



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de
Eladio Dieste: cerámica armada.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

AUTOR/A: Labrouzi Labid, Salma

Tutor/a: Perelló Roso, Ricardo

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de Eladio Dieste: cerámica armada.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

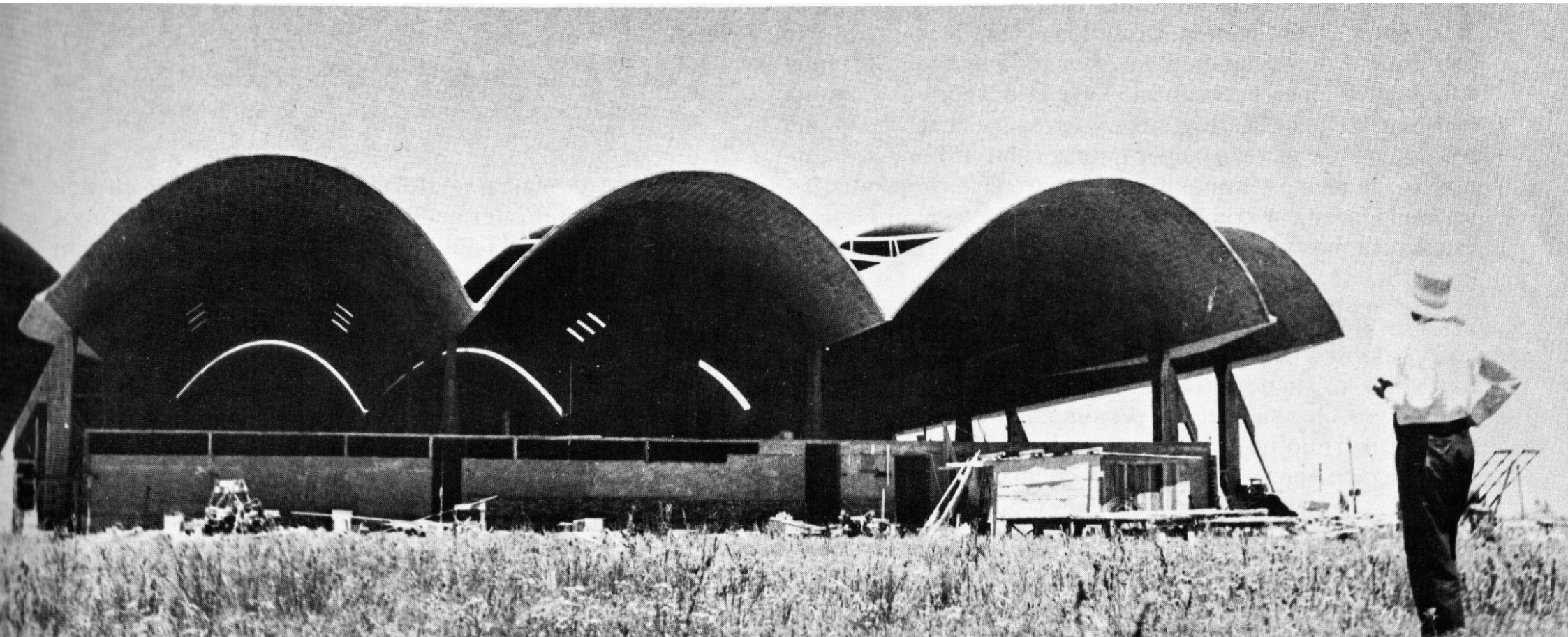
Autor ---- Salma Labrouzi Labid

Tutor ---- Ricardo Perelló Roso

Curso 2021-2022

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Grado en Fundamentos de la Arquitectura



"He procurado ser coherente con las exigencias de mi trabajo. Hacerlo bien. Ello me ha llevado a un camino de descubrimiento, primero de mí mismo. Ese camino usa la forma y ésta debe estar imbricada en las leyes que rigen la materia en equilibrio."

Eladio Dieste (Adell y Mas-Guindal, 2005)

Resumen.

La Fábrica de Domingo Massaro es una de las obras del ingeniero Eladio Dieste donde se emplea cerámica armada. Eladio Dieste (1917-2000) fue un ingeniero civil de origen uruguayo conocido por el uso del ladrillo, extendiendo su utilización a elementos laminares mediante el empleo de la tecnología de la cerámica armada.

El presente trabajo se centra principalmente en su obra La Fábrica Domingo Massaro donde se va a realizar un análisis del comportamiento estructural de las bóvedas de simple curvatura autoportantes de directriz catenaria, precomprimidas, sin vigas ni tímpanos y con muy pocos pilares.

Se trata de un edificio formado por dos cuerpos donde era muy importante la extrema economía que imponía el propietario; el resultado fue un cuerpo principal techado con 5 bóvedas autoportantes de ladrillo hueco armado y con un voladizo que apoya en seis líneas de cuatro pilares cada una, y un segundo cuerpo techado por 3 bóvedas autoportantes y con doble volado que apoyan en cuatro pilares centrales.

A partir de la documentación gráfica original aportada por el Centro de Documentación en Uruguay modelizan varias bóvedas autoportantes con diferentes soportes y vuelos para realizar un análisis cualitativo y cuantitativo tanto de las bóvedas aisladas como del conjunto con sus elementos de rigidización y arriostramiento. Para ello se va a proceder al modelado en Autocad y al estudio posterior del comportamiento estructural de dichas bóvedas en el programa de cálculo Angle, con el objetivo de entender y explicar el funcionamiento estructural del sistema y relacionarlos con los aspectos formales del mismo.

Palabras clave: Eladio Dieste, cerámica armada, bóveda autoportante, estructura, Angle.

Resum.

La Fàbrica de Domingo Massaro és una de les obres de l'enginyer Eladio Dieste on s'empra ceràmica armada. Eladio Dieste (1917-2000) va ser un enginyer civil d'origen uruguaià conegut per l'ús de la rajola, estenent la seua utilització a elements laminars mitjançant la utilització de tecnologia de la ceràmica armada.

El present treball se centra principalment en la seua obra La Fàbrica Domingo Massaro on es realitzarà una anàlisi del comportament estructural de les voltes de simple curvatura autoportants de directriu catenària, precomprimides, sense bigues ni timpans i amb molt pocs pilars.

Es tracta d'un edifici format per dos cossos on era molt important l'extrema economia que imposava el propietari; el resultat va ser un cos principal teulada amb 5 voltes autoportants de rajola buida armada i amb un volat que recolzen en sis línies de quatre pilars cadascuna, i un segon cos ensostrat per 3 voltes autoportants i amb doble volat que recolzen en quatre pilars centrals.

A partir de la documentació gràfica original aportada pel Centre de Documentació a l'Uruguai modelitzen diverses voltes autoportants amb diferents suports i vols per a realitzar una anàlisi qualitativa i quantitativa tant de les voltes aïllades com del conjunt amb els seus elements de rigidització i enriostament. Per a això es procedirà al modelatge en Autocad i a l'estudi posterior del comportament estructural d'aquestes voltes en el programa de càlcul Angle, amb l'objectiu d'entendre i explicar el funcionament estructural del sistema i relacionar-los amb els aspectes formals d'aquest.

Paraules clau: Eladio Dieste, ceràmica armada, volta autoportant, estructura, Angle.

Abstract.

The Domingo Massaro Factory is one of the works of the engineer Eladio Dieste where reinforced ceramics are used. Eladio Dieste (1917-2000) was a civil engineer of Uruguayan origin known for his use of brick, extending its use to laminar elements through the use of reinforced ceramic technology.

The present work focuses mainly on his work The Domingo Massaro Factory where an analysis of the structural behavior of self-supporting simple curvature vaults with catenary guideline, precompressed, without beams or tympanums and with very few pillars will be carried out.

It is a question of a building formed by two bodies where the extreme economy imposed by the owner was very important; The result was a main body roofed with 5 self-supporting hollow reinforced brick vaults with a cantilever supported by six lines of four pillars each, and a second body roofed by 3 self-supporting vaults with a double cantilever supported by four central pillars.

From the original graphic documentation provided by the Documentation Center in Uruguay, several self-supporting vaults with different supports and flights are modeled to carry out a qualitative and quantitative analysis of both the isolated vaults and the whole with its stiffening and bracing elements. For this, the modeling in Autocad and the subsequent study of the structural behavior of said vaults in the Angle calculation program will be carried out, in order to understand and explain the structural functioning of the system and relate them to its formal aspects.

Key words: Eladio Dieste, reinforced ceramics, self-supporting vault, structure, Angle.

Índice.

