbras

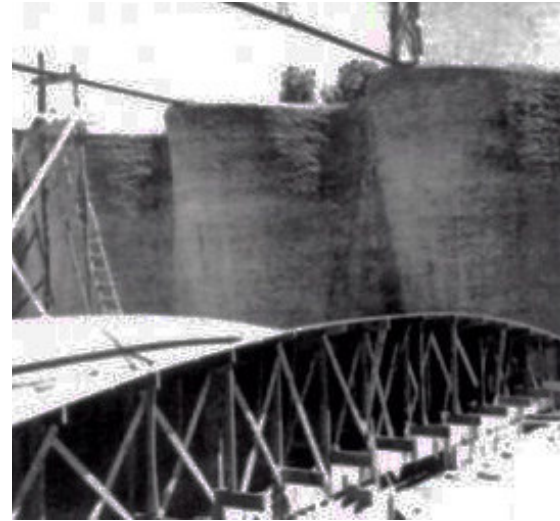
Para la construcción de muros se realizó un replanteo de la superficie reglada con alambres perpendiculares a las directrices, esto facilitó la elaboración de los muros ya que los albañiles simplemente seguían las direcciones establecidas para la colocación de los ladrillos, es decir, que el único encofrado utilizado fue el necesario para la cubierta y un andamiaje y apuntalamiento sencillo para levantar los muros (Fig. 102).

**Fig. 102:** Fotografía que muestra los muros laterales y las vigas alero de borde finalizadas de la iglesia Cristo Obrero en Atlántida (1960). Archivo Dieste (<http://i74.photobucket.com/albums/i268/gonzalezpedemonte/Muros202.jpg>)

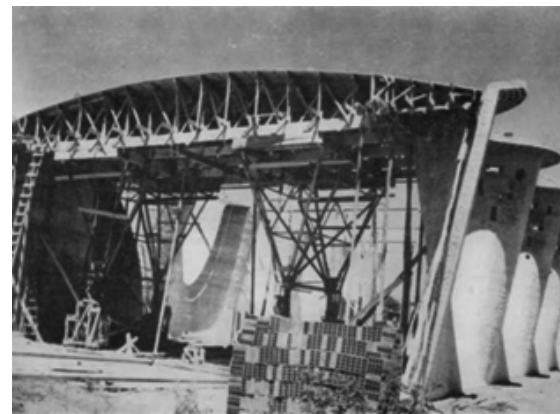
**Fig. 103:** Encofrado para la cubierta al nivel del suelo (1960). Archivo Dieste. (Pedreschi, R. 2008).

**Fig. 104:** Encofrado para la cubierta (1960). Archivo Dieste. Fuente: (<http://arqcontiamirez.blogspot.com.es/2010/06/eladio-dieste.html>).

**Fig. 105:** Detalle constructivo del andamiaje móvil diseñado por Dieste para las bóvedas en los muelles de Montevideo. Archivo Dieste. (Torrecillas, A. J. 1996).



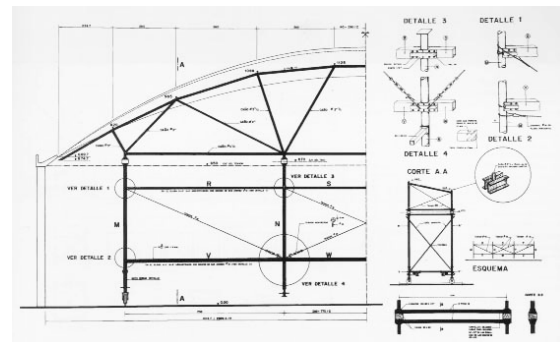
(Fig.103)



(Fig.104)

Los encofrados, en el caso de la iglesia de Atlántida, se los realizaban a nivel del suelo como un prefabricado (Fig. 103), y luego con la ayuda de una grúa, se lo situó a la altura requerida (Fig. 104).

Los encofrados usados por Dieste en sus construcciones eran cuidadosamente diseñados, nuevamente, siempre pensando en el factor que economizara la construcción, es por este motivo que la gran mayoría de las cimbras eran móviles y podían ser reutilizados para la construcción de varias bóvedas de una misma construcción, aunque para muchos, la construcción de un andamiaje específico podría significar un mayor coste por la mano de obra requerida en su ensamblaje (Fig. 105).



(Fig.105)

- **Puesta en obra del Material**

Al observar muchas de las obras de Eladio Dieste, se puede percibir la ligereza de la estructura y a su vez maravillarse por la capacidad de los materiales empleados para poder absorber las formas diseñadas por él.

El caso de la iglesia de Cristo Obrero en la Atlántida es un claro ejemplo de economía en la construcción, desde la mano de obra que en su gran mayoría era local, la reutilización de las cimbras diseñadas por el propio Dieste, que con la ayuda de sus sistemas móviles no requería de intrincados sistemas de apuntalamientos y así mismo ésta servía para los retoques finales que requiriera la obra.

De igual manera el material principal, la cerámica, fácil de realizar y fácil de adquirir de manera local, y fácil de colocar en obra, pues no era necesaria mano de obra especializada para su construcción.

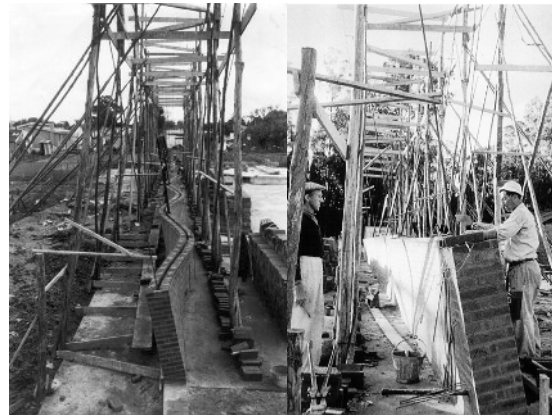
Eladio Dieste procuraba que el material se mostrara tal y como era y que su estabilidad dependiera de la forma que el aplicaba a sus diseños, el ya lo decía:

*“(...) Procuré que respondiera a un estilo serio, a la vez severo y amable de piedad, con una gran confianza en el espíritu cristiano de los humildes que han de usarla... los materiales son elementos expresivos: humildes pero tratados con un desvelo como homenaje que los humildes merecen...”*

(Torrecillas, A.J. 1996)

Todo aquello que no existía en el momento para la construcción de sus obras Dieste lo diseñaba y lo construía, la facilidad que poseía para saber interpretar las necesidades era de tal magnitud que todo el sistema de pretensado que las bóvedas tanto tabicadas como gausas eran de su invención y que llegó a patentar.

A pesar de las superficies regladas y las bóvedas desarrolladas en la construcción de la iglesia no parece haber tenido mayores complicaciones, desde el trazado inicial para levantar los muros (Fig. 106) hasta la elaboración de las bóvedas gausas y sus acabados (Fig. 107 y Fig. 108).



(Fig.106)



(Fig.107)



(Fig.108)

**Fig. 106:** Construcción de los muros laterales en la iglesia Cristo Obrero en Atlántida en su fase inicial. Archivo Dieste ([http://gonzalezpedemonte1.blogspot.com.es/2006\\_11\\_01\\_archive.html](http://gonzalezpedemonte1.blogspot.com.es/2006_11_01_archive.html)).

**Fig. 107:** Obrero durante la construcción de una bóveda. Archivo Dieste (Revista DPA. Departament de Projectes Arquitectònics. UPC. 1999).

**Fig. 108:** Obreros realizando el curado de las bóvedas de la iglesia de Atlántida (1960). Archivo Dieste (<https://www.facebook.com/eladio-dieste/photos/>).

Solamente en la cámara interna de los muros, así como los aleros de borde de la cubierta, son las únicas formas donde interviene el hormigón armado como parte de la forma estructural.

Un dato importante en la construcción de la iglesia de Atlántida, es mencionar que tanto los muros laterales como la cubierta se construyeron en primera instancia (por los conceptos estructurales anteriormente señalados) y que seguidos a estos se levantaron las fachadas frontal y posterior respectivamente, teniendo en cuenta que las fachadas no llegan a intersectarse con los muros laterales, por tanto, se ha dejado una pequeña separación, recubierta con onyx traslúcido, para no tener contrariedades al momento de generar la unión entre éstas (Fig. 109) (Pedreschi, R. 2008).



(Fig.109)

El último elemento que conforma la iglesia es el campanario (Fig. 110), íntegramente construido de cerámica reforzada, es un elemento que para Dieste no podía pasar desapercibido, si bien, en las nuevas iglesias que se construían el campanario pasaba a ser un elemento decorativo que simplemente sostenían las campanas, *un funcionalismo seco*, para el ingeniero uruguayo, la torre del campanario debía ser justamente eso, una torre a la cual se pudiera acceder, con sus peldaños prefabricados en ladrillo,

los mismos que trabajan como ménsulas empotradas a la pared exterior, debía ser donde las personas, fueran grandes o pequeñas, subirían para recordar momentos agradables, admirar el paisaje llenos de sentimiento (Torrecillas, A.J. 1996).



(Fig.110)

Durante la construcción de la torre se llegó a prescindir de andamiaje debido a que la plataforma de trabajo se apoyaba sobre el muro durante la construcción del mismo. En la torre el hierro utilizado para su refuerzo no llega a los 200kg.

El campanario de la iglesia de Cristo Obrero en Atlántida fue de las primeras torres en cerámica armada que Eladio Dieste construyó (Pedreschi, R. 2008).

**Fig. 109:** Interior de la iglesia Cristo Obrero en Atlántida (1960). Donde se aprecia la separación entre la fachada frontal y el muro lateral. Foto: Vicente del Amo (Torrecillas, A. J. 1996).

**Fig. 110:** Torre Campanario de la iglesia de Cristo Obrero en Atlántida (1960). Foto: Alejandro Stalker (<http://www.panoramio.com/user/5949342/tags/ELADIO%20DIESTE>).

- **Revestimientos y/o Acabados**

Al igual que los casos anteriores, el material principal utilizado queda a la vista, es decir, no posee ningún revestimiento ajeno a él, no obstante está claro que en lo referente a cubiertas siempre se colocará un material de similares condiciones con la salvedad que debe estar colocado de tal manera que se eviten filtraciones, pues la principal causa de deterioro en cualquier edificación es el agua.

Al referirnos a la iglesia en Atlántida, el principal material es el ladrillo o cerámica, los pisos, muros laterales y fachadas e incluso la barandilla que lleva al coro y por supuesto, la cubierta, todos están realizados con este material arcilloso, las característica de éste depende del sitio en el que se lo haya colocado, por ejemplo, en los muros y en la torre de campanario se puede observar claramente que es un ladrillo macizo *cara vista* de dimensiones normales y sin ninguna clase de aditamento o revestimiento (Fig. 111).



(Fig.111)

En el caso de los aleros (elemento mixto debido a su condición estructural) están compuestos por hormigón reforzado en su interior, pero al exterior manteniendo la unidad y continuidad de la cubierta, está revestido por ladrillo de 3 cm de espesor (Fig. 112) (Pedreschi, R. 2008).

La cubierta, compuesta por bóvedas gausas sigue los planteamientos descritos en párrafos anteriores, los ladrillos ortogonales usados específicamente para el armado de la cubierta se aprecian desde el interior (Fig. 107), acabados menores

son realizados utilizando el mismo andamiaje dispuesto para el encofrado de la cubierta. En la parte exterior se reviste con una tejuela cerámica porosa muy aislante y liviana (Torrecillas, A. J. 1996).



(Fig.112)

A las fachadas se les da tratamientos distintos tanto interiormente, como al exterior. En la fachada frontal, está conformada por ladrillo macizo por un lado y por otro con ladrillo vidriado, éste último se lo aplica en la composición de ventanas en la parte superior de la fachada dando un juego de matices tanto interior como exteriormente (Fig. 113).



(Fig.113)

En la fachada posterior, la disposición de los ladrillos son los que definen su superficie, al exterior de la fachada se dispone de los ladrillos en armonía con los muros laterales, en ella se puede observar una cruz diseñada por las distintas composiciones

**Fig. 111:** Vista interior de la iglesia de Cristo Obrero. Foto: Stephen Durham (<http://www.panoramio.com/photo/286541595011846502/>).