1. Objetivos.....	8
2. Eladio Dieste.....	9
2.1. Eladio Dieste: Biografía.....	9
2.2. Eladio Dieste: Antecedentes.....	11
2.3. Eladio Dieste: Obras	15
3. Cerámica armada.....	19
3.1. El uso del ladrillo como cerámica armada.....	19
3.2. Principios de la bóveda de cerámica armada. Clasificación por tipo estructural.....	20
3.2.1. Bóvedas de simple curvatura.....	20
3.2.2. Bóvedas de doble curvatura o gausas.....	21
3.2.3. Paredes de superficies regladas y láminas plegadas.....	22
3.3. Materiales utilizados.....	22
4. Antonio Bonet y Eladio Dieste.....	24
4.1. La bóveda tabicada.....	24
4.2. Bonet y Dieste: Vivienda Berlingieri.....	24
4.3. La Ricarda: Antonio Bonet	26
4.3.1. Las bóvedas.....	27
4.3.2. Problemas en elementos estructurales, revestimientos y cerramiento	28
5. Fábrica Domingo Massaro.....	29
5.1. Descripción del proyecto.....	29
5.2. Descripción de la estructura	30
5.3. Documentación gráfica	31
6. Estudio de la estructura.....	40

6.1.	Descripción y simplificación.....	40
6.2.	Análisis del comportamiento de las bóvedas.....	40
6.2.1.	Bóveda con función catenaria.....	40
6.2.2.	Bóveda con función parábola.....	47
6.3.	Modelización de los diferentes elementos.....	48
6.3.1.	Pilares.....	48
6.3.2.	Vigas laterales.....	49
6.3.3.	Bóveda.....	49
6.3.4.	Cerramiento, muros portantes y diafragmas.....	50
6.4.	Pretensado.....	55
6.5.	Asignación de cargas.....	56
6.5.1.	Cargas permanentes.....	56
6.5.2.	Cargas variables.....	56
6.6.	Hipótesis de cargas.....	61
6.7.	Combinación de cargas.....	61
7.	Análisis del comportamiento estructural.....	63
7.1.	Cargas gravitatorias.....	63
7.2.	Todas las cargas.....	66
7.3.	Fase 1 sin muros portantes ni diafragmas.....	69
7.4.	Fase 2 sin pretensado.....	71
7.5.	Comportamiento en fase 3.....	72
8.	Objetivos del desarrollo sostenible.....	74
9.	Conclusiones.....	75
10.	Bibliografía.....	79
11.	Bibliografía fotográfica.....	81

1. Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo es analizar el comportamiento estructural de la Fábrica Domingo Massaro del ingeniero Eladio Dieste.

Para lograr este objetivo, es necesario:

- a. El estudio de la obra arquitectónica a analizar en este trabajo.
- b. La investigación de obras arquitectónicas similares del ingeniero Eladio Dieste.
- c. La modelación de la estructura en Autocad.
- d. El aprendizaje y manejo del programa Angle para el cálculo de la estructura.
- e. Ser capaz de analizar y sacar conclusiones propias de los diferentes resultados obtenidos a través del programa Angle.

2. Eladio Dieste.

2.1. Eladio Dieste: Biografía

Eladio Dieste nació el 10 de diciembre de 1917 en Artigas (Uruguay), y falleció el 29 de julio del 2000 en Montevideo (Uruguay). (Jiménez y Pérez, 1996)

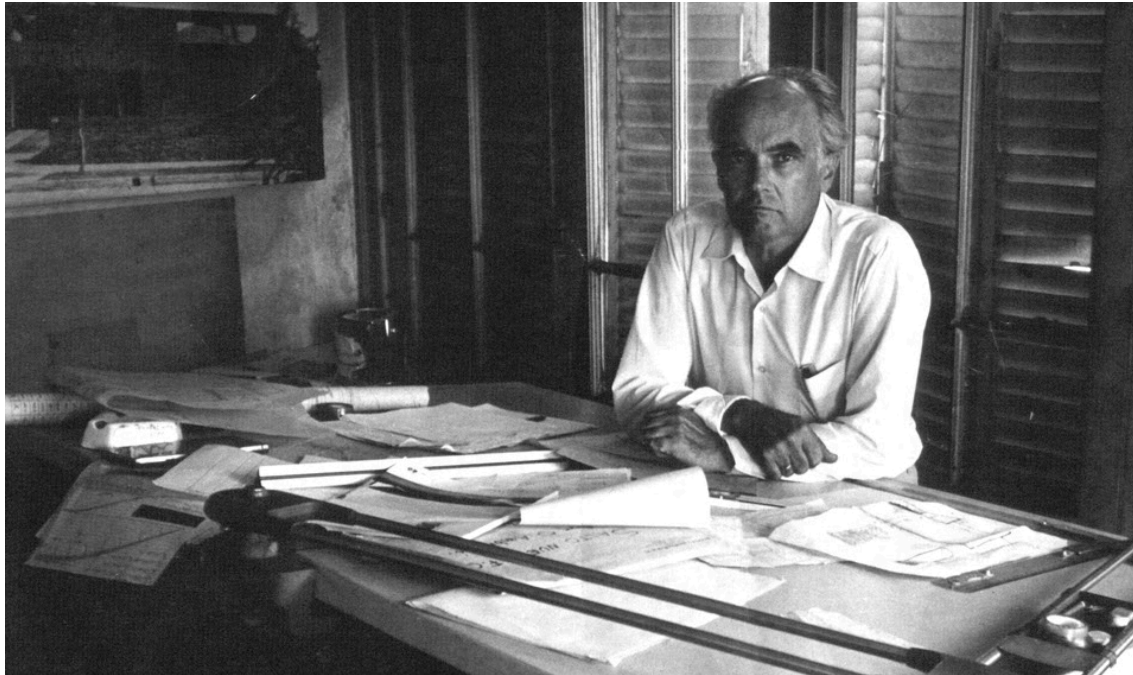


Fig. 1. | Eladio Dieste. Fuente: *Brecha*

La familia Dieste provenía de un pueblo pequeño de La Coruña, Rianjo; donde su abuelo paterno era el ministro de la Alta Corte de España. Su padre, también llamado Eladio Dieste, conoció en Salto a Elisa Saint Martin, quien sería su futura esposa. El matrimonio formado por Elisa y Eladio se estableció primero en Salto donde nació Ariel (1913) y posteriormente en Artigas donde nacieron Eladio (1917) y Saúl (1921). Se trataba de una familia de clase media, intelectual y liberal. (Grompone, 2011)

Dieste comenzó sus estudios en 1936 en la Facultad de Ingeniería de Montevideo a pesar de los escasos recursos de sus padres. Por las fechas de su formación, Dieste (junto a Eugenio Montañez) se encontraba en los comienzos de la *generación del 45* (llamada así por los hombres de letras). Esta generación se caracterizaba por su gran espíritu crítico, solidez de formación básica, respeto por las matemáticas y la física, y un espíritu innovador. (Grompone, 2011)

A partir del año 1936 comenzó la emigración española hacia Uruguay. Entre los emigrantes encontramos, por ejemplo, a Joaquín Torres García o León Friedheim. Este acontecimiento influyó en las ideas de Dieste ya que este se encontraba en Montevideo, le incitaban a aprender alemán y tuvo la oportunidad de vivir en un ambiente de clase media culta centro europea. Torres García le habló a Dieste de Antonio Gaudí dando lugar a una fructífera influencia. (Grompone, 2011)

En 1943 concluyó sus estudios y dos años después comenzó a trabajar en una constructora danesa llamada Christiani y Nielsen donde realizaba bóvedas de hormigón reforzado hasta 1948. En 1945 contactó con él Antonio Bonet, un arquitecto y urbanista español para el proyecto de la casa Berlinghieri. (Grompone, 2011)



Fig. 2. | Generación del 45. Fuente: Wikipedia



Fig. 3. | Dieste con sus compañeros de promoción. Fuente: Consejería de Arquitectura y Vivienda

En este proyecto Dieste le propuso a Bonet hacer una bóveda de ladrillo, una cáscara de ladrillo, la cual no se parecía en nada a una bóveda catalana. Realizó varios intentos de bóveda armada de diferentes dimensiones los cuales abandonó al dejar Christiani y Nielsen para ser director de Viermond S.A. (Grompone, 2011)

En 1955 Dieste y su asociado Eugenio Montañez, comenzaron el desarrollo de las bóvedas de cerámica armada, refinando esta tecnología hasta convertirla en una nueva manera de construir. (Grompone, 2011)

En 1971 comenzaron algunos cambios. Dieste se involucró brevemente en la política y Montañez se instaló en Brasil e inició grandes negocios. Dos años más tarde se instauró la dictadura en Uruguay y concluyó el ciclo universitario de Dieste. En esta época oscura para el país, Dieste desempeñaba la función de consultor en la Represa de Salto Grande, como profesor visitante en las universidades y continuó creando obras nuevas. (Grompone, 2011)

2.2. Eladio Dieste: Antecedentes

Eladio Dieste realizó una serie de obras entre 1945 y 1975 que ponían en valor los materiales tradicionales y simples como es el ladrillo o el mampuesto otorgándole la ductilidad y capacidad mecánica del hormigón armado a través de una técnica mixta llamada "cerámica armada". (Cabeza y Almodóvar, 2000)

Se trata de recompensar la poca resistencia a tracción de los materiales pétreos. Sin embargo, las mayores aplicaciones se dieron porque los materiales metálicos sufrieron un proceso evolutivo que condujo a la producción industrial del hierro, y sobre todo del acero. (Cabeza y Almodóvar, 2000)



Fig. 4. | Campamento de estudiantes de ingeniería. Fuente: *Consejería de Arquitectura y Vivienda*



Fig. 5. | Construcción de la Iglesia de Saint Jean de Montmartre. Fuente: *Universidad de Sevilla*

Se procede a realizar una breve valoración histórica de las situaciones que a partir del uso industrial del acero generaron las obras de Eladio Dieste y este tipo de arquitectura, por lo que se trata de una tradición constructiva del siglo XX o anterior. Esta tradición tiene que ver con la nostalgia mediterránea y el uso de materiales discretos, que se podrían calificar de humildes y fabricados de manera artesanal. (Cabeza y Almodóvar, 2000)

- Ciment armé en Francia: Paul Cottancin

En 1890, Paul Cottancin -ingeniero francés-, patentó un sistema al que llamó ciment armé. Este sistema consistía en reforzar los elementos básicos de ladrillo con alambre y cemento en las zonas de máxima tensión mientras que las zonas comprimidas se ejecutaban con mampuesto. El ciment armé empezó a interesar a arquitectos como Anatole de Baudot quien lo empleó en la iglesia de Saint Jean de Montmartre. (Cabeza y Almodóvar, 2000)

- La tradición de bóveda tabicada en España: Guastavino y Gaudí

La tradición española de construir con bóvedas tabicadas no cesó con el paso del tiempo. En Cataluña hubo considerables mejoras en la segunda parte del siglo XIX en cuanto a su utilización para el uso industrial moderno. (Esteban, 2021)

En este contexto aparece Rafael Guastavino, un arquitecto de origen valenciano que estudió en Barcelona. Realizó ensayos de un par de sistemas de bóvedas tabicadas mostrando las posibilidades de la construcción cohesiva. Es una técnica basada en el uso de bóvedas catalanas o bóvedas extremeñas. Se trata de cubiertas curvas de una o varias capas de rasilla sin armadura donde la capa inferior se labra con yeso para obtener una rigidez casi inmediata prescindiendo de los encofrados. (Esteban, 2021)

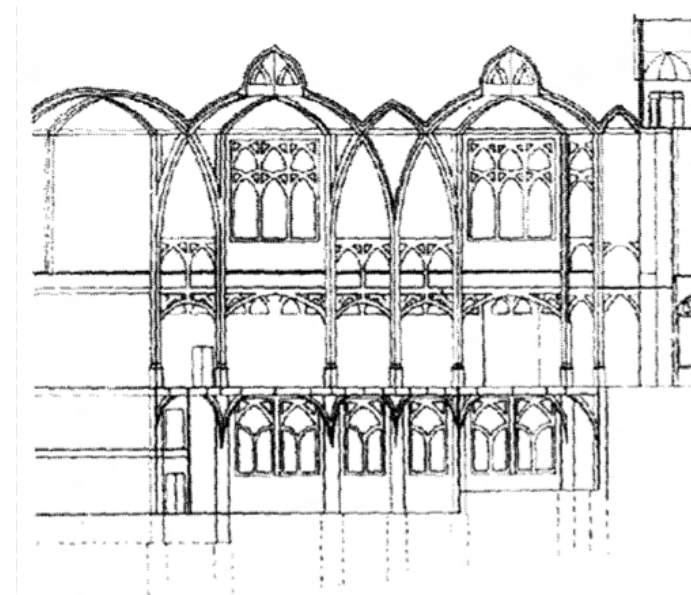


Fig. 6. | Sección de la Iglesia de Saint Jean de Montmartre. Fuente: Universidad de Sevilla

“Alcancé a hacer un par de bóvedas más, un poco mayores y luego me sumergí en aquel asunto de la empresa de pilotajes. Recién en 1953 recomencé a trabajar con bóvedas, pero ya con dimensiones muy importantes.” (Dieste, 1988)

Antonio Gaudí estudiaba en la Escuela de Arquitectura de Barcelona donde se analizaba las propuestas innovadoras de Guastavino, probablemente Gaudí se inspiraría en él para la construcción de sus bóvedas en las escuelas de trabajadores de la Sagrada Familia. Las paredes y cubierta tienen formas curvilíneas conformadas por una sucesión de conoides de ladrillo tabicado. (Esteban, 2021)

- Intereses modernos por la bóveda tabicada: Gaudí y Le Corbusier

La Sagrada Familia es un edificio que impresionó a Le Corbusier cuando fue invitado en 1928 por José Luis Sert a Barcelona. Dibujó en su cuaderno de viajes las bóvedas conoides, donde resolvía la forma y estructura de las escuelas que se encontraban en paralelo a una bóveda catalana clásica. (Esteban, 2021)

En la Maison Henfel, Le Corbusier consideró la bóveda como la principal razón generadora de la forma arquitectónica. Estas bóvedas se construyeron con hormigón armado y en el interior fueron revestidas de conglomerado de madera. A primera vista, parece que no tiene nada ver con la arquitectura de Gaudí pero en unos de los dibujos del proyecto, Le Corbusier dibujó dos soluciones paralelas de la misma configuración volumétrica: una compuesta por módulos individuales cubiertos con bóvedas cilíndricas, y otra en la que las paredes y cubiertas son curvas muy parecidas a las que vio en las escuelas de la Sagrada Familia. (Esteban, 2021)



Fig. 7. | Escuela de trabajadores de la Sagrada Familia. Fuente:



Fig. 8. | Exterior de la Maison Henfel. Fuente: Urbipedia

- Intereses modernos por la bóveda tabicada: Le Corbusier y Sert

José Luis Sert, un joven arquitecto catalán, conoció a Le Corbusier en su visita a Barcelona en 1928. Meses después comenzó a trabajar con él en su despacho en París, incluso participaba en planes urbanísticos como el Macià de Barcelona o el de Bogotá. (Esteban, 2021)

Le Corbusier y Sert mantuvieron una estrecha relación ya que tuvieron la oportunidad de reflexionar juntos sobre el sistema de bóveda tabicada. Durante el CIAM de Hoddesdon, Sert le habló a Le Corbusier de Domènech Escorsa, un emigrante catalán en Francia que estaba especializado en el tema de bóvedas tabicadas. Desde entonces, Domènech Escorsa se convirtió en una referencia muy importante para Le Corbusier. (Esteban, 2021)

- Antonio Bonet

Trabajó en el estudio de Sert y Torres Clavé y participó en el proyecto de las casas en El Garraf donde estos arquitectos cubrieron el salón de una de las viviendas con una bóveda catalana. También trabajó con Le Corbusier en la Maison de week-end Jaoul. Bonet proyectó una cubierta ondulada formada por una secuencia de bóvedas troncocónicas aunque finalmente el proyecto fue resuelto mediante una enorme cubierta a dos aguas. (Esteban, 2021)

- Eladio Dieste

Dieste armaba sus bóvedas con armado en retícula y pretendía según las líneas isostáticas y posteriormente con armado superior e inferior diagonales. En el sistema de Dieste, el mampuesto formado por piezas únicas tiene un espesor de 15 a 20 cm espesor, se colocaban a manera de bovedillas y se incorporaba armadura entre las juntas de las piezas. La colocación de armadura además de dificultar la ejecución y aumentar la mano de obra, también precisaba de un encofrado deslizante diseñado por el propio Dieste. (Cabeza y Almodóvar, 2000)



Fig. 9. I Sert, Gropius y Le Corbusier, de izquierda a derecha, hacia 1949. Fuente: El País

“La buena arquitectura no se ha hecho nunca por fórmula ni siguiendo al pie de la letra una doctrina: sería demasiado sencillo [...] ¿Cuál ha de ser el camino en el momento actual? [...] Podemos, para obtener esto, aprovechar todos los medios que tenemos a mano, desde los más tradicionales a los más modernos; desde la piedra al ladrillo, el hormigón armado, el acero y el cristal, siempre que estén controlados por un espíritu de orden, claridad y respeto a las construcciones milenarias, osatura espiritual de todas las grandes creaciones arquitectónicas.” (Sert, 1934)

“Plásticamente intentamos dar el máximo valor escultórico a las formas arquitectónicas [...] Si te digo que de todo esto hemos hablado largamente con Le Corbusier (En una larga conversación tenida en su casa particular, donde le enseñamos cosas!) y que, a pesar de estar en contra de él en ciertos momentos, le gustó muchísimo [...] Y si te digo que nos medio pasó un encargo suyo, “para que aplicásemos concretamente todas nuestras ideas”, te darás cuenta de que hacemos una cosa seria.” (Bonet, 1938)

2.3. Eladio Dieste: Obras

- a. Bóvedas de simple curvatura sobre pilares.

Casa Eladio Dieste -1961-

Mar Antártico, Montevideo, Uruguay.

Bóvedas autoportantes. Parcela 12 x 50m.

Se trata de una vivienda unifamiliar para los padres, once niños y el servicio. El material principal de la vivienda es el ladrillo tanto para paredes, escaleras y cubiertas. Dieste escogió este material por sus cualidades higroscópicas y su baja conductividad. La cubierta contaba con una parte plana y una parte curva. La parte curva se realizó con bóvedas autoportantes hechas con moldes de pequeñas dimensiones mientras que la parte plana se utilizó vigas horizontales que durante la ejecución de la obra actúan resistiendo los empujes de la bóveda, o la diferencia de empujes en las 2 bóvedas de diferente tamaño de la zona de estar y comedor. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)

Terminal Municipal de Ómnibus -1973-

Ubicación: Dámaso Antonio Larrañaga y Latorre, Salto, Uruguay.

7 bóvedas autoportantes: luz libre a cada lado del pilar 13,50m, transversal de cada bóveda 5,75m; altura pilares 4,00m; flecha 1,94m.

Área cubierta: 1120 m².

El edificio está cubierto con 7 bóvedas autoportantes, con directriz catenaria, precomprimidas de 6m en dirección transversal. Las bóvedas se apoyan en una sola línea de pilares de HA, volando a cada lado del soporte 13,50m generando dos viseras que engloban un área total cubierta de 1080 m². El estacionamiento de los ómnibus se ubica a un lado de la terminal mientras que las oficinas y servicios se ubican en el otro lado. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)



Fig. 10. | Casa Eladio Dieste. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay



Fig. 11. | Terminal Municipal de Ómnibus. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

Fabrica Domingo Massaro -1976-

Ubicación: Juanicó, Canelones, Uruguay.

Bóvedas autoportantes: cuerda 12,70m; luz libre 35m; altura pilares 6m; flecha 4,23m.