**Fig. 112:** Detalle de los muros laterales y la viga alero. (<http://www.panoramio.com/photo/62338454>).

**Fig. 113:** Detalle de la fachada frontal de la iglesia de Atlántida (1960). (<https://geolocation.ws/v/P/62338413/parroquia-del-cristo-obrero/en>).



de la cerámica (Fig. 114). En cuanto al interior de la fachada, esta está conformada por cerámica maciza perpendicular al trazado de la fachada y colocada a 45° (Fig. 115).



(Fig.114)



(Fig.115)

**Fig. 114:** Fachada posterior de la iglesia de Cristo Obrero en Atlántida (1960). Archivo Dieste. (Torrecillas, A. J. 1996).

**Fig. 115:** Detalle interior donde se intersectan la cubierta, el muro lateral y la fachada posterior de la iglesia de Cristo Obrero en Atlántida (1960). Foto: Luz y Miranda (<http://luzymiranda.wix.com/web#!eladio-dieste/albumfotos6=1>).

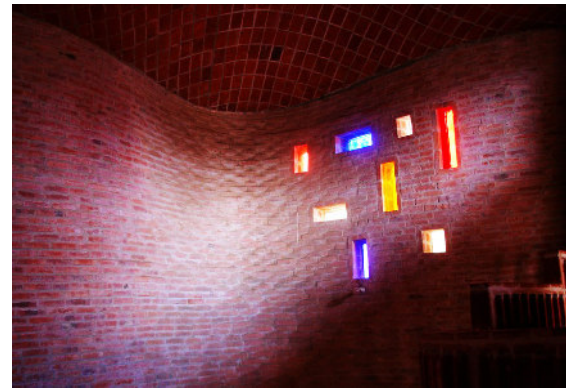
**Fig. 116:** Detalle de los vitrales en los muros laterales de la iglesia de Cristo Obrero en Atlántida (1960). (Plataformaarquitectura.cl).

**Fig. 117:** Detalle del lucernario sobre el altar de la iglesia de Cristo Obrero en Atlántida (1960). Foto: AKA Migrante. (<http://recorriendovida.blogspot.com.es/2010/11/iglesia-parroquial-cristo-obrero.html>).

Algo fundamental que forma parte de los acabados de esta obra y de la cual no se puede dejar de mencionar es el importante trabajo con la luz, sea por la composición de formas o por las decisiones acertadas del proyectista, se puede observar en el sin

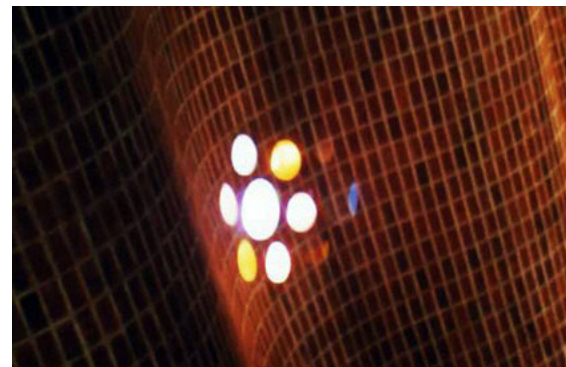
número de atractivos que la luz proyecta al interior de la iglesia.

Los vitrales de colores situados en los muros laterales, que el propio Dieste indicó que *no quería que las ventanas "rompieran" con la continuidad de la superficie* (Fig. 116), traen un sutil recuerdo a los vitrales de Ronchamps de LeCorbusier (Piaggio, J. M. 1996), La luz difusa proveniente de la fachada principal, el lucernario sobre el altar (Fig. 117) o el tragaluz en forma trapezoidal en la capilla de la Virgen (Fig. 118) son detalles que le dan ese carácter único a este espacio litúrgico.



(Fig.116)

Sin duda la iglesia de Cristo Obrero es una de las muestras más grandes que ha dejado el ingeniero uruguayo mostrando las capacidades y bondades de un material devaluado por la aparición de otros pero que tratado con ideas claras y sensatas puede llegar a todo lo que ya se ha mencionado.



(Fig.117)

En palabras del propio Eladio Dieste:

*“Esta obra es un buen ejemplo de cómo se puede llegar a dimensionar una estructura con seguridad y economía con métodos no rigurosamente matemáticos...”*



(Fig.118)



(Fig.119)

**Fig. 118:** Vista del interior de la iglesia de Cristo Obrero en Atlántida desde la Capilla de la Virgen.

**Fig. 119:** Vista frontal de la iglesia de Cristo Obrero de Atlántida. Foto: Federico Cairoli (2014). (<https://www.flickr.com/photos/fedecairoli/14242696601/>).

# LA APLICACIÓN EN VIVIENDAS

**la aplicación en viviendas de interés social**

## LAS LÁMINAS DE HORMIGÓN Y LAS BÓVEDAS TABICADAS: Su aplicación en vivienda de interés social .

Los casos de viviendas con las diferentes técnicas constructivas descritas en los apartados anteriores son muy puntuales, esto se debe a que las bóvedas de grandes luces siempre han sido de gran interés, sea por su atractivo arquitectónico o el desafío técnico, tanto analítico como constructivo que estas estructuras presentaban (Dieste E. & Montañez, E.R. 1985).

Por otra parte, las bóvedas que poseen una luz menor no serían tan llamativas por ser un problema menor de ingeniería y su desarrollo dependería por simples temas de gustos de quien lo podría solicitar.

Sin embargo, tanto las bóvedas tabicadas como las láminas de hormigón se pueden utilizar como cubierta en las viviendas ya sea por su atractivo material y/o formal, como por el tema económico, siendo este último el más importante y que por causas que se desconocen no se han llegado a desarrollar en los niveles que posiblemente se desearía.

### VIVIENDAS CON LÁMINAS DE HORMIGÓN

En el caso de las láminas de hormigón el ejemplo más práctico son los bungalows para el hotel Casino de la Selva en Cuernavaca, México (Fig. 120), éstas viviendas fueron obra del arquitecto Félix Candela

en colaboración con el también arquitecto Juan Antonio Tonda.

Construidas en 1960 como parte de un gran complejo turístico en el estado de Morelos, se edificaron 30 unidades habitacionales de techos semejantes de 14 x 7 metros, esto quiere decir que se componía de cuatro mantos de paraboloides hiperbólicos de borde recto de 3.50 por 7 m cada uno, con una altura de 1.60 metros. fueron apodadas como *las casas japonesas* por su peculiar diseño de cubiertas formadas por los famosos paraguas de Candela, con la particularidad que éstos se construyeron de forma invertida a la habitual (Fig. 121).



(Fig.120)

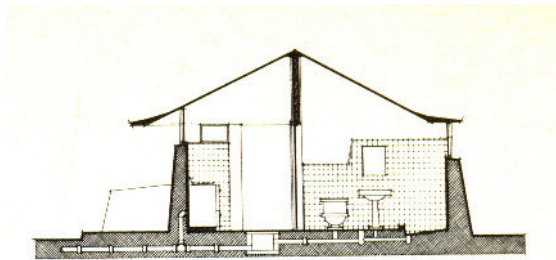
La estructura de estas viviendas resultaba fácil

**Fig. 120:** Vista de los bungalows que forman parte del antiguo Hotel Casino de la Selva en Cuernavaca, México (1960). Foto: Felix & Dorothy Candela Archive, Princeton University.

de repetir, y sobre todo se ganaba económicamente, ya que todas las cargas del techo se concentran en un solo punto, lo que evita que los muros sean portantes y por consiguiente, no se sobre dimensiona la cimentación (Faber, C. 1981)

- **Características Estructurales**

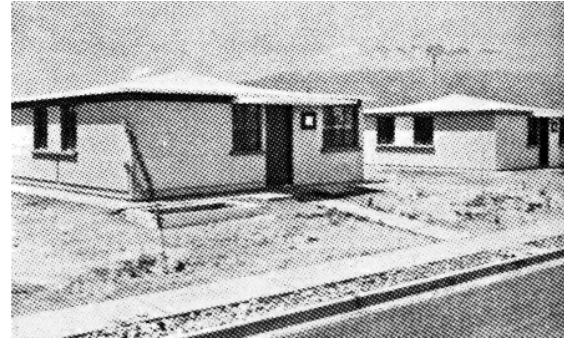
Un paraguas invertido con borde horizontal, funciona de forma distinta a un paraguas normal, pues requieren de una viga perimetral en cuanto sus bordes trabajan a compresión lo que aumenta las deflexiones de la cubierta. Como resultado de lo anterior las uniones entre paraboloides que conforman la cubierta trabajan a tensión necesitando una mayor cuantía de acero, es cierto que en la práctica no se llega a utilizar una nervadura de concreto. El cascarón de hormigón se estabiliza gracias a la presencia de los muros perimetrales.



(Fig.121)

Actualmente los bungalows construidos por Candela, están en peligro de ser demolidos en su totalidad debido a nuevos proyectos dentro de los predios del antiguo Hotel Casino de la Selva.

El uso del paraguas invertido se volvió una solución práctica para viviendas de bajo costo, así lo demostró Candela con la construcción de más de cien unidades habitacionales en Monterrey en el estado de Nuevo León (Fig. 122), dónde, el atractivo de la cubierta las hacía destacar entre las comunes losas planas (Faber, C. 1981).



(Fig.122)

### VIVIENDAS CON BÓVEDAS TABICADAS REFORZADAS

Las viviendas a través de bóvedas tabicadas reforzadas fueron definidas por Eladio Dieste como estructuras que aportan confort y economía con una gran trascendencia social poniendo al alcance de clases más humildes un conjunto de ventajas que con otras tecnologías no logran (Dieste E. & Montañez, E.R. 1985).

Parece irónico que Eladio Dieste, al promulgar las ventajas económicas que brinda el construir una vivienda con cubiertas de cerámica reforzada, haya simplemente edificado una única vivienda en su vida profesional como constructor, la suya (Fig. 123).

Construida en 1968 en Punta Gorda, Montevideo, se emplaza en un terreno de 12 x 50 metros, y albergó en su tiempo a la familia de Dieste (su mujer, once hijos y una empleada doméstica).



(Fig.123)

**Fig. 121:** Bungalow Hotel Casino de la Selva. Sección transversal. Cuernavaca, México (1960). (Faber, C. 1981).

**Fig. 122:** Vista de las viviendas de interés social proyectadas por Candela. Monterrey, N. L., México (1960). (Faber, C. 1981).

**Fig. 123:** Vista de la fachada interior de la casa Dieste. Punta Gorda, Uruguay (1968). (Roig, J. 1970).

Las características estructurales de las bóvedas reforzadas le permitieron a Dieste concebir espacios con vistas adecuadas hacia el exterior, manteniendo la intimidad del hogar, habitaciones acogedoras que un material único, como la cerámica, puede brindar (Fig. 124).

Gracias al gran desarrollo horizontal del terreno donde se emplaza la vivienda, permite la incorporación de un patio interior que reduce el área de edificación pero que denota en una sensación de amplitud de los espacios (Fig. 125), con el plus adicional de obtener grandes habitaciones a bajo costo (Torrecillas, A.J. 1996).

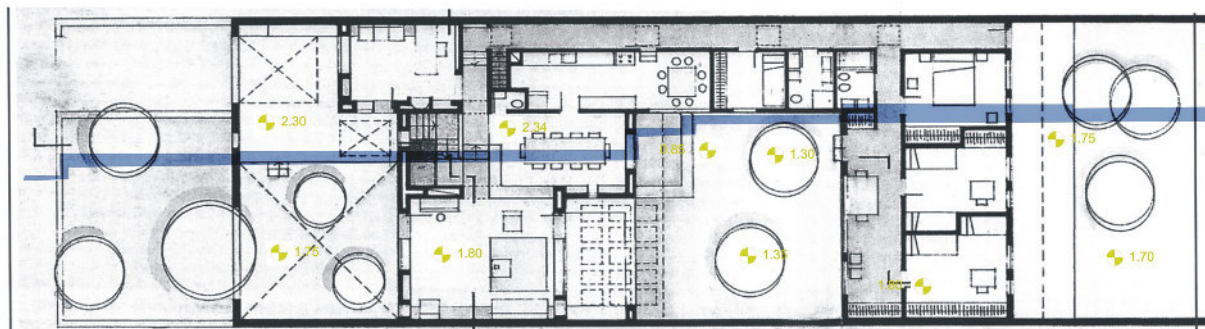
Al utilizar el ladrillo cerámico como material principal y casi único, le permitió a Dieste lograr esa estabilidad dentro de la vivienda, tanto en verano como en invierno.