Área cubierta: 10.000 m².

Como se ha introducido en el resumen y se procederá a dar una explicación más detallada en el capítulo 5, se trata de un edificio formado por dos cuerpos donde era muy importante la extrema economía que imponía el propietario; el resultado fue un cuerpo principal techado con 5 bóvedas autoportantes de ladrillo hueco armado y con un volado que apoya en seis líneas de cuatro pilares cada una, y un segundo cuerpo techado por 3 bóvedas autoportantes y con doble voladizo que apoyan en cuatro pilares centrales. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)

- b. Bóvedas de doble curvatura.
 - Bóvedas gausas.

Iglesia de Atlántida Cristo Obrero y Nuestra Señora de Lourdes -1958-

Ubicación: Estación Atlántica, Canelones, Uruguay.

Bóvedas gausas: luz media 16m; luz máxima 18,80m; flecha 0,07-1,47m.

Esta obra se caracteriza por el excelente manejo de la luz y el uso o colocación del ladrillo. La idea principal era generar una cáscara de doble curvatura apoyada en el terreno sobre una fundación de pilotes in situ. Las paredes son una sucesión de conoides de directriz recta en la parte inferior y ondulada en la parte superior, y tiene una altura de 7 m. En cuanto a la cubierta, se trata de una bóveda gausa construida con ladrillo en dos capas: la primera capa vista se hizo con un ladrillo de 3 cm de espesor (tejuelas) mientras que la segunda se hizo con ladrillo hueco (ticholos). Dieste explicó en una conferencia que en la bóveda hay dos zonas: una zona que trabaja como bóveda gausa apoyada contra la carrera de coronamiento y otra zona de menor curvatura que cuelga de la bóveda gausa. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)



Fig. 12. | Fábrica Domingo Massaro. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

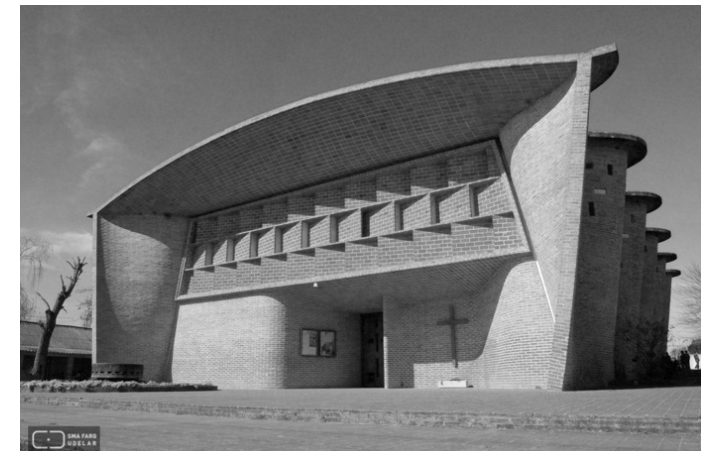


Fig. 13. | Iglesia de Atlántida Cristo Obrero y Nuestra Señora de Lourdes. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

Fábrica TEM S.A. -1960 -.

Ubicación: Carrasco, Montevideo, Uruguay.

Bóveda gausa: luz transversal libre 43m; altura de pilares 6m; flecha 2,21.

Área cubierta: 8260 m².

Se trata de una obra proyectada con bóvedas de doble curvatura, atensoradas, de cerámica armada de ladrillo hueco unida con mortero. Estas bóvedas se apoyan en una estructura de pilares de 7m de altura y vigas de borde de HA. En cuanto a la distancia entre pilares, los laterales cuentan con una separación entre sí de 6 m mientras que los centrales tienen una separación de 12 m ya que descargan el refuerzo de las bóvedas en dirección contraria. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)

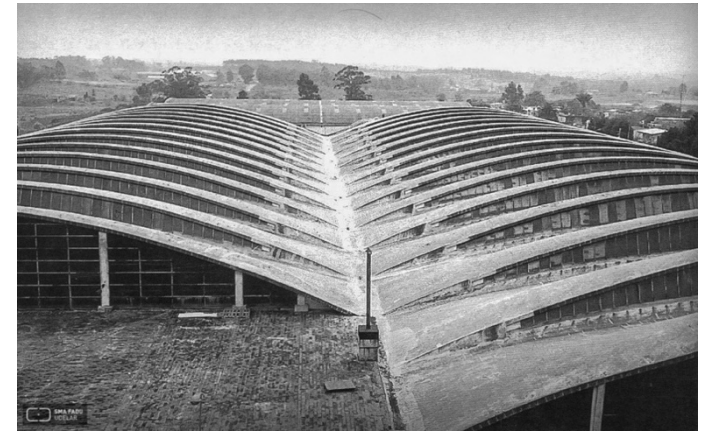


Fig. 14. | Fábrica TEM S.A. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

Gimnasio y Colegio Don Bosco -1983-.

Ubicación: Maldonado, Montevideo, Uruguay.

Bóvedas gausas: luz libre 24,40m; altura pilares 4,85m; flecha 4,70m.

Área cubierta: 954 m².

Para construir el gimnasio se tuvieron que demoler dos viviendas y reformar otras dos. Se creó como una especie de plaza retranqueándose el gimnasio respecto la alineación de edificios unos 3 m. La cubierta de este gimnasio se realizó con 5 bóvedas de doble curvatura salvando una luz libre de 24,40 m y no cuenta con tensores en el interior, mientras que en el exterior se han colocado por encima de la bóveda. Dichas bóvedas son cerámicas de ladrillo hueco armado. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)



Fig. 15. | Gimnasio y Colegio Don Bosco. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

- Otros.

Silo de Young -1978-

Ubicación: Young, Río Negro, Uruguay.

Bóveda de doble curvatura : luz transversal libre 28,50m; luz longitudinal libre 120m; altura de la bóveda 15m.

Área cubierta: 3420 m².

El Silo de Young es una obra que no llegó a terminarse de construir por motivos económicos. La obra cuenta con una cubierta de bóvedas de doble curvatura que se apoyan en una viga de borde de HA. Dichas bóvedas son cerámicas de ladrillo hueco armado y tenían previsto resistir un empuje de grano hasta 9,50 m de su altura. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)

c. Paredes de superficies regladas y láminas plegadas.

Iglesia de San Pedro -1967-

Ubicación: José Batlle y Ordóñez, Río Durazno, Uruguay.

Cubierta de losas plegadas: nave central con luz longitudinal libre 32m; luz transversal 10m; luz total transversal 26m.

Área cubierta: 800 m².

Este templo fue reconstruido sobre los restos de la antigua iglesia tras su incendio. Tanto la cubierta de la nave central como las de las naves laterales son un conjunto de losas plegadas de ladrillo armado, planas y precomprimidas. El conjunto genera una serie de 3 estructuras plegadas; las dos laterales formadas por losas del techo de las naves laterales y las paredes de la nave central, y la cubierta de la nave principal. Todas estas están vinculadas con pequeños pilares. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)



Fig. 16. | Silo de Young. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

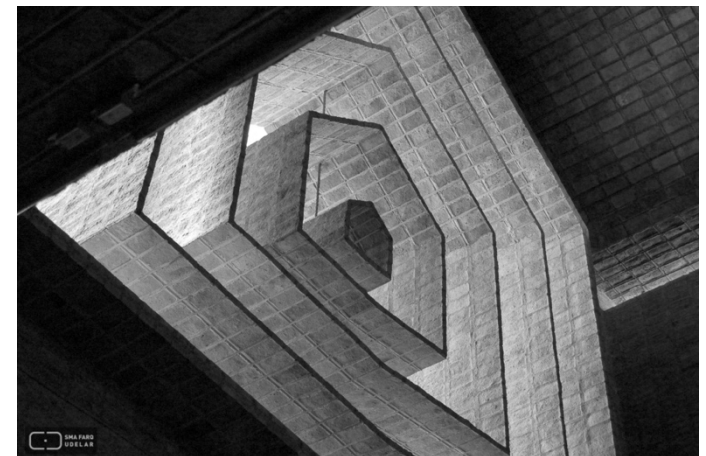


Fig. 17. | Iglesia de San Pedro. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

3. Cerámica armada.

3.1. El uso del ladrillo como cerámica armada.

La materia prima de Eladio Dieste es un material sencillo y noble como es el ladrillo. Te trata de un material con ilimitadas posibilidades y él lo utilizaba en sus estructuras. Hasta ese momento, el ladrillo era usado como material de revestimiento en fachadas o para realizar muros portantes, ya que en la era moderna de la arquitectura solo se usaba el hierro y el hormigón para realizar formas prismáticas como volumen. (Baldassari et al., n.d.)

En esta época de arquitectura moderna, Dieste investiga y descubre que al unir un ladrillo con otro ladrillo con mortero de arena y portland, colocando en las juntas una armadura redonda y realizando un acabado de capa delgada de mortero, el resultado es una cáscara de ladrillo. Se trata de unas cáscaras de 10 a 12 cm de espesor onduladas que permiten crear cubiertas de hasta 50 m de ancho y el largo puede ser incluso de mucha mayor dimensión. (Baldassari et al., n.d.)

El ladrillo es uno de los materiales más económicos que existen en el mercado y se pueden conseguir resistencias iguales, incluso superiores a las del hormigón armado. (Baldassari et al., n.d.)

A la hora de elegir el ladrillo, Dieste se fijaba en las siguientes características: su elevada resistencia mecánica, la liviandad de los mampuestos inalcanzables con hormigón o cemento, el ladrillo tiene un módulo de elasticidad menor que el hormigón por lo que permite una mayor adaptabilidad, tiene un buen envejecimiento ya que necesita un mínimo cuidado, buen aislamiento térmico y acústico, tiene una capacidad natural de regular la humedad del ambiente y es un material de bajo coste comparado con el hormigón. (Mas y Adell, 2005)

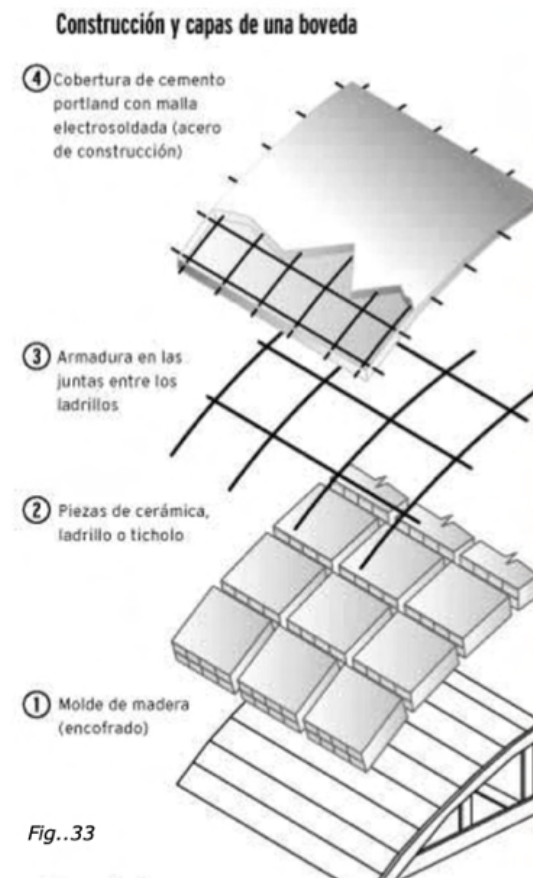


Fig. 18. | Construcción y capas de una bóveda. Fuente: Cerámica armada

3.2. Principios de la bóveda de cerámica armada. Clasificación por tipo estructural.

Las antiguas estructuras de cerámica armada eran una copia de las estructuras de hormigón pero con unos cambios necesarios que posibilitan la sustitución. Las primeras formas venían recogidas de la teoría laminar clásica que se dividían en superficies de directriz circular, elíptica o cicloidal con tímpanos en sus extremos. Dieste prueba con un elemento laminar de directriz catenaria y sin tímpanos. (Baldassari et al., n.d.)

Las teorías clásicas necesitaban de grandes conocimientos matemáticos, sin embargo, las bóvedas de Dieste simplemente era aplicar conocimiento estructural, dejó de lado el uso de tímpanos y superficies regladas y comenzó a utilizar láminas de doble curvatura. (Baldassari et al., n.d.)

A la hora de aumentar las luces, el problema no son las tensiones debidas al peso propio de la estructura sino que está en las flexiones y el pandeo. Para resolver estos problemas basta con aumentar la rigidez de la cascara. Una solución podría ser disponer arcos de rigidez por abajo o por encima pero esto provoca discontinuidades en la sección, dificultan el molde y el proceso de desencofrado. "La mejor solución es ondular la bóveda longitudinalmente aumentando su rigidez sin aumentar su desarrollo y su peso, sin crear discontinuidades en la sección transversal." Esto no resuelve bien el problema ya que obliga que el apoyo de la bóveda en elementos resistentes sea de un ancho igual a la amplitud de la onda. Resolvemos este problema cambiando la amplitud de onda de la bóveda. (Baldassari et al., n.d.)

3.2.1. Bóvedas de simple curvatura.

Se trata de bóvedas donde la curvatura en un punto dado tiene el mismo signo en todas las direcciones, excepto en una de ellas. (Basset, 2013). Estas bóvedas o estructuras laminares de simple curvatura se pueden clasificar en cascara autoportantes cilíndricas de directriz catenaria sin tímpanos (bóvedas arco de directriz catenaria) y en láminas circulares. (Marín y Barluenga, 2014)

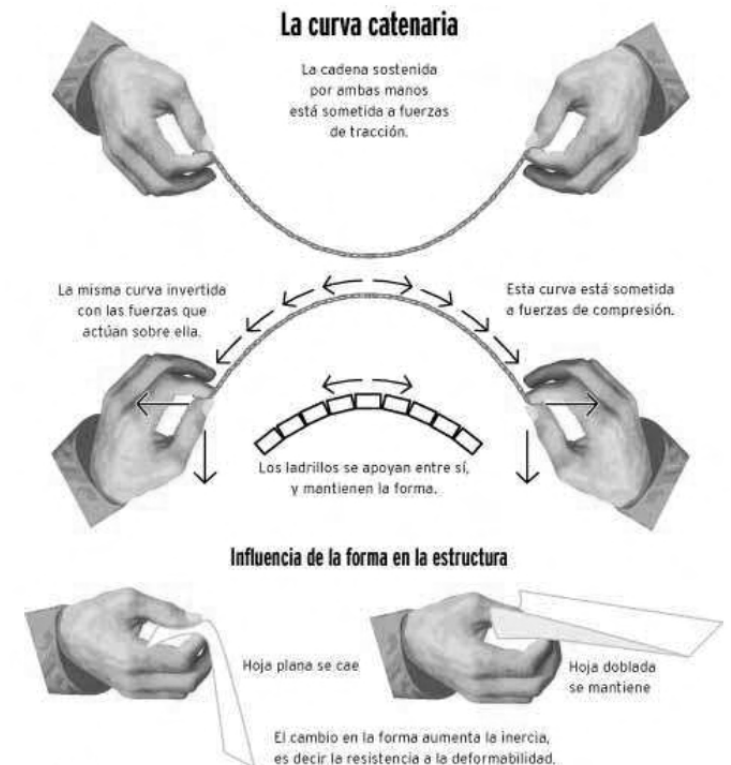


Fig. 19. I Funcionamiento de la curva catenaria. Fuente: Cerámica armada

"No suele saberse que el ladrillo puede tener resistencias superiores a los mejores hormigones y que no pueden hacerse con hormigón o mortero piezas de liviandad equivalente a las que pueden conseguirse fácilmente con la tierra cocida, por lo que estas últimas permiten construir estructuras de una ligereza imposible de lograr con el hormigón armado." (Dieste, n.d.)

"Hemos desencofrado bóvedas de 50 metros de luz a las 14 horas de haber sido terminadas y, diseñándolas bien, resisten, aún en el momento del desencofrado, flexiones equivalentes a las que produciría un viento transversal de 200 km/h." (Dieste, n.d.)

Para cubrir luces transversales pequeñas o medianas utilizaba bóvedas autoportantes, por ejemplo, los 6 metros de luz libre en la casa Berlingieri. Estas bóvedas arco de directriz catenaria descargaban en elementos resistentes (vigas, pilares, tensores o muros). A medida que transcurría el tiempo, Dieste consigue calar las láminas en toda su superficie, con el objetivo de convertir la cáscara en un entramado cerámico. (Marín y Barluenga, 2014)

Sin lugar a dudas, el mayor avance se produjo al introducir los cables de postensado, esto le permitía realizar voladizos, por ejemplo, en la Terminal de Ómnibus donde la lámina de 28 metros de longitud y 6 metros de luz transversal es sujeta por los pilares centrales. (Marín y Barluenga, 2014)

3.2.2. Bóvedas de doble curvatura o gausas.

Para solucionar las cubiertas de grandes luces, Dieste se tuvo que enfrentar a las siguientes soluciones: la primera fue peraltar mucho la bóveda, es una solución poco elegante y anti-económica, y la segunda fue incrementar el espesor de la bóveda para aumentar su inercia, esto conlleva un incremento del peso, encarecimiento de la propia cascara y su cimbra. Ninguna de estas dos soluciones era válida, por lo que sólo quedaba utilizar la doble curvatura, esto aumenta mucho la rigidez con un pequeño aumento de su peso. (Marín y Barluenga, 2014)

Dieste fue el inventor de las bóvedas gausas. Creó una forma que sigue la directriz del peso propio. Surgen como alternativa a la bóveda de simple curvatura para crear bóvedas de grandes luces. (Mas y Adell, 2005)

La geometría se obtiene desplazando una catenaria de cuerda fija y flecha variable que está contenida en un plano vertical móvil, manteniéndose en paralelo a otro plano vertical fijo. Los arranques de estas catenarias recorren dos rectas paralelas entre sí contenidas en un mismo plano horizontal. Un ejemplo de estas bóvedas es la Iglesia de Cristo Obrero donde la bóveda tiene una luz máxima de 18,80 metros y la flecha varía de 7 cm a 147 cm. (Marín y Barluenga, 2014)

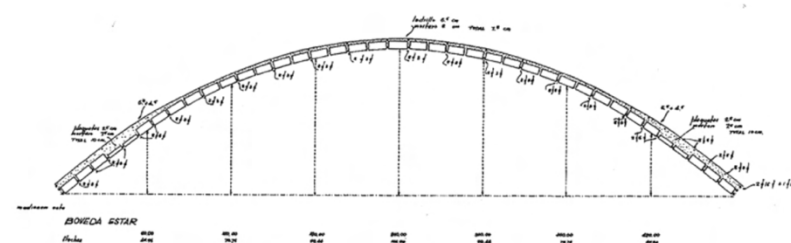


Fig. 20. | Bóveda autoportante. Fuente: Dirección General de Arquitectura y Vivienda