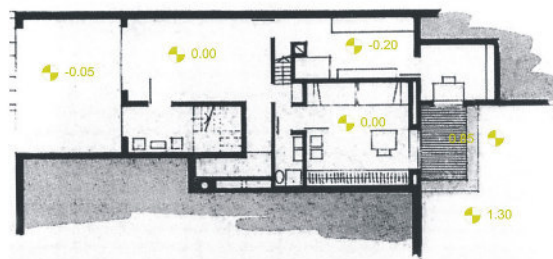
(Fig.124)

#### • Características Estructurales

Las paredes, entpisos, escaleras y bóvedas son de ladrillo, la higroscopicidad y su baja conductividad lo hacen muy aconsejable técnicamente, una calidad similar con otros materiales es más costoso, o en algunos casos menos durable.



PLANTA BAJA



PLANTA ALTA

(Fig.125)

Fig. 124: Vista del interior de la casa Dieste. Punta Gorda, Uruguay (1968). (Roig, J. 1970).

Fig. 125: Vista del interior de la casa Dieste. Punta Gorda, Uruguay (1968). Fuente: [http://wikiarquitectura.com/es/images/e/e2/Casa\\_dieste.\\_incorporacion\\_de\\_seccion\\_longitudinal\\_en\\_planta.niveles.jpg](http://wikiarquitectura.com/es/images/e/e2/Casa_dieste._incorporacion_de_seccion_longitudinal_en_planta.niveles.jpg)

Los muros son anchos entre 40 ó 50 cm permite alojar las cortinas de enrollar; y donde son necesarios se usaron para nichos, bibliotecas o armarios.

El uso de un material local con las bondades que presenta el ladrillo cerámico, la técnica constructiva de las bóvedas que permite el desarrollo de espacios dinámicos, así como la utilización de elementos móviles, en el caso de los encofrados de bóvedas y los sencillos acabados donde la cubierta, que únicamente utiliza una capa de mortero simple con malla electrosoldada para el control de fisuras de temperatura o retracción de fraguado y una capa de aislamiento térmico y tejuela vidriada (Torrecillas, A.J. 1996).

Según Dieste el precio por metro cuadrado de la vivienda es muy barato, teniendo en cuenta las características de confort y de calidad que se obtienen al utilizar las técnicas constructivas por él desarrolladas.

## CARLOS GONZÁLEZ LOBO Y LAS BÓVEDAS PREFABRICADAS

A diferencia de las viviendas con carácter social con láminas de hormigón, las bóvedas de cerámica reforzada han tenido una pequeña evolución, bajo las propuestas del arquitecto mexicano Carlos González Lobo quien desarrolló una tecnología pensada para construir cubiertas baratas y en autoconstrucción, partiendo de un problema estético inicialmente y que permite actualmente, que se pueda construir un techo en el suelo y sin peligro (Fig. 126).



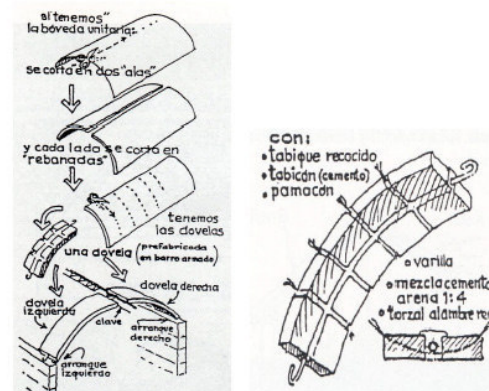
Fig. 126: Carlos González Lobo durante la prefabricación de dovelas para bóvedas reforzadas México. Archivo de Carlos González Lobo (González, H. 2002).

Fig. 127: Diagrama constructivo del Sistema CGL-2. Archivo de Carlos González Lobo (González, H. 2002).

Las apuestas arquitectónicas de Carlos González Lobo lo ligan de una manera evidente con la cultura de un mundo que necesita "todo" y que espera la construcción de una arquitectura pobre. Y que sitúan estas propuestas más allá del mero análisis constructivo y práctico de las mismas, y que son la consecuencia de una primera línea cultural que sitúa al arquitecto como parte de una sociedad, y de una segunda línea cultural arquitectónica, que aporta la superación de los hallazgos de otros. Introduciendo ensanchar el campo de lo conocido, para que la modernidad forme parte también, del mundo real (González, H. 2002).

### • Elaboración de las bóvedas

La construcción de estos elementos es muy sencilla; partiendo de la elaboración de dovelas, que no son otra cosa que segmentos de un mismo arco (Fig. 127), de forma artesanal y con un bajo coste por mano de obra (participación ciudadana) y la no utilización de complejos sistemas de cimbra y encofrado (aparte del necesario para la conformación de la bóveda), debido a que el elemento de molde (provisional) se encuentra a nivel del suelo y las dovelas son relativamente ligeras (Fig. 126).



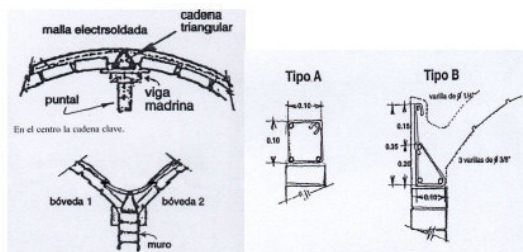
(Fig.127)

Las dovelas se conforman de varias piezas de ladrillo pareados, entre sí, en una junta de 4cm. se coloca una varilla de acero de 3/8" de forma longitudinal, la misma que servirá para unir la dovela en el tímpano de la bóveda y a la viga de soporte; transversalmente

se arman tres alambres recocidos por cada junta entre ladrillos (torsales), que servirán para armar las dovelas entre sí (fig. 127), el hormigón utilizado es un mortero simple de arena - cemento en proporción 1:4, el tiempo de fraguado y curado es de 6 días (González, H. 2002).

Una vez laboradas la dovelas y colocadas a pie de obra una a una se van subiendo a la altura requerida, donde una viga maestra con armadura triangular (clave de la bóveda) y las vigas de soporte o cadenas perimetrales serán el sustento para el armado de las dovelas (Fig. 128).

Una vez armadas las dovelas, se estabiliza toda la bóveda mediante una malla electrosoldada colocada en la parte superior y recubierta con una capa de hormigón. En esta parte de la construcción se pueden colocar todas las tuberías para las instalaciones necesarias.



(Fig.128)

La resistencia de la bóveda se alcanza a los 6 días de curado pudiendo ser retirada la cimbra que sostiene la clave de la bóveda al séptimo día (González, H. 2002).



(Fig.129)

Este sistema constructivo permite la construcción de una segunda planta, utilizando la cubierta anterior como entrepiso (Fig. 129), es una gran ventaja que este tipo de construcción brinde la posibilidad de tener entre manos una vivienda del tipo *semilla* lo que permite un desarrollo por etapas de acuerdo a las condiciones económicas de sus habitantes.

Claramente es uno de los sistemas constructivos más económicos para viviendas, la considerable reducción de acero de refuerzo, el abaratamiento de encofrado y la disminución del hormigón requerido

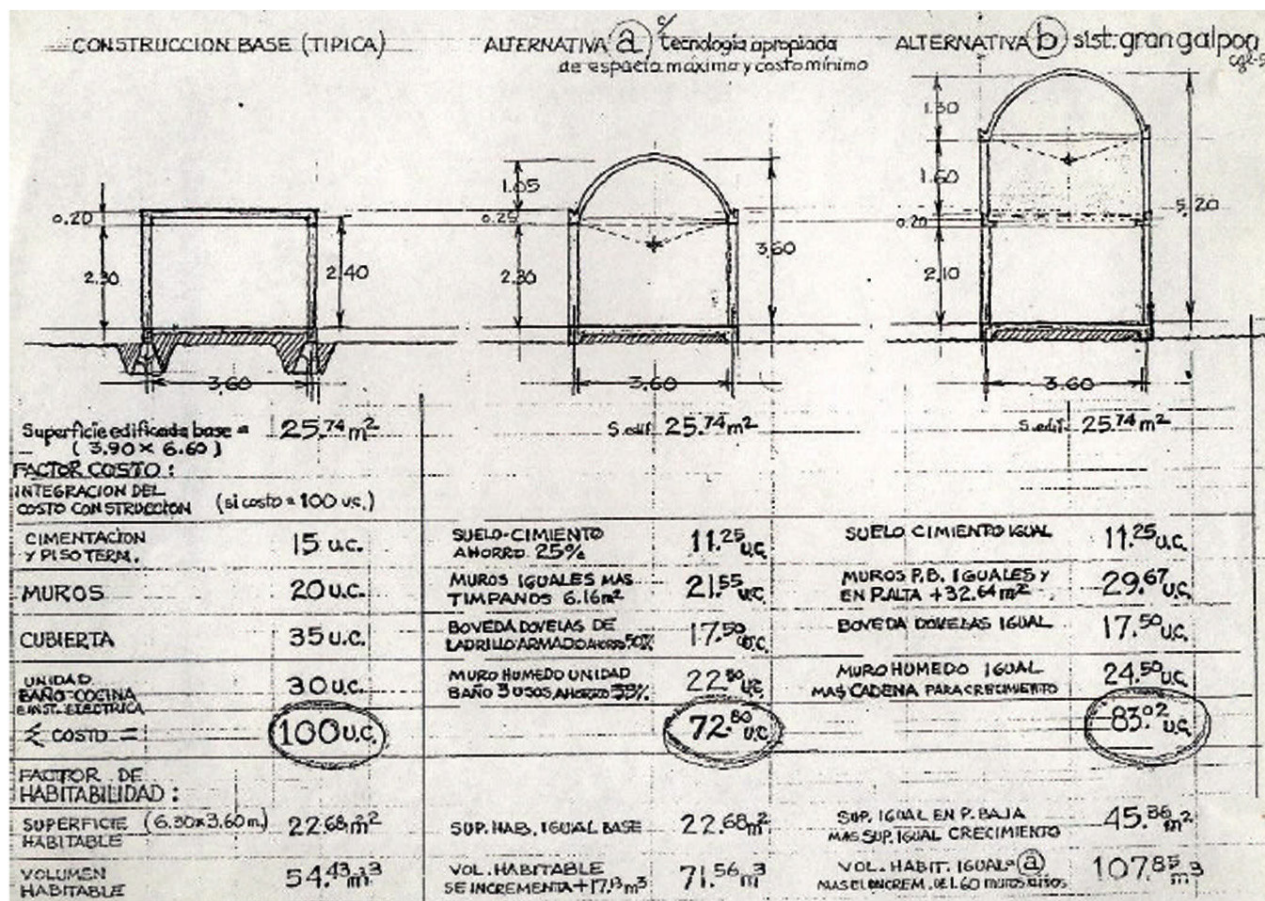
**Fig. 128:** Diagrama y proceso constructivo de las bóvedas bajo el sistema CGL-2. Archivo de Carlos González Lobo. (González, H. 2002).

**Fig. 129:** Fotografía que muestra la factibilidad de realizar una vivienda de dos niveles mediante el sistema CGL-2. Archivo de Carlos González Lobo. (González, H. 2002).



reducen el coste notablemente en comparación de una construcción tradicional de hormigón.

Carlos González Lobo sostiene sus propuestas con argumentos económicos que avalan sus proyectos Fig. 130). Y aporta la experiencia de “construirlos” con la gente (González, H. 2002).



(Fig.130)

## LA BÓVEDA TABICADA y EL PROGRAMA SUDU EN ETIOPÍA

### • Antecedentes

La bóveda catalana, si bien es una técnica constructiva con cerámica anterior a las que se han

estudiado hasta ahora, ha tenido una participación en la construcción de viviendas muy importante, apareciendo en momentos críticos donde la economía se ha visto afectada, el caso más representativo fue la postguerra española, donde el encarecimiento del acero promovió la construcción de bóvedas y bovedillas de estilo catalán a través de arquitectos como Luis Moya y sus innumerables tratados o Francisco de Asís

Fig. 130: Esquema comparativo mediante Unidades de Coste entre una construcción típica de hormigón y los sistemas de Carlos González Lobo. Archivo de Carlos González Lobo. (González, H. 2002).

Cabrero (Adell, J. M. 2005).

El mayor exponente en los inicios de estas bóvedas fue Rafael Guastavino, quien nace en Valencia en 1842 y estudió en la Escuela de Arquitectura en la Politécnica de Barcelona dónde obtendría sus conocimientos como maestro de la construcción (Miranda, T. 1986).

Sus obras más importantes se encuentran en Estados Unidos, a donde emigró por las oportunidades que vió tras su participación en la Exposición del Centenario de Filadelfia en 1876 (Ochsendorf, J. 2005).

La obra que catapultó a Guastavino en Estados Unidos fue la construcción de las bóvedas tabicadas en la Biblioteca Pública de Boston (Fig. 131), en un intento arriesgado por dar a conocer su trabajo, propuso la construcción de bóvedas tabicadas a pesar de que ya se había adquirido el acero para los entresijos y cubierta.



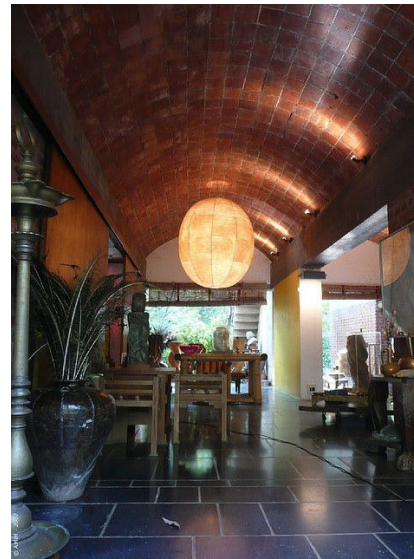
(Fig.131)

Guastavino se encargó de internacionalizar la construcción de la bóveda catalana gracias a las aportaciones del material y las características obras con acabados sencillos pero de alta calidad que se obtenían y que tras siglos se utilizó sea en obras patrimoniales o de carácter habitacional.

- **Le Corbusier y la Bóveda Tabicada**

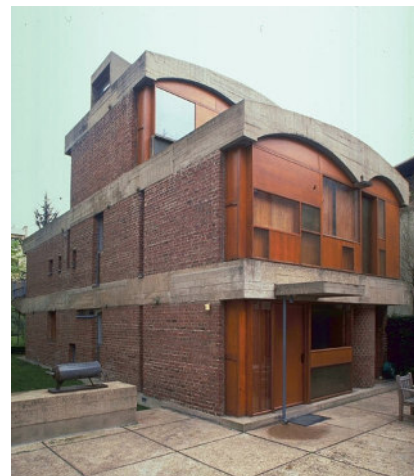
Es tal la replicabilidad y la practicabilidad de

este sistema constructivo que en 1955 el propio Le Corbusier concibe la casa Sarabhai (Fig. 132) bajo la utilización de la bóveda tabicada pero con la innovación de dar mayor flexibilidad a la planta mediante el uso de vigas corridas sobre los muros, lo que permitía prescindir de los clásicos muros portantes sin vanos.



(Fig.132)

Le Corbusier resuelve la vivienda mediante pequeñas bóvedas tabicadas que salvan luces inferiores a tres metros, adecuándose a la manera de construir y materiales del lugar.



(Fig.133)

**Fig. 131:** Construcción de la Biblioteca Pública de Boston. Rafael Guastavino. Norteamérica. (1889) (Ochsendorf, J. 2005).

**Fig. 132:** Casa Sarabhai en Ahmedabad, India. Le Corbusier (1955). Foto: Von ky. <http://www.pinterest.com/pin/138274651031333637/>

**Fig. 133:** Casas Jaoul. Neuilly-sur-Seine, Francia. Le Corbusier (1955). Fuente: <http://skfandra.wordpress.com/2011/09/18/arquitectura-sostenible-desde-la-ilustracion-al-movimiento-moderno-04-maestros/>

Al año siguiente tras la experiencia de haber construido la casa Sarabhai, Le Corbusier proyecta la casa Jaoul en París, Francia (Fig. 133 & Fig. 134) donde una vez más ve en la bóveda tabicada la oportunidad de desarrollar espacios más flexibles condicionados por el cambio técnico y moral que supuso la II Guerra Mundial.



(Fig.134)

#### • Unidad de Vivienda Urbana Sostenible (SUDU)

El programa SUDU (por sus siglas en inglés para Unidad de Vivienda Urbana Sostenible), recupera el tradicional sistema constructivo de bóvedas catalanas enseñando a comunidades de escasos recursos en Addis Ababa, Etiopía su construcción.

El taller experimental propuso incentivar la construcción de viviendas a través de un prototipo elaborado en 2010 (Fig. 135) y que priorizó del uso de la cerámica cocida, considerada como material local y de bajo coste.

Con la ayuda de la ETH Zurich y la EiABC (Ethiopian Institute of Architecture, Building Construction and City Development), se capacitó a los propios habitantes de la comunidad para edificar la vivienda.

La prioridad en el desarrollo de este taller experimental era el de revitalizar la construcción a

través de materiales locales, debido al gran crecimiento habitacional con técnicas totalmente ajenas, como era el caso de las edificaciones de Hormigón armado.



(Fig.135)

Sin duda, la sostenibilidad del proyecto mediante participación ciudadana y la utilización de materiales propios del lugar acompañados de una técnica constructiva que recorta los costes al prescindir del uso de encofrados y cimbras que requieren demasiadas horas-hombre, quedó evidenciada mediante los resultados obtenidos y sobre todo la satisfacción de una comunidad.

La sociabilización del proyecto se llevó a cabo mediante pequeñas obras donde se mostraban las capacidades de las bóvedas y a la vez que se capacitaba a los hombres y mujeres de la comunidad para que fueran ellos quienes hicieran realidad el prototipo (Fig. 136).

El proceso empezaba desde la plática de los profesionales para determinar el dimensionamiento de la vivienda así como el armado de las sencillas cimbras que serían utilizadas durante la construcción (Fig. 137). Todo el proceso contó con la supervisión

Fig. 134: Casas Jaoul. Neuilly-sur-Seine, Francia. Le Corbusier (1955). (García, J. 2012).

Fig. 135: Casa experimental SUDU en Etiopía. Fuente: <http://sudu1construction.wordpress.com/>

de profesionales especializados en lo arquitectónico, la ingeniería y la sostenibilidad, para que nada pasara desapercibido.



(Fig.136)

#### • Características Constructivas

Al ser una construcción relativamente liviana, la cimentación estuvo conformada por una sencilla cadena corrida de hormigón armado que seguía la forma de la vivienda, generando un sobrecimiento para evitar que la humedad subiera por los muros portantes.

La vivienda constaría de dos niveles, por esta razón los muros portantes debían ser dimensionados de acuerdo a las cargas y empujes que éstos recibirían.

Los muros fueron de arcilla cocida con espesor entre 30 y 40cm. debido a los empujes horizontales de la propia bóveda, de igual manera se coronaron los muros con una viga de hormigón armado con la incorporación de tensores para dar mayor estabilidad a la construcción (Fig. 137).

Las bóvedas estaban compuestas por dos láminas de cerámica (Fig. 138) como tradicionalmente se conoce, el punto fuerte de esta etapa, estuvo en saber enseñar las dosificaciones de mezcla y la colocación de

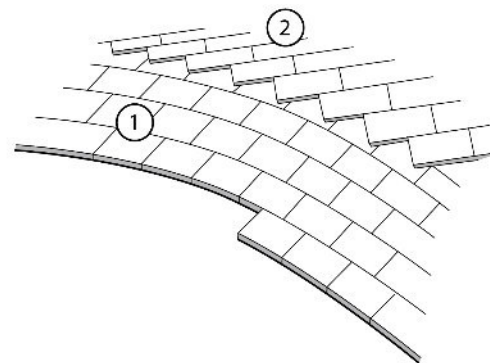
la cerámica en las diferentes disposiciones requeridas.



(Fig.137)

#### • Características Estructurales

Las condiciones estructurales se centraron en la bóveda de entrepiso y los muros portantes, las bóveda tabicadas que tienen espesores mínimos están condicionadas a seguir una forma catenaria para trabajar siempre a compresión, por tanto, la distribución de cargas debe ser lo más uniforme posible sobre la superficie de dicha bóveda (Fig. 139).



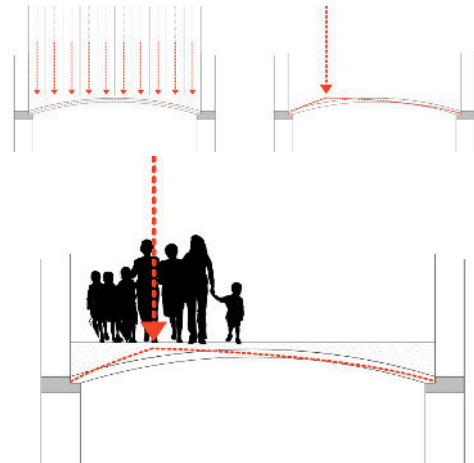
(Fig.138)

**Fig. 136:** Pruebas de resistencia de las técnicas constructivas aplicadas en la casa experimental SUDU en Etiopía. Fuente: <http://sudu1construction.wordpress.com/>

**Fig. 137:** Vistas de la casa experimental SUDU durante el proceso de construcción. Addis Ababa, Etiopía. Fuente: <http://sudu1construction.wordpress.com/>

**Fig. 138:** Casa experimental SUDU. Capas de cerámica para las bóvedas. Addis Ababa, Etiopía. Fuente: <http://sudu1construction.wordpress.com/>

Para lograr la condición anteriormente descrita, se elaboraron diafragmas tabicados sobre el extradós de la bóveda, lo que ayudaría, primero a lograr una mejor distribución de cargas sobre la estructura, evitando cargas puntuales que actúen peligrosamente sobre la bóveda y segundo, a tener elementos que permitan obtener una superficie regular de entrepiso (Fig. 140).

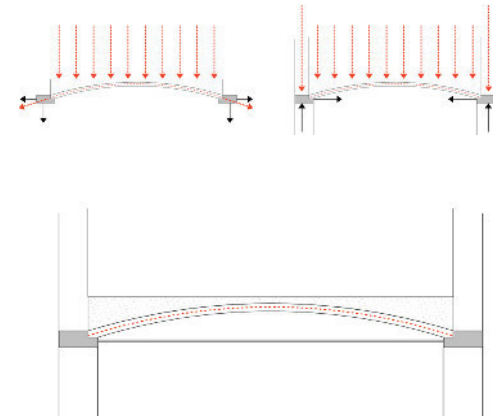


(Fig.139)

Por último, la continuación de los muros portantes de segunda planta (con menor espesor debido a la reducción de peso) permiten la confinación de la bóveda reduciendo a valores despreciables los empujes laterales generado por la bóveda tabicada (Fig. 141).



(Fig.140)



(Fig.141)

Podemos concluir que el resultado obtenido ha de ser entendido como un primer paso en la concepción de una vivienda sostenible, desde el punto estructural y económico mediante un sistema constructivo fácil de aprender y que se estudiará con mayor profundidad en los temas de producción y generación de energías, así como la re utilización de recursos naturales para alcanzar nuevos niveles de adaptabilidad en un entorno determinado.

#### • La bóveda tabicada y su desarrollo en Latinoamérica

La introducción de la bóveda tabicada en Latinoamérica es un tanto incierta, se piensa que los principales exponentes en la construcción de viviendas con bóvedas tabicadas aparecen por su relación directa con Le Corbusier, ya que muchos de sus ayudantes se radicaron en países Sudamericanos, entre ellos Antoni Bonet en Argentina y Salmons en Colombia (García, J. 2012).

En el caso de Bonet tenemos la construcción de la casa Berlingieri, la misma que fue el primer acercamiento a las bóvedas reforzadas por parte de Eladio Dieste (Fig. 87), en el caso de Salmons su casa de Huéspedes de 1978 y la casa Tenjo fueron muy reconocidas.