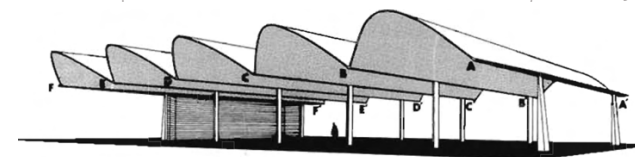


Fig. 21. | Perspectiva y sección de bóveda autoportante. Fuente: Consejería de Arquitectura y Vivienda

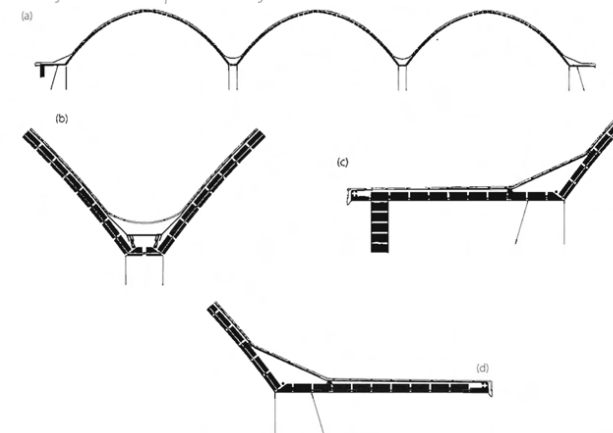


Fig. 22. | Alzado bóveda autoportante. Fuente: Consejería de Arquitectura y Vivienda

3.2.3. Paredes de superficies regladas y láminas plegadas.

El principal ejemplo es la Iglesia de San Pedro en Durazno. “Los muros laterales de la nave central se trataron como grandes vigas precomprimidas, también de 32 metros de luz, apoyadas en los pilares de refuerzo en la pared del atrio, y en un pórtico dispuesto rodeando la boca del presbiterio. La cubierta de la nave central es una lámina plegada y precomprimida de ladrillo de 8 cm de espesor y 32 metros de luz, que apoyaba en las paredes laterales a través de pilarcitos.” (Marín y Barluenga, 2014)

3.3. Materiales utilizados.

Piezas cerámicas

Se pueden clasificar en dos grupos las piezas utilizadas: piezas cerámicas macizas – ladrillos- realizas de forma manual, dimensiones 25 x 12 cm, un espesor entre 5,5 cm y 7 cm; y piezas cerámicas huecas – bovedillas o ticholos- con perforaciones, dimensiones 25 x 25 cm y un espesor de 8 a 15 cm. Utilizar un tipo de ladrillo u otro depende de la tipología estructural a emplear, en las bóvedas gausas se utiliza el ladrillo cerámico hueco porque facilita el aumento del espesor de la cascara y da seguridad frente a pandeo; y para bóvedas autoportantes se utiliza el ladrillo macizo ya que las luces transversales a cubrir son menores. Resistencia a rotura mayor a 220 kg/cm². (Marín, 2017)

Armaduras

Debemos distinguir entre armaduras activas y pasivas. Las armaduras activas se le introduce una fuerza controlada y se encuentran en la corona de las bóvedas autoportantes, sobre la estructura laminar cerámica antes de ejecutar la capa de alisado o atirantando las bóvedas por debajo o encima. Son barras de acero liso o con nervaduras, o alambres envainados. Las armaduras pasivas son las que se encuentran embebidas dentro de la masa de mortero en las juntas longitudinales y transversales, tienen una función estructural. Son barras corrugadas de acero o barras lisas. También hay mallas electrosoldadas -panel- de barras de acero liso. (Marín, 2017)

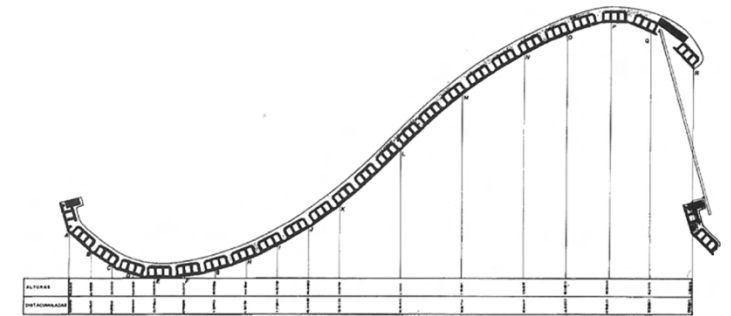


Fig. 23. I Bóveda gausa. Fuente: Dirección General de Arquitectura y Vivienda

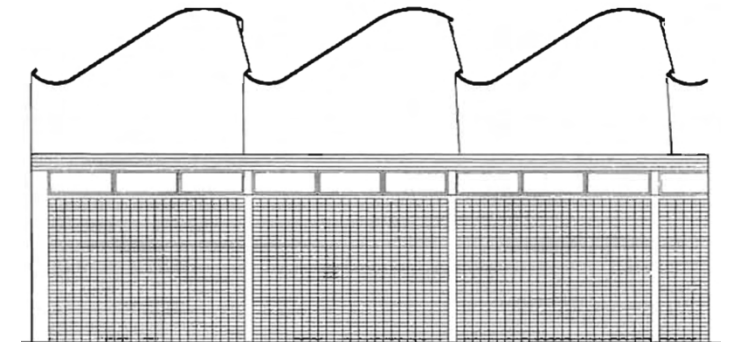


Fig. 24. I Alzado bóveda gausa. Fuente: Dirección General de Arquitectura y Vivienda

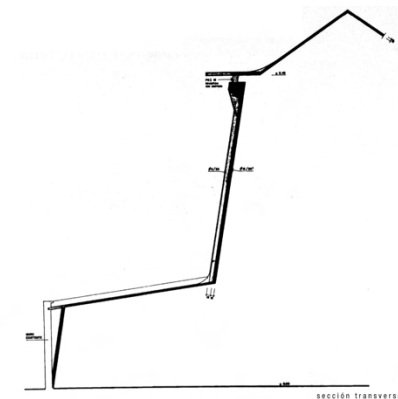


Fig. 25. I Sección transversal Iglesia de San Pedro. Fuente: Fadu

Conglomerantes y conglomerados: Mortero

Como conglomerante se utiliza el cemento portland que se mezcla con agua y arena para dar el resultado de mortero. El espesor de la capa de mortero es de 2 hasta 3 cm. El mortero se utiliza tanto en las juntas entre ladrillo como para la "capa de alisado"; se trata de una capa de mortero armada que se coloca sobre la lámina estructural cerámica y se ejecuta en dos fases: la primera capa que está en contacto con el elemento cerámico se le coloca en su superficie un mallazo, y una segunda capa que se realiza antes de que la primera capa fragüe. La resistencia de rotura es de 300 kg/cm². (Marín, 2017)

Materiales de acabado

- "Antisol. Una emulsión acuosa de parafina que se aplicaba sobre el mortero fresco de capa lisa para evitar la pérdida prematura de humedad(...)". (Marín, 2017)
- "Pintura de caucho acrílico de color blanco. Proporciona impermeabilidad y resistencia a la abrasión(...)." (Marín, 2017)
- "Pintura de cal. Para acabados finales en el extradós de las bóvedas(...)". (Marín, 2017)
- "Vidrio. La función que ejerce el vidrio, incoloro o de colores, es del cierre de un hueco proyectado en las estructuras laminares para controlar la luz. En las bóvedas autoportantes o gausas continuas son huecos de pequeños diámetros(...)". (Marín, 2017)

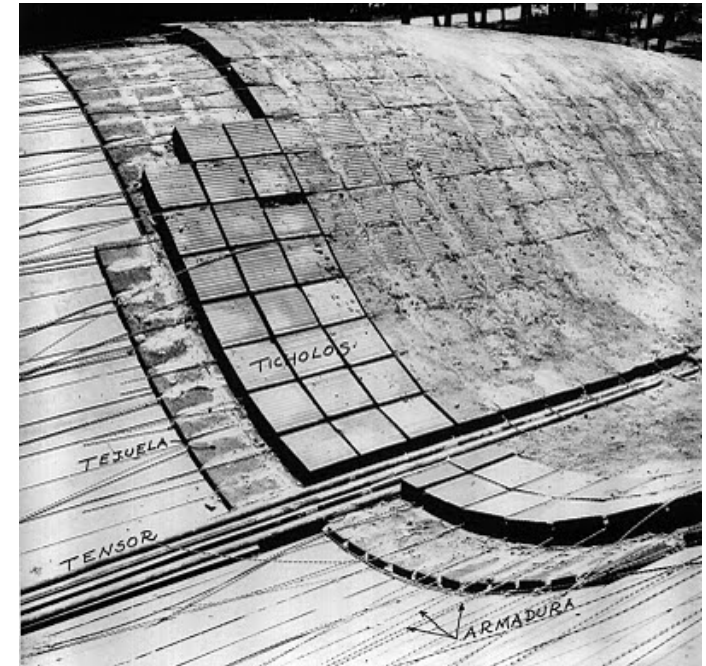


Fig. 26. | Ejecución de bóvedas de cerámica armada. Fuente: Cerámica armada

4. Antonio Bonet y Eladio Dieste.

4.1. La bóveda tabicada

“Una bóveda tabicada, curva o plana, es aquella que está compuesta por una o varias hojas conformadas por piezas prismáticas planas unidas entre sí por pegamentos apropiados al tipo de material que las forman”. Actualmente, la bóveda tabicada se entiende como una superficie curva, formada por ladrillos que están colocados de plano y unidos entre si mediante yeso en la primera capa, que se dobla o tabica con mortero de cemento en las siguientes capas. (Esteban, 2021)