Por otro lado, influenciado por Bonet y

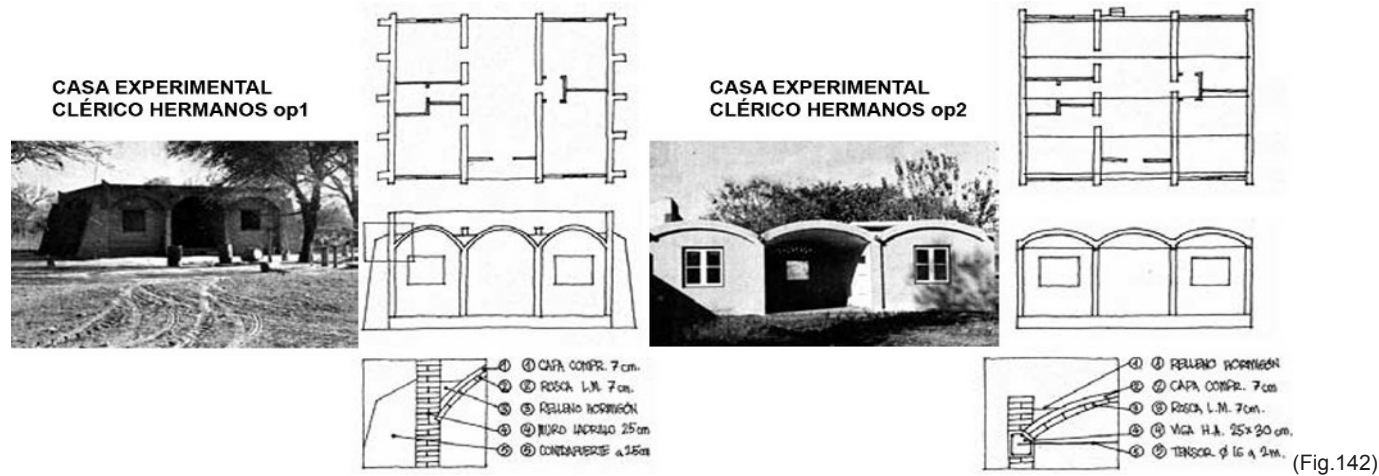
**Fig. 139:** Casa experimental SUDU. Diagrama de la correcta distribución de esfuerzos sobre la bóveda de entrepiso. Fuente: <http://sudu1construction.wordpress.com/>

**Fig. 140:** Casa experimental SUDU. Vista de la construcción de los diafragmas tabicados sobre el extradós de la bóveda de entrepiso. Fuente: <http://sudu1construction.wordpress.com/>

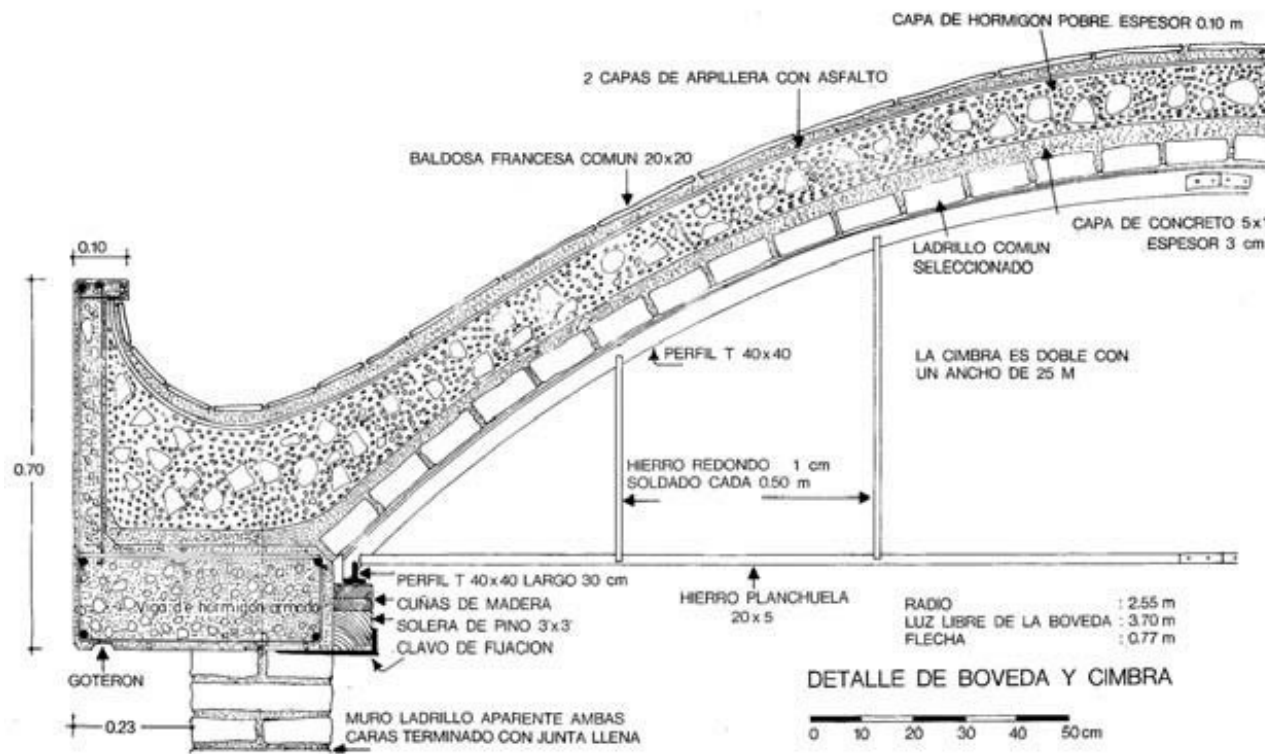
**Fig. 141:** Diagrama de la bóveda de entrepiso y la supresión de esfuerzos horizontales. Fuente: <http://sudu1construction.wordpress.com/>

Salmona se incorporan a los que trabajaron con bóvedas tabicadas el arquitecto argentino Eduardo Sacriste, desarrollando un lenguaje propio (viviendas de una planta y aisladas) (Fig. 142) mediante la experimentación de viviendas de bajo coste.

Otros profesionales influenciados por la búsqueda de coherencia constructiva dentro del campo de viviendas y condicionados por los altos costes del acero luego de la Segunda Guerra Mundial, vieron una solución práctica en las bóvedas tabicadas (García, J. 2012).



(Fig.142)



(Fig.143)

Fig. 142: Casa Experimentales Clérico Hermanos realizadas por Eduardo Sacriste (1948). (García J. 2012).

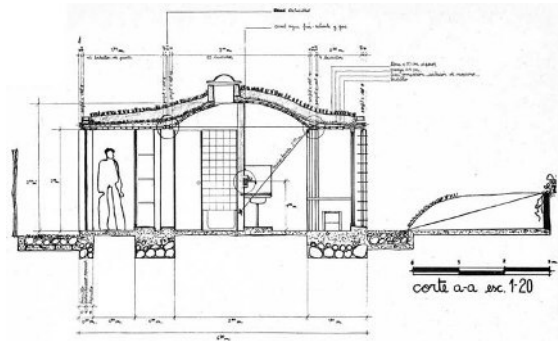
Fig. 143: Detalle constructivo de una de las bóvedas tabicadas empleadas por Sacriste con su respectiva cimbra móvil (García, J. 2012).

Las bóvedas (al principio tabicadas, de ladrillo y mortero, sin ningún tipo de armado) apoyaban en gruesos muros paralelos de fábrica, aligerados por huecos adintelados (Fig. 143) (García, J. 2010).

Las bóvedas en Latinoamérica, como hemos podido observar, especialmente en Argentina, sufrieron avances importantes que llevó hacia desarrollo de las bóvedas armadas y prefabricadas a las que ya nos habíamos referido en apartados anteriores, incluso llegaron a tener recubrimientos vegetales que ayudaron a la integración con el paisaje y seguramente a la estabilidad climática de la vivienda (Fig. 144).



Fig. 144: Vistas parciales y detalle constructivo de la Casa Gigli. Luis Gigli (1965). (García J. 2012).



(Fig.144)

Tanto las bóvedas tabicadas como las láminas de hormigón (en menor desarrollo que las primeras), generan un aglomerado de beneficios en la construcción y que el propio Eladio Dieste sintetizó en su publicación sobre bóvedas de cerámica reforzada para la Unesco en 1985 y que puedes ser aplicada en cierta medida a las láminas de hormigón y que los desglosamos a continuación:

- Gran economía de materiales, en especial del hormigón, del hierro y de la madera.
- Amplia utilización del ladrillo, material barato y que abunda en casi todos los rincones del mundo.
- Aislación térmica importante, en el caso del ladrillo, que se puede aumentar de manera fácil y económica.
- Estética agradable, tanto interior como exteriormente con un coste adicional mínimo (se aplica también a las láminas o cascarones de hormigón).
- Es una tecnología simple al alcance de cualquier artesano común (tanto en casos de bóvedas tabicadas como láminas de hormigón se recomienda una supervisión técnica).
- Durabilidad indefinida con gastos de conservación muy bajos.

## LA ARQUITECTURA DE DIÉBÉDO FRANCIS KÉRÉ EN BURKINA FASO

Un claro ejemplo de que construir con materiales apropiados logrando edificaciones con un alto grado de sostenibilidad es la arquitectura realizada por el arquitecto Diébédó Francis Kéré.

Tras sus estudios en Alemania, Francis Kéré regresó a Burkina Faso con una idea clara de cómo podía ayudar a su comunidad, la Villa de Gando.

Mediante el uso de las técnicas constructivas

tradicionales con barro y arcilla, Francis Kéré y a través de un proceso de capacitación para la gente de su comunidad, dando a entender la importancia de la colaboración y de las bondades de la tierra una de las *arquitecturas más amables* en términos de adaptabilidad y sostenibilidad.

Una vez más la arcilla cocida, se convierten en protagonistas de una arquitectura contemporánea e idónea en términos de *economía cósmica*, como la llamaba Eladio Dieste, a aquellos sistemas constructivos que no sólo se centran en el tema financiero sino también en los aspectos medioambientales y sociales (Mas Guindall, A. 2005).

Las condiciones climáticas de un país como Burkina Faso no son precisamente de carácter templado, las altas temperaturas en la mayor parte del año y las fuertes lluvias en la época de invierno hacen de éste un lugar donde la arquitectura tradicional y los nuevos ideales de sostenibilidad se pone a prueba.

La escuela para la Villa de Gando (Fig. 145) fue sin duda el proyecto que dio a conocer a Francis Kéré, su innovación en el uso del material y las técnicas bioclimáticas implementadas fueron claras y legibles desde un primer momento.



(Fig.145)

Este edificio fue el primero dentro de todo un complejo de varios sub proyectos, los cuales contempló casas para los profesores, parcelas para la agricultura local y un equipamiento deportivo. Más adelante, se realizaría una ampliación de la escuela que contó con otras innovaciones como el uso de bóvedas tabicas.

Francis Kéré en una entrevista realizada por Özlem Özdemir en Junio de 2013, explica cómo la importancia de un edificio bajo los conceptos bioclimáticos y sostenibles pueden afectar en la vida de una comunidad, desde los niños hasta las personas adultas que llegaron a sentirse orgullosos de contar con edificaciones tan particulares y realizadas por su propio esfuerzo.

La escuela de Gando, está compuesta por tres aulas en mamposterías de ladrillo (que como ya se ha explicado en líneas anteriores el ladrillo es un material noble en cuanto a inercia térmica se refiere, fabricados manualmente por la comunidad y donde los vanos de las grandes ventanas están protegidos con marcos metálicos con varias posibilidades en el control de abierto y cerrado que permite el paso de luz y aire (Fig. 146). Las aulas están cubiertas por una ligera estructura de acero que separa las planchas metálicas corrugadas en voladizo (que brindan protección ante la exposición solar y la lluvia) de un cielorraso de fábrica suspendida, dicha separación permite el continuo circular del aire (Fig. 147) (Francis Kéré, D. 2009).



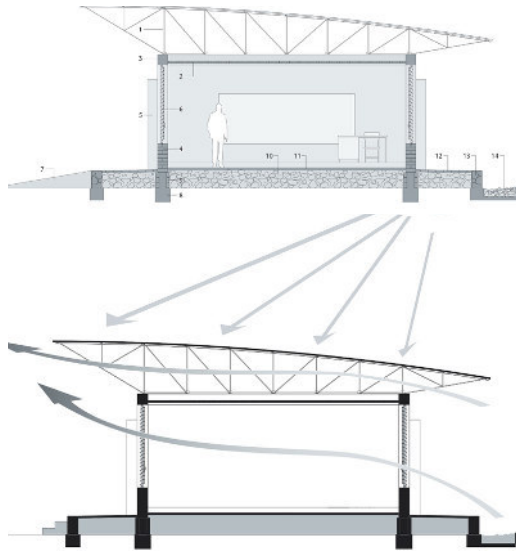
(Fig.146)

En este caso se usan elementos metálicos, debido a la alta durabilidad del mismo, pero sobre todo, porque la madera del lugar es propensa a ser atacada por termitas, lo que hizo que su utilización se limitara a elementos puntuales (Fig. 148) (Francis Kéré, D. 2009).

Fig. 145: Escuela de la Villa de Gando. Francis Kéré (2001) Foto: Simeon Duchoud. [www.tectonica.es](http://www.tectonica.es)

Fig. 146: Interior de una de las aulas perteneciente a la Escuela de la Villa de Gando. Francis Kéré (2001) Foto: Simeon Duchoud. [www.tectonica.es](http://www.tectonica.es)





(Fig.147)

Sin duda alguna, la gente de la Villa de Gando bajo la supervisión y la capacitación de Francis Kéré, lograron espacios habitables llenos de confort y de una estética acogedoras.

Ya lo señaló el propio Francis Kéré en la entrevista antes mencionada que lo más importante era saber transmitir los conocimientos en construcción a la comunidad, pues el que estuvieran convencidos de que lo podían realizar, sin importar la condición social o género.



(Fig.148)

En el caso de la vivienda ponemos como ejemplo las casa de los profesores de la Villa de

Gando, que son muestra de una arquitectura sostenible tanto por la fuerza que evoca el material, el sistema constructivo que se adapta a las condiciones climáticas pero sobre todo por esa cohesión con el medio ambiente mediante el uso de las bondades de la tierra como material sostenible y duradero (Fig. 149).



(Fig.149)

Las seis casas están compuestas por módulos que se adaptan entre sí, las bóvedas tabicadas que se utilizan permiten un acogedor espacio interior a la vez que ayudan a climatizar el interior.

Las viviendas están conformadas por muros de 40cm. de espesor (lo que genera un aislamiento adecuado ante las altas temperaturas) y con un recubrimiento de betún sobre un mortero de barro mezclado con materias vegetales y estiércol de vaca. El betún se lo añadió como medida de protección contra las termitas que son las causantes del deterioro en muchas viviendas de carácter tradicional, todo sobre una cimentación de cemento y piedra de granito.

Al ser construcciones de barro se les implementó en cada una de las cubiertas planchas de metal corrugado con una separación de entre 100 y 150cm. mismas que proporcionan una ventilación adecuada además de la protección contra la humedad y dota de sombra a las fachadas gracias a los ligeros voladizos que poseen, similar a lo que ocurría con la escuela de la villa.

Día a día Francis Kéré continúa innovando las

**Fig. 147:** Escuela de la Villa de Gando. Sección transversal arquitectónica que muestra el flujo del viento y la protección solar. Archivo de Francis Kéré (Kéré, F. 2009).

**Fig. 148:** Escuela de la Villa de Gando. Armado de la cubierta. Foto: Diébédo Francis Kéré (Kéré, F. 2009).

**Fig. 149:** Escuela de la Villa de Gando. Casas de los profesores. Francis Kéré (2004) Foto: Diébédo Francis Kéré (Kéré, F. 2009).

prestaciones de edificios con técnicas tradicionales mediante el uso de barro y arcilla cocida, lo cual le ha valido para tener el reconocimiento y respaldo por parte de grandes instituciones que hacen que este tipo de obras sigan ganado terreno entre aquellas personas y comunidades que más lo requieren.

# EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO

**evaluación y diagnóstico sostenible**

## IDENTIFICACIÓN DE VENTAJAS Y DEFICIENCIAS: Los elementos de estudio bajo los criterios de sostenibilidad.

La sostenibilidad en la construcción es un tema que ha tomado una fuerza considerable en las últimas dos décadas llegando a ser un concepto que todo profesional dentro de la rama del diseño y la construcción debe tener presente al momento de hacer arquitectura.

En este apartado trataremos de identificar las ventajas y deficiencias que han presentado los sistemas constructivos analizados con anterioridad bajo el contexto medioambiental, social y económico al momento de su concepción, teniendo en cuenta el contexto económico en el que se encontraban y los resultados que tuvieron en la construcción de vivienda.

Está claro que los sistemas constructivos que se detallaron en el capítulo anterior tuvieron un efecto de gran importancia para el desarrollo de las estructuras, pero qué aporte nos pueden brindar hoy en día? donde el concepto de sostenibilidad es cada vez un instrumento necesario y a tener en cuenta al momento de proyectar cualquier tipo de edificación?

Al momento de establecer una comparación entre los dos grandes sistemas podemos destacar que en primera instancia los sistemas de láminas de hormigón y bóvedas tabicadas reforzadas fueron y siguen siendo grandes innovaciones estructurales, que aquellos que la supusieron desarrollar y poner en práctica de manera sutil y elegante entran en el

marco de ser llamados *artistas estructurales* (definición empleada por el profesor David Billington y la profesora María Garlock). (Larrambebere, G. 2010).

Un dominio de las ciencias básicas y una apasionada búsqueda de armonía, belleza y economía, el explotar al máximo las capacidades del hormigón y del ladrillo cerámico para resistir las diferentes tensiones (Larrambebere, G. 2010) fueron los elementos determinantes para que las láminas de hormigón de Candela y Torroja y las bóvedas de Dieste, González Lobo o Sacriste se convirtieran en verdaderos ejemplos de construcción y creatividad dentro de la ingeniería y la arquitectura llegando inclusive a un nivel artístico.

De alguna manera se ha dicho que los cascarones de hormigón y las bóvedas de cerámica tradicionales y reforzadas han pasado de moda, que no son prácticos o que carecen de buena iluminación, que el auge económico de los años 50 en Latinoamérica y el bajo coste de la mano de obra así como normas constructivas, no tan estrictas, fueron motivos para desarrollar estas técnicas constructivas.

Bajo estas premisas deberíamos preguntarnos *qué nos brindan los cascarones de hormigón y de cerámica que puede ayudarnos a generar edificaciones más sostenibles?*

Para responder a la interrogante analizaremos

las tres características que actúan directa o indirectamente en la sostenibilidad de un edificio.

## MATERIAL

- **Cascarones de Hormigón**

Las bondades de absorber con gran facilidad los esfuerzos a compresión del hormigón lo hacen un material altamente resistente sin la necesidad de grandes espesores lo que le otorga un alto grado de liviandad lo que a su vez es una ventaja en zonas sísmicas, debido a que una estructura liviana tiende a poseer una mayor resistencia a las oscilaciones de un movimiento telúrico.

Un sencillo mallado interior es suficiente para absorber las sollicitaciones de tracción, así como para el control de fisuras. Está claro que al igual que en cualquier edificación, sea o no sea una lámina, se debe tener especial cuidado en evitar la porosidad del hormigón para evitar filtraciones y daños en el acero interno.

En el desarrollo de las láminas de hormigón podemos constatar que un hormigón de poca fluidez puede ayudar a generar formas muy atractivas y resistentes, la capacidad de conformar superficies con altos grados de inclinación dan oportunidades en el desarrollo de la creatividad (teniendo siempre presente que la forma es parte de la resistencia de la edificación).

El hormigón es un material que se realiza hoy en día de manera común en muchas partes del mundo, y menos contaminante de lo que se piensa gracias a su durabilidad; si a esto le agregamos que se requieren pocas cantidades, podemos asegurar un sistema constructivo que ayude a futuras generaciones

- **Bóvedas de Cerámica**

En el caso del ladrillo cerámico, éste es un material resistente, durable, económico, aislante, manuable y cálido con una tradición constructiva

utilizada durante siglos (Larrambebere, G. 2010) fácil de conseguir en muchos lugares.

Al igual que el hormigón se lo puede fabricar de manera artesanal o industrial, aunque se recomienda este último para garantizar las resistencias por temas de seguridad y durabilidad.

El armado de bóvedas de cerámica reforzada se realiza uniendo los ladrillos con un mortero simple de arena y cemento (material que se utiliza para la cubrición del extradós de la bóveda), se utiliza un mallado interior dispuesto en las juntas entre ladrillos embebida en la capa de mortero (alisado), llegando a conformar una estructura más liviana, incluso que el hormigón.

En el caso de las bóvedas auto portantes de Dieste, se añadía un armado de acero pretensado para el correcto traslado de esfuerzos hacia los elementos laterales, otorgando la característica de una gran viga curva, manteniendo las características económicas de la estructura.

El espesor mínimo que alcanzan estas estructuras (láminas de hormigón con espesor regular de 4cm. y una mínima de 1,5cm en el caso del Pabellón de Rayos Cósmicos y bóvedas gausas y auto portantes entre 8 y 15cm.) reducen el uso de material y por consecuencia el coste, así como la forma ayuda a absorber las sollicitaciones o esfuerzos principales directos (Lamberbere, G. 2010).

Tanto las láminas de hormigón como las bóvedas de cerámica reforzada fueron diseñadas de manera que no se sufra un desperdicio de material a partir de su forma siendo eficientes y apropiadas (Garlock, M. 2009).

## ENCOFRADO Y CIMBRA

- **Cascarones de Hormigón**

En este caso, las cimbras y encofrados más eficientes y de menor coste son las necesarias para

los paraboloides hiperbólicos en cuanto que la forma se la obtiene a partir de elementos rectos debido a las generatrices de los hyper, siendo más rápida su elaboración.

Dentro de las bondades que nos puede brindar los encofrados y cimbras de estructural laminares de hormigón, están los utilizados para los paraguas de Candela, los mismos que pueden ser reusables dentro de una misma construcción.

Por otro lado, la cimbra y encofrado utilizados para láminas de doble curvatura pero ajenas a los hyper, presenta una complejidad mayor debido a que el encofrado curvo es indispensable para obtener una forma exacta como la que se busca en estos casos.

Hoy en día en la construcción se prescinde de la cimbra de madera utilizando andamiajes y puntales de hierro, lo que facilita aún más su elaboración.

- **Bóvedas de Cerámica**

En lo que se refiere a bóvedas se usaban cimbras móviles, las mismas que se realizaban en franjas.

Los encofrados constaban de una estructura metálica fijando las ruedas (en el caso de la cerámica reforzada) a las rieles que se elaboraban para su desplazamiento, poseían también gatos electromecánicos para facilitar el descentrado de los encofrados de madera que estaban sujetos a costillares del mismo material noble (Larrambeberé, G. 2010).

Para los muros de superficies regladas en el caso de Dieste, no era necesario el encofrado, simplemente un andamiaje que permitiese su alzado.

## ILUMINACIÓN

En ambas técnicas constructivas ha quedado demostrado y desmitificado que las bóvedas o los cascarones hayan perdido vigencia por no permitir el paso de iluminación.

Las variaciones realizadas por Félix Candela, Eladio Dieste y otros muchos profesionales del diseño y la construcción dejan entrever que las posibilidades de brindar una iluminación correcta en cualquier edificación es posible. La simple inclinación de los paraguas o pequeñas variaciones de altura de los bordes son suficientes para otorgar el acceso suficiente de luz en un espacio.

Como hemos podido apreciar, a grandes rasgos, las técnicas constructivas estudiadas presentan muy pocas desventajas frente a las magnitud de las bondades que podemos adquirir de ellas, no obstante se ha desarrolla un diagrama que ayudaría a comprender de mejor manera las posibilidades de estos sistemas constructivos dentro de los índices de sostenibilidad (Fig. 150).



Fig. 150: Diagrama comparativo del Grado de Sostenibilidad entre los sistemas de Láminas de Hormigón y Bóvedas tabicadas. Elaboración propia.

(Fig.150)

CONCLUSIONES **conclusiones**



- En la introducción del presente trabajo hemos estudiado la evolución de los sistemas constructivos en los que se centra el trabajo, desde las bóvedas clásicas hasta las láminas o cascarones reforzados de hormigón y de cerámica.

Podemos concluir respecto de este apartado, que existió un momento determinado dentro de la historia de la arquitectura y las estructuras que se fundamentó en encontrar sistemas constructivos donde la estabilidad de los mismos se centraba en la forma.

Las estructuras laminares empezaron a tomar importancia a finales de los años 20 en Europa y entre los años 50 y 70 continuaron evolucionando, especialmente en Latinoamérica con las estructuras de hormigón y las bóvedas de cerámica reforzada.