El origen de esta construcción se remonta a las aplicaciones cerámicas de las bóvedas monolíticas romanas de hormigón, o las bóvedas cerámicas árabes. Aunque parece que las primeras bóvedas tabicadas aparecen como tal en la época medieval. En España, las primeras bóvedas tabicadas aparecieron en Valencia a partir del siglo XIV. (Esteban, 2021)

Las bóvedas tabicadas no necesitan cimbras ya que la fábrica se soporta a sí misma por la rapidez de fraguado del mortero. El hecho de que la primera capa se construya con yeso es porque no tiene que soportar la intemperie, y al ser la primera capa debe ofrecer una sujeción casi inmediata para soportar las siguientes capas. Las ventajas que presentan estas bóvedas tabicadas de ladrillo son: ligereza, resistencia, economía y sencillez constructiva. (Esteban, 2021)

4.2. Bonet y Dieste: Vivienda Berlingieri

Antonio Bonet Castellana nació en 1913 en Barcelona. En 1932, cuando era todavía estudiante entró en contacto con Sert y Torres Clavé. Se inscribió en el GATCPAC y comenzó su carrera junto a ellos en el proyecto de las Casas en El Garraf, se trataba de tres viviendas y una de ella tenía el salón cubierto con una bóveda catalana. (Esteban, 2021)

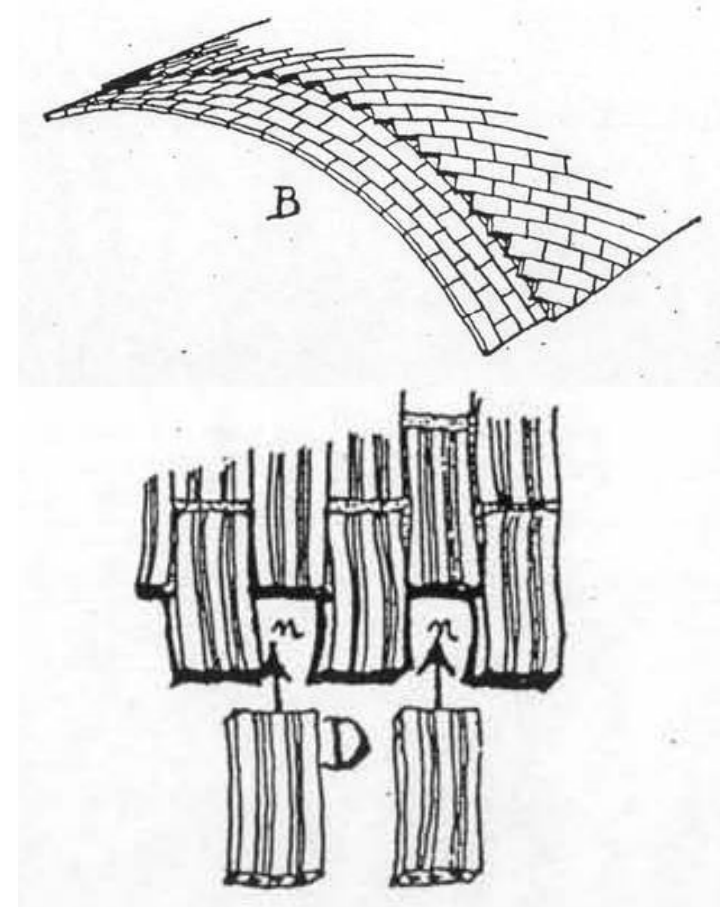


Fig. 27. | Bóveda tabicada. Fuente: *Bóveda tabicada*

En 1936 conoce a Le Corbusier para trabajar en el atelier de la Rue Nunguesser-et-Coli. En ese momento Le Corbusier había terminado de proyectar la Maison Henfek con unas cubiertas de bóvedas vaídas de hormigón armado. En 1937 los ayudantes de Le Corbusier empezaron a proyectar las cubiertas de un nuevo proyecto -la Maison de weekend Jaoul- ; Bonet presentó unos dibujos de una cubierta ondulada resuelta con una secuencia de bóvedas troncocónicas. (Esteban, 2021)

En 1938 Bonet viaja a Buenos Aires para comenzar su propia carrera. Los proyectos que realiza allí son proyectos resueltos con bóvedas de hormigón armado aunque no condicionaban la distribución interior, y su curvatura se utilizaba para dar un carácter íntimo. En 1945 se traslada a Uruguay tras la disolución del grupo Austral. (Esteban, 2021)

Tras su llegada a Uruguay, Bonet llama a Dieste como calculista para realizar las bóvedas de hormigón armado para la vivienda Berlingieri en Punta Ballena (1946-1947). Bonet ya había utilizado la bóveda como `elemento generador del espacio y la arquitectura´ pero no realizaba los cálculos estructurales. Buscaba a un calculista que le solucionase el problema de la vivienda de manera sencilla. En esos tiempos, Dieste era un joven ingeniero docente en la facultad de Montevideo que trabajaba con hormigón armado, amigo de Augusto Torres. Torres se lo presentó a Bonet ya que este le podría resolver los problemas estructurales. Dieste estudió el problema pero le propuso resolverlo con unas cascaras de ladrillo en vez de hormigón armado. (Marín, 2017).

A Bonet le pareció que unas bóvedas de ladrillos resultarían pesadas pero Dieste pensaba en unas cascaras, tenía que estudiarlo ya que desconocía el tema. Comenzó a analizar el tema, pensó en aliar la cerámica al modelo deslizante que usaba en las cáscaras de hormigón armado. Comenzó con una bóveda de 6m de luz, ya era algo mayor que la bóvedas tradicionales que tenían 4m. Las nuevas bóvedas estaban armadas con alambres y no tenían nada que ver con las bóvedas catalanas tradicionales de Bonet. La segunda bóveda ya alcanzaba los 10,50m. (Grompone, 2011)



Fig. 28. | Vivienda Berlingieri. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay



Fig. 29. | Vivienda Berlingieri. Fuente: Facultad de arquitectura de Uruguay

En esta vivienda el cuerpo de las habitaciones se concibe como una sucesión modular de bóvedas en paralelo. Estas habitaciones tienen una crujía de 4,5m de luz y se suceden rítmicamente apoyándose en los muros de carga que se doblan para formar las áreas de servicio. La habitación queda definida formalmente por el espacio debajo de la bóveda y se percibe como un espacio de transición. La función de la bóveda ya no es una función protectora o de cobijo, sino la de proyectar el espacio interior en el exterior. (Álvarez, 2014)

La construcción de la Casa Berlingieri (1947) con un nuevo sistema constructivo – la cerámica armada- fue el motivo de unión de Antonio Bonet y Eladio Dieste. Inspirada en las tradiciones cerámicas mediterráneas, pero basada en la realidad latinoamericana, la cerámica armada es quizás uno de los mejores ejemplos de alteridad constructiva, un deseo de entendimiento y diálogo entre dos mundos: Europa y Latinoamérica. En este encuentro entre Bonet y Dieste primó el equilibrio sobre la apropiación, ninguno de los dos impuso su ideología y ambos aprendieron. Tanto es así que, en parte, a partir de momentos de intercambio entre ambos lados del Atlántico, el trabajo posterior en ambos lados ha arrojado resultados muy importantes. (Esteban, 2021)

4.3. La Ricarda: Antonio Bonet

Eladio Dieste y Antonio Bonet siguieron sus trayectorias pero por separado. (Esteban, 2021) Al volver a España tras la Guerra Civil en 1949, entró en contacto con el matrimonio formado por Ricardo Gomis y Inés Bertrand. Este matrimonio le encargó una casa en el Prat de Llobregat, en un terreno lleno de pinos y cerca del mar. (Álvarez, 2014)

Bonet tuvo que regresar a Argentina y desde allí se mandaba carta con la familia Gomis, los propietarios le hacían continuas sugerencias. Hizo una primera propuesta pero no se construyó. (Álvarez, 2014) En 1953 con una segunda propuesta, la definitiva, había una repetición modular de una bóveda rebajada. (Esteban, 2021)

Bonet utiliza un sistema de modulación en el que alterna luces de 7,45m con los espacios de transición de 1,35m de nacho. Se trata de una modulación doble que se encaja en la de 8,80m que hay de eje a eje, y sirve para unificar la vivienda en planta y es la que rige todos los elementos del proyecto. (Arnaldos, 2014)



Fig. 30. | Vista aérea de La Ricarda. Fuente: *Tectónica*

Se puede observar en la planta la idea de módulo-bóveda que se formaliza en los cuerpos. La bóveda y su relación con el espacio sugieren una nueva interpretación. Los módulos diseñados por Bonet son objetos estructurales cuya función principal es la de cubrir los espacios. (Álvarez, 2014)

Los cerramientos se resuelven mediante grandes ventanales y muros de celosía. Son muros permeables en los que la luz hace las funciones de la argamasa. (Álvarez, 2014)

4.3.1. Las bóvedas

La bóvedas se formalizan con dos láminas: la lámina interior (sustentante) de hormigón armado de 10 cm de espesor aligerada separada de la segunda lámina a modo de solera a la catalana mediante una cámara de aire ventilada; esta segunda lámina se encuentra apoyada sobre tabiquillos. (Álvarez, 2014). "La bóveda estructural se aligeraba con ladrillos y con unos tirantes metálicos para absorber los esfuerzos horizontales" (Esteban, 2021).