La tendencia actual por retomar estos sistemas constructivos influye a que hoy en día muchos seamos los interesados en indagar en las ventajas que puedan beneficiar el campo de la construcción en los factores económicos, sociales y medioambientales.

- En el segundo capítulo hemos estudiado casos representativos dentro de las técnicas constructivas que podrían tener más prestaciones dentro de los cánones de sostenibilidad.

Hay que tener en cuenta que en la época en la que se concibieron no era un requisito tener en

cuenta este criterio, pero que sí se trataba de llegar a una economía global dentro de la construcción dadas las situaciones en las que se encontraba cada uno de ellos.

Se decide seguir un proceso investigativo de investigación sobre una obra de cada uno de tres de los profesionales más representativos en cada uno de los sistemas establecidos, como tema central de este trabajo.

La capilla abierta de la Palmira en Cuernavaca, México del arquitecto hispano mexicano Félix Candela, el Mercado de Abastos en Algeciras del ingeniero español Eduardo Torroja y finalmente la iglesia de Cristo Obrero en Atlántida, Uruguay obra del ingeniero Eladio Dieste.

El estudio realizado ha permitido recopilar información sobre cada uno de los autores y los avances y aportaciones al mundo de la arquitectura, las estructuras y por supuesto a la construcción, así como las condiciones en la que su entorno se desarrolló y que influenciaron a dicho desarrollo.

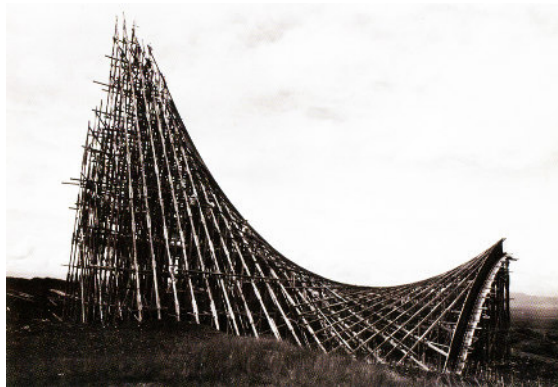
En cada una de las obras antes mencionadas, se han analizado los siguientes aspectos: los *métodos de cálculo*, el tipo de mano de obra usada en los *encofrados* y *cimbra* utilizados en cada una de los sistemas constructivos y su implicación en la construcción al igual que en la *puesta en obra del material principal* y terminado en los *revestimientos* y *acabados* de las edificaciones.

Todo ello nos ha permitido conocer con profundidad los sistemas constructivos que, en algunos casos, pueden ser ajenos a nuestra realidad.

Se consigue establecer una idea base sobre los diferentes esfuerzos que actúan sobre este tipo de estructuras y las ventajas que supone edificar con ellas, por ejemplo, al ser estructuras relativamente livianas, tienen una gran resistencia a movimientos sísmicos o de gran impacto.

Hemos de concluir que el ahorro de material llega a ser muy alto al construir láminas de doble curvatura, al usar hormigón o cerámica la resistencia de los mismos proporciona gran estabilidad y seguridad a las estructuras.

Se han identificado los diferentes encofrados y cimbras utilizados para edificar las láminas de base hyper mediante elementos rectos gracias a su composición formal o el innovador andamiaje móvil para construir las bóvedas gausas, así como los problemas en encofrados curvos que deben sortearse para lograr láminas adecuadas (Fig. 151).



(Fig.151)

Llegamos a conocer que una de las principales causas del declive de las láminas fue el encarecimiento de la mano de obra de la época, sin embargo, con las tecnologías actuales podemos pensar en nuevas oportunidades en el desarrollo de encofrados móviles y más asequibles e incluso herramientas o maquinarias que ayudarían a una rápida puesta en obra de los

materiales.

De igual manera, hemos llegado a conocer diferentes formas de concretar un espacio que genera nuevas emociones, que el uso de un único material no supone caer en la monotonía y que con un poco de imaginación se pueden conseguir resultados sorprendentes.

Hemos llegado a concluir que los acabados y las formas que nos brindan las láminas y bóvedas podrían ser un complemento adecuado en la búsqueda de espacios interiores e incluso exteriores más acogedores y dinámicos (Fig. 152).



(Fig.152)

- Tras el estudio de estas técnicas constructivas aplicadas en el ámbito de la vivienda social, se han corroborado las bondades y los nuevos caminos de evolución que han tenido, en especial las bóvedas tabicadas.

Las viviendas con bóvedas en Latinoamérica realizadas por Antoni Bonet, Rogelio Salmons o Eduardo Sacriste entre otros, fueron sistemas adoptados por la influencia que las bóvedas generaron en personajes como Le Corbusier y de él a los antes mencionados.

Hemos podido concluir que las técnicas que conllevan cerámica tienen un futuro dentro de la arquitectura latinoamericana, que a diferencia de las láminas de hormigón, éstas fueron capaces de sufrir

**Fig. 151:** Armado de los elementos rectilíneos en la estructura de encofrado en la Capilla de Cuernavaca, México (1958). Félix & Dorothy Candela Archive, Princeton University.

**Fig. 152:** Vista del interior de la casa Dieste. Punta Gorda, Uruguay (1968). (Roig, J. 1970).

un desarrollo más profundo en el tema de la vivienda inclusive en la época actual.

El breve acercamiento a la obra del arquitecto africano Diébédo Francis Kéré en Burkina Faso en la Villa de Gando, ha mostrado las ventajas dentro de una arquitectura sostenible a través de la participación ciudadana y mediante técnicas tradicionales de barro y arcilla en condiciones climáticas un tanto extremas (Fig. 153).



(Fig.153)

- Finalmente hemos terminamos el trabajo de investigación elaborando un análisis comparativo de las ventajas y desventajas que conllevaría realizar edificaciones bajo los sistemas de bóvedas de cerámica y láminas de hormigón.

Los resultados muestran que se tratan de sistemas constructivos con un nivel de replicabilidad alto, es decir que son técnicas que pueden ser elaboradas en casi todo el mundo ya que son de fácil ejecución siempre y cuando se cuente con los lineamientos adecuados

Los costes por mano de obra, material y mantenimiento son relativamente bajos en nuestros días pues existe un adelanto tecnológico que beneficia la ejecución en tiempo y dinero (Fig. 154).

De igual modo, el uso de materiales locales en el caso de la cerámica y del hormigón son de fácil acceso para las personas y los costes son más bajos

debido al ahorro de material por la condición de ser estructuras laminares.



(Fig.154)

Se ha mostrado que si bien la energía embebida por el ACV de materiales como el hormigón puede ser alta a comparación de la cerámica o ladrillo, la durabilidad de las estructuras en relación a la cantidad y a la factibilidad de ejecución puede llegar a compensar los altos parámetros.

Por último, hemos visto que la generación de residuos que derivan de la construcción con estos sistemas es muy baja, lo que es un beneficio global al momento de pensar en el daño ecológico que producen las técnicas constructivas más comunes.

**Fig. 153:** Escuela de Gando. Gente de la Villa armado de la cubierta. Foto: Diébédo Francis Kéré (Kéré, F. 2009).

**Fig. 154:** Puesta en obra del hormigón en el Oceanográfico de Valencia mediante proyección (2000). Foto: Empresa Constructora FCC (Vinat, S. 2011).

## BIBLIOGRAFÍA

ADELL, José. María. *Las Bóvedas de la Atlántida*. Informes de la Construcción. Vol. 44, N.º 421, 1992.

ADELL, José. María. *Luis Moya y las bóvedas tabicadas en la posguerra española* (Luis Moya and Tile Vaults in Post-war Spain). Informes De La Construcción, 2005. vol.56 p. 25-29.

ALARCÓN AZUELA, Eduardo. *Aquella primavera perdida... La historia del hotel Casino de la Selva en Cuernavaca*. México D.F. *Revista Bitácora* N°23 (Noviembre 2011) p. 68-73.

de ANDA ALANÍS, Enrique. *Félix candela: 1910-1997: El dominio de los límites*. Köln: Taschen, 2008.

ANTUÑA, Joaquín. *Las Estructuras en la Edificación de Eduardo Torroja*. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Mayo, 2002.

AREEN, S. (2014). *Steve Areen*. Retrieved Julio 28, 2014, from <http://www.steveareen.com/>

ARNAU, Fernando. *La iglesia de S. Nicolas en el Grau de Gandía: Estudio Histórico y Estructural*. Trabajo Final de Máster. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Septiembre, 2014.

BASSEGODA NONELL, J. *La construcción tradicional en la arquitectura de Gaudí*, (traditional Construction in the Architecture of Gaudí). Informes de la Construcción, 1990. vol. 42, p. 9-14.

BASTERRA, A.; CHAMIZO, A.; GUTIÉRREZ, E. *Félix Candela y el borde libre, el caso de la capilla de Palmira en Cuernavaca*. *Revista Bitácora Arquitectura*, nº 5. México D.F, 2001. pp. 38-47

BASTERRA. *In IVAM Institut Valencià d'Art Modern (Ed.), Félix candela 1910-2010: [exposició]* España: IVAM institut valencià d'art modern, 21 de octubre 2010 - 2 de enero 2011.

BERNAT-MASO, E., GIL, L., ROCA, P., SARRABLO, V., & PUIGVERT, F. *Mechanical characterisation of textile ceramic plates. testing on elastic foundations*. (Caracterización mecánica de las placas de cerámica textiles. Las pruebas en cimientos elásticos). *Engineering Structures*, 2014. vol. 74, p.193-204.

CABEZA LAINES, J. M., & ALMODÓVAR MELENDO, J. M. *La bóveda de cerámica armada en la obra de Eladio Dieste. Análisis y posibilidades de adaptación a las condiciones constructivas españolas*. Actas Del Primer Congreso Nacional De Historia De La Construcción, Madrid: del 19 al 21 Septiembre de 1996, p. 135-142.

CABEZA LAINEZ, J. M., JIMÉNEZ VERDEJO, J. R., & SÁNCHEZ-MONTANES MACÍAS, B. *The key-role of eladio dieste, spain and the americas in the evolution from brickwork to architectural form*. (El rol de Eladio Dieste, España y América en la evolución de ladrillo a la forma arquitectónica). *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2009. vol. 8(2), p. 355-362.

CANDELA, Félix. *En defensa del formalismo y otros escritos*. Bilbao: Xarait, 1985.

CANDELA, Félix; FABER, Colin. *Las estructuras de Candela*. México: Compañía Editorial Continental, 1981.

CANDELA, Félix; SAITO, Yutaka. *Félix Candela*. Tokyo: Toto, 1995.

CANDELA, Félix. *Félix Candela Arquitecto: Exposición. depósito elevado del canal de Isabel II*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, 1994.

CASSINELLO, Pepa. *Félix candela: Centenario 2010: La conquista de la esbeltez* (The achievement of slenderness). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2010.

CASSINELLO, P., SCHLAICH, M., & TORROJA, J. A. *Félix candela. in memoriam (1910-1997). from thin concrete shells to the 21st. century's lightweight structures*. (Félix Candela. En memoria (1910-1997). Del cascarón de hormigón a las estructuras ligeras del s. XXI). Informes De La Construcción, 2010. vol. 62, p. 5-26.

CASSINELLO, P. *The evolution of concrete shells; innovations by ildefonso sánchez del río*. (La evolución de las estructuras laminadas; innovaciones de Ildefonso Sánchez del Río). Informes De La Construcción, 2013. vol. 65, 530, p. 147-154

CHOISY, Augurte. *El Dibujo de las Cimbrias Romanas y Góticas*. Pedro Augusto Hustado Valdez, 2008

del CUETO RUIZ-FUNES, Juan Ignacio. *Cien Años de Félix Candela: Vuelos Impensados*. Revista de la Universidad de México. Nueva época. Noviembre 2009, No. 69, 2009.

del CUETO RUIZ-FUNES, Juan Ignacio. *Félix Candela, el mago de los cascarones de concreto*. Arquine, Revista Internacional De Arquitectura, 1997. N° 2.

del CUETO RUIZ-FUNES, Juan Ignacio. "Las Bóvedas por arista de Félix Candela: Variaciones sobre un mismo tema". México D.F. *Revista Bitácora* N°23 (Noviembre 2011) p. 38-47.

DIESTE, E., MONTAÑEZ, E. R. *Bóvedas Arco de Directriz Catenaria en Cerámica Armada*. Artículo para la Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Montevideo, 1985.

DRAPER, Powell, MOREIRA, Maria, BILLINGTON, David. *Finite-Element Analysis of Felix Candela's Chapel of Lomas de Cuernavaca*. Journal of Architectural Engineering@ ASCE. 2008, p. 47-52.

DURÁN, Gonzalo. *JUSTO GARCÍA RUBIO: "Estación de autobuses del Casar de Cáceres"*. <http://linea-serpentina.blogspot.com.es/>, 2013.

ECHAIDE, Rafael, *La Arquitectura es una Realidad Histórica*. Pamplona: T6 Ediciones S.L., 2002.

EISENBACH, P., VASUDEVAN, R., GROHMANN, M., BOLLINGER, K., & HAUSER, S. (2014). *Parapluie - realisierung einer ultraschlanken. betonschale durch aktivierung einer membrantragwirkung* (Parapluie - realización de un ultra-slim. Cáscara de hormigón mediante la activación de un efecto de soporte de membrana). Berlin: Beton - Und Stahlbetonbau, 2014. vol. 109, N°1, p. 53-59.

ESCRIG, F., & SÁNCHEZ, J. *La bóveda de hormigón del club táchira en caracas*. Informes De La Construcción, 2005. vol. 57, p 133-144.

FABER, C. *Las Estructuras de Candela*. Mexico: Compañía Editorial Continental, 1981.

FABRA, Josep. *The Algeciras Market Hall in the Work of Eduardo Torroja*. Trabajo Final de Carrera. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Mayo, 2012.

FONTANA CABEZAS, Juan José. *Las bóvedas gausas de Eladio Dieste*. Anexo de la Tesis Doctoral El Diseño Estructural en las Formas Complejas de la Arquitectura Reciente. Alicante: Universidad de Alicante, 2012, p. 71-94.

GARCÍA, J., GONZÁLEZ, M., LOSADA, J. C. *Arquitectura y construcción tabicada en torno a Eduardo Sacriste*. Informes de la Construcción, 2012. vol. 64, 525, p. 35-50.

GARGOLLO y PARRA, Manuel. *Tip. Literaria de F. Mata, ed. Estática de las bóvedas: resumen de las lecciones orales de 1860*. Madrid: Academia Nacional de San Carlos (primera edición), 1878.

GARLOCK, María; BILLINGTON, David. *Félix Candela : Engineer, Builder, Structural Artist*. New Haven, Conn.; London: Yale University Press, 2008.

GONZÁLEZ CASARES, J. A., MARTINEZ CARRILLO, M. J., & RUIZ-SANCHEZ, A. *Estudio y aplicación de superficies curvas en el patrimonio arquitectónico*.

(Research and Applications of Curved Surfaces in Architectural Heritage). Departamento De Construcciones Arquitectónicas De La Universidad De Granada.

GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, J. L. *La bóveda tabicada: Entre la conservación y la destrucción*. Informes De La Construcción, 2005. vol. 56(496), p. 67-72.

GONZÁLEZ ORTIZ, Humberto. *Carlos González Lobo... Caminos hacia lo alternativo dentro del ámbito conceptual, proyectual y contextual de la arquitectura*. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Junio, 2002.

GROMPONE, Juan. *Eladio Dieste, Maestro de la Ingeniería*. Artículo no publicado para la Universidad de la República. Montevideo: Versión electrónica 2011

GUASTAVINO, Rafael, HUERTA, Santiago. *Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura*. Madrid: Instituto Juan de Herrera: CEDEX, 2006.

HISTOPTICA. *Breve historia de la óptica y la astronomía; sus orígenes, inventos y descubrimientos de sus precursores*. <http://www.histoptica.org>, 2010-2014.

HUEDO, P., & LOPEZ MESA, B. *Revisión de herramientas de asistencia en la selección de soluciones constructivas sostenibles en edificación*. Informes De La Construcción, 2013. vol. 65(529), p. 77-88.

HUERTA, Santiago. *Arcos, bóvedas y cúpulas. geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan Herrera. (Primera Edición), 2004.

HUERTA, Santiago. *Mecánica de las bóvedas de fábrica: El enfoque del equilibrio* (Masonry vault mechanics: The equilibrium Approach). Informes De La Construcción, 2005. vol. 56(496), p. 73-89.

HUERTA, Santiago. *Mecánica de las bóvedas tabicadas*. MADRID: Revista de Arquitectura, 2005. vol. 56(496), p. 102-111.

HUIJBEN, F., VAN HERWIJNEN, F., & NIJSSE, R. *Concrete shell structures revisited: Introducing a new "low tech" construction method using vacuumatics formworks*. International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, 2011.

JAUREGUIZAR, F., & VALCÁRCEL, J. P. *Torroja y las láminas de hormigón en la posguerra española: El*

*gimnasio-piscina de la Escuela Naval de Marín*. Madrid: Actas Del Cuarto Congreso Nacional De Historia De La Construcción. Cádiz, 27 al 29 de Enero de 2005. p. 616-622.

KÉRÉ, Diébédo Francis. *Escuela Primaria de Gando*. Revista digital Tectónica, 2009. [www.tectonica.es](http://www.tectonica.es)

KRIVOSHAPKO, S. N., BOCK HYENG, C. A., & MAMIEVA, I. A. *Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells*. Ijrras, 2014. vol. 18

KURRER, K. *The History of the Theory of Structures*. Berlin: Ernst and Sohn Verlag für Architecktur und Technische, 2008.

LAMELA, A. *La sostenibilidad, un reto global ineludible*. (Sustainability, An Inescapable Global Challenge). Informes De La Construcción, 2005. vol. 57(499-500), p. 55-65.

LANDA, Alexandra. *Introducción a la Arquitectura: Santiago Calatrava y Félix Candela*. Abril, 28. 2010, de <http://landa-arq.blogspot.com.es/2010/04/santiago-calatrava-y-felix-candela.html>

LEE, Janice; GARLOCK, María. *Eladio Dieste y Félix Candela: A comparative analysis*. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. Valencia, 2009. p. 1562-1573.

LLORENS, J. *De las viguetas a las bóvedas tabicadas, el manierismo decorativo y la situación actual*. Unpublished manuscript, 2012.

LOONEN, R. G. C. M., TRCKA, M., & HENSEN, J. L. M. *Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. vol. 25, p. 483-493.

MAS GUINDAL, A. J. *Eladio Dieste y la Cerámica Estructural en Uruguay*. (Eladio Dieste and Structural Brick in Uruguay). Informes De La Construcción, 2005. vol.56(496), p. 13-23.

MIRANDA, T., BERMEJO, F., MÓNACO, M. P., & CAPILLA, J. C. *Rafael Guastavino y la "construcción cohesiva"*. (Rafael Guastavino and "cohesive construction"). Quaderns d'Arquitectura i Urbanisme, 1986. vol. 171, p. 78.

NORDENSON, Guy. *Seven structural engineers: The Felix Candela Lectures*. New York: The Museum of Modern Art, 2008.

OCHSENDORF, J. *Los Guastavino y la bóveda tabicada en norteamérica*. (The Guastavinos and Tile Vaults in North América). Informes De La Construcción, 2005. vol. 56(496), p. 57-65.

OCHSENDORF, J. A., & FREEMAN, M. *Guastavino vaulting: The art of structural tile* Princeton Architectural Press. New York: Princeton Architectural Press, 2010.

PEDRESCHI, Remo. *The Structural Behaviour and Design of Free-Standing Barrel Vaults of Eladio Dieste*. Proceedings of the Second International Congress on Construction History vol. 3, 2006, p. 2451-2467.

PEDRESCHI, Remo. *Eladio Dieste*. London: Thomas Telford, 2000.

PEDRESCHI, Remo., THEODOSSOPOULOS, D. *The double-curvature masonry vaults of Eladio Dieste*. Proceedings of the ICE - Structures and Buildings, vol 160, N°. 1, 2007, pp. 3-11.

PEREIRA DE OLIVEIRA, L. A., NEPOMUCENO, M., & RANGEL, M. *An eco-friendly self-compacting concrete with recycled coarse aggregates*. (Un hormigón autocompactante eco-amigable con áridos gruesos reciclados), 2013. Vol. 65, EXTRA-1, 31-41

A.A.V.V. *Dieste*. DPA Documents de Projectes d'Arquitectura. Barcelona: Edicions UPC, 1999.

ROIG NAVARRO, Jorge. *La casa de Dieste en Punta Gorda*. Parte de: Documents de projectes d' Arquitectura, 1970 Issue 15.

ROLAND, Conrad. *Frei Otto: Estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, 1973.

ROSELL I COLOMINA, J. *Rafael Guastavino Moreno: Ingenio en la arquitectura del siglo XIX*. Actas Del Cuarto Congreso Nacional De Historia De La Construcción, Cádiz, 27 al 29 de Enero de 2005, p. 494-522.

SALIKLIS, E. P., & BILLINGTON, D. P. *Hershey Arena: Anton Tedesko's pioneering form*. Journal of Structural Engineering © Asce, vol. 129, p. 278-285.

SANZ, D. *Los ricos contaminan más. Ecología Verde*. Retrieved Junio/19, 2010, from <http://www.ecologiaverde.com/tag/co2/#ixzz37Qsn3FQy>

SEGUÍ BUENAVENTURA, M. *Félix Candela y Emilio Pérez Piñero : Un diálogo imaginal, proyecto para el*

*concurso del velódromo de anoeta* (an imaginary dialogue, competition for the anoeta velodrome): 1972. Madrid: Rueda, 2004.

SENENT DOMÍNGUEZ, R.; PÉREZ DE LOS RÍOS, C. *The construction of the rectangular groint vault in Gelabert's treatise: Theory and practice*. (La construcción de la bóveda de arista rectangular en el tratado de Gelabert: teoría y práctica) Informes de la construcción, 2013. vol. 65, (extra 2), p. 111-125.

SIERRA, María Rosa. *El Mercado Eduardo Torroja de Algeciras*. Suplemento para la Revista Almoraima N° 2. Noviembre, 1992.

TORRECILLAS, Antonio Jimenez. *Eladio Dieste. 1943 - 1996*. Consejería de Obras Publicas y Transportes Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Sevilla: Departamento de Publicaciones, 1996.

VINAT JARQUE, Sergio. *Construcción de la Cubierta del Restaurante Submarino*. Proyecto Final de Grado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Junio, 2011.

VITRUBIO POLIÓN, Marco, RODRIGUEZ Delfín; OLIVER, José Luis. *Los diez libros de arquitectura*. Madrid: Alianza, 1995.

WILEY, John & Sons. *Form, Force and Structure: A Brief Story*. Architectural Desing Magazine. Vol. 78 n°2. London, 2008. pp. 12-19.



## RESUMEN

El presente Trabajo Final de Máster hace un repaso entre los sistemas constructivos de Láminas o Cascarones en hormigón y cerámica y la evolución que éstos han tenido a través del tiempo (desde las bóvedas clásicas hasta llegar a la época actual); un estudio que pretende mostrar las diferencias de estas técnicas de la construcción mediante el análisis de tres obras que destacaron en su época y que fueron realizadas por arquitectos como Félix Candela, Eduardo Torroja y Eladio Dieste en contextos sociales muy distintos pero con ideales en común llegando a dar solución a problemas que relacionaban lo económico, lo formal y lo espacial mediante el método de cálculo de esfuerzos, la ejecución de encofrados y cimbras y la mano de obra necesaria para la puesta en obra de los materiales, entre otros, así como la influencia que tuvieron sus aportes, dentro de la arquitectura como de la ingeniería estructural, especialmente en Europa y Latinoamérica; además se intenta dar a conocer cómo fueron utilizadas las láminas de hormigón y las bóvedas de cerámica a nivel de viviendas en su “época de oro” y el desarrollo que han tenido hasta convertirse en una posible respuesta en lo social, en lo económico y en lo medioambiental incluyendo conceptos y soluciones que van por los criterios de la sostenibilidad, tan presente desde 1987 con el Informe Brundtland y que hoy en día sigue buscando la optimización de los recursos humanos, naturales y materiales a través de generar la menor cantidad de residuos, buscando estructuras rentables pero que sobre todo, intenten solucionar los problemas de integración social.