Bonet emplea vigas de borde como apoyo a las bóvedas, donde los esfuerzos verticales se canalizan en 4 pilares metálicos de 13 x 13 cm, pintados de un color oscuro. Esta solución permite transmitir una sensación de ligereza. (Álvarez, 2014)

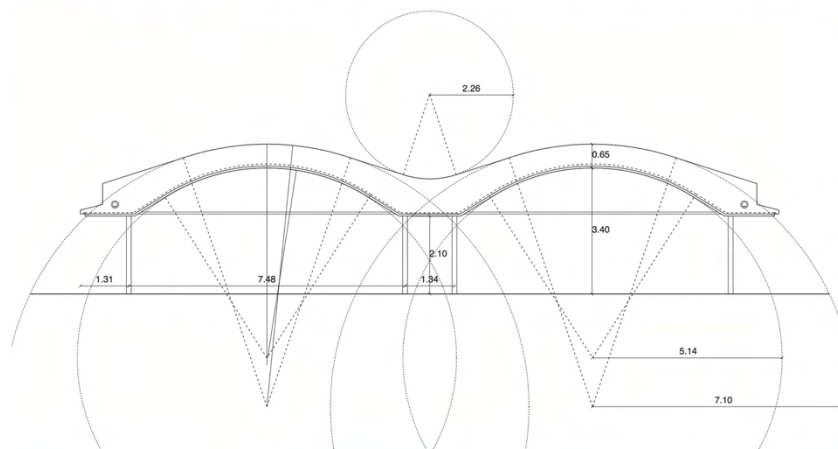


Fig. 34. | Dimensiones de las bóvedas . Fuente: *Tectónica*



Fig. 31. | Vista frontal de La Ricarda. Fuente: *Tectónica*



Fig. 32. | Vista de la cubierta de La Ricarda. Fuente: *Tectónica*



Fig. 33. | Vista interior de La Ricarda. Fuente: *Tectónica*

“En el intradós de la cubierta se muestran las piezas cerámicas o tochanas utilizadas para aligerar el peso de la bóveda estructural. Estas se colocan en filas a lo largo de la LMP, dejando un espacio entre ellas por donde discurren los nervios de hormigón armado. El tímpano de hormigón armado, apenas sin misión estructural, se une a la bóveda mediante un gran goterón, negativo moldeado en el hormigón al dejar un berenjeno de yeso previo al hormigonado.” (Álvarez et al., 2005)

“Cuando se produce la concatenación de varias bóvedas, la franja que queda entre ellas resuelve la transición de una a otra. Esta franja manifiesta el carácter aditivo del módulo al mantener el doble canalón.” (Álvarez et al., 2005)

4.3.2. Problemas en elementos estructurales, revestimientos y cerramiento

La fisuras provocadas por las dilataciones térmicas de las capas de cubierta son las que permitían las filtraciones de agua que llegaban a la zona de encuentro entre la bóveda y pilar metálico haciendo que este se oxide. (Álvarez et al., 2005)

En las estaciones de primavera y otoño, la humedad que había en el interior de la casa se filtraba al interior de la bóveda. “La radiación solar calentaba el aire de la cámara, que se volvía a enfriar bruscamente por la noche, provocando condensaciones en la cara fría de la bóveda exterior. Después, el agua caía sobre la bóveda inferior, produciendo manchas de humedad o filtraciones, que desencadenaban desprendimientos del revoque, pintura o escayola.” (Álvarez et al., 2005)

En las estaciones de invierno y verano, por la climatización mecánica interior, empiezan a aparecer en el intradós de la bóveda interior condensaciones, apareciendo como consecuencia de ello moho en el techo. (Álvarez et al., 2005)

Fig. 35. | Detalle constructivo. Fuente: Tectónica

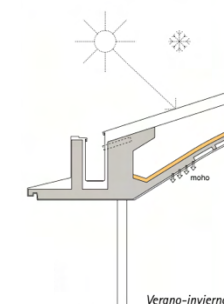
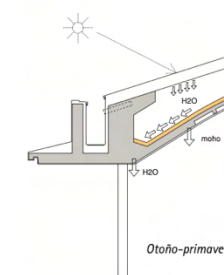
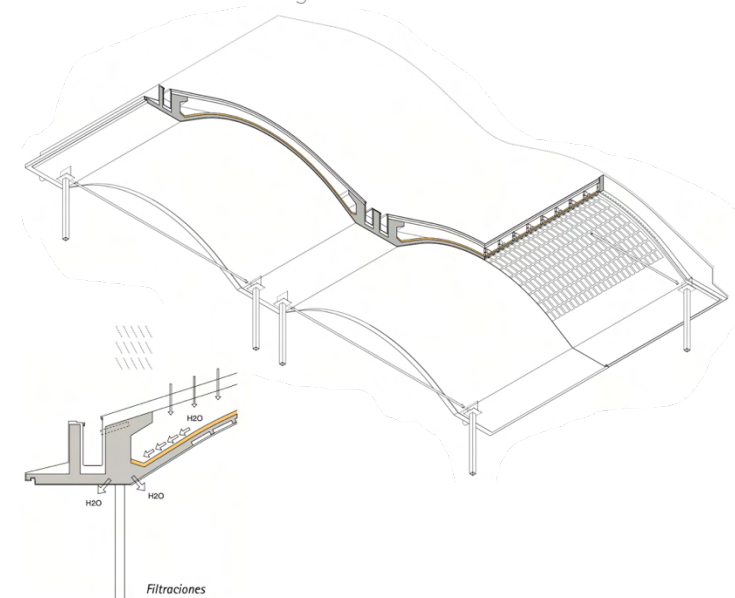


Fig. 36. | Problemas estructurales detectados. Fuente: Tectónica

5. Fábrica Domingo Massaro.

5.1. Descripción del proyecto

El proyecto se ubica en una zona rural con una elevada producción granjera en la localidad de Juanicó, Departamento de Canelones. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022) El Banco de la República estimó un congte de la estructura que resultó ser el doble de lo que realmente costó. (Jiménez y Pérez, 1996)

Como era habitual en la profesión de aquella época: se parte de un proyecto ya empezado en 1976 por el arquitecto Martín Boada, se trata de un proyecto insuficiente ya solo tenía las plantas. Encargó a Dieste la parte ingenieril; lo más importante del proyecto era la economía que imponía el propietario. (Jiménez y Pérez, 1996)

La Fábrica de Domingo Massaro se construye con bóvedas autoportantes. Es un procedimiento constructivo más tradicional que las bóvedas gausas o de doble curvatura. Emplea bóvedas gausas cuando quiere salvar luces transversales de más de 20 metros, eliminando todos los apoyos intermedios y el espacio interior queda diáfano y sin ningún obstáculo. Sin embargo, cuando los flancos laterales permiten la llegada de la luz natural al espacio cubierto y la presencia de pilares intermedios no causa molestias, se suelen utilizar bóvedas autoportantes como es el caso de la Fábrica Domingo Massaro ya que son más económicas y de fácil ejecución. Estas bóvedas no necesitan apoyos en los extremos de las cascaras y esto permite generar grandes voladizos que se pueden aprovechar de distintas maneras. (Martí, 2001). El edificio principal cubierto con bóvedas contiene por un lado la clasificación, empaquetado y fabricación de dulce, y por otro lado están las oficinas y la explanada de carga. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)

“Actualmente el edificio pertenece a la firma Hyro Agri S.A. que se dedica a la producción, embalaje y distribución de fertilizantes. El local principal fue reformado para adaptarlo al manejo de materiales a granel y se le adosó, en la fachada norte, un edificio de estructura metálica donde se mezcla y se embolsa el fertilizante.” (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)



Fig. 37. | Vista exterior. Fuente: Facultad de Arquitectura de Uruguay



Fig. 38. | Vista de bóvedas. Fuente: Facultad de Arquitectura de Uruguay

5.2. Descripción de la estructura

Se trata de una estructura formada una serie de bóvedas autoportantes de directriz catenaria precomprimida. Es una estructura sin vigas y sin tímpanos; es una lámina en el espacio con una esbeltez similar a la de las estructuras metálicas. Todas las técnicas utilizadas tuvieron que recrearse, desde técnicas de construcción generales hasta los sistemas de precompresión. (Jiménez y Pérez, 1996)

La cubierta de bóvedas autoportantes, de grandes dimensiones, genera un espacio sensible, muy esbelto, que se “dibuja en una sucesión ondulante de formas atenuadas o resaltadas, según la dirección de la luz.” (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)

Se trata de un proyecto formado por el edificio principal, el edificio secundario y el tanque de agua. El edificio principal cubierto con bóvedas está formado por dos partes: la primera (clasificación, empaquetado y fabricación de dulce) de 8.000 m² esta techada con dos cuerpos de cinco bóvedas autoportantes de ladrillo hueco armado llamado ticholo de 25 x 25 x 8 cm unido con mortero de arena y portland. En la superficie de las bóvedas, encima de la cerámica hay una capa de mortero de 3 cm con malla electrosoldada y se pinta de blanco para reflejar la radiación solar. En la unión de los dos cuerpos se encuentra un lucernario transversal de fibra de vidrio apoyado al filo de los voladizos. Los dos cuerpos de las 5 bóvedas se apoyan en seis líneas de cuatro pilares cada fila. La altura de los pilares es de 6 m y están separados transversalmente 12,70 m y longitudinalmente 35 m. El volado de las bóvedas es de 16,40m. La segunda (oficinas y explanada de carga) de 1200 m² esta techada con tres bóvedas autoportantes que se apoyan en cuatro pilares centrales de 6m de altura y tiene un doble volado de 15 m. En cuanto al edificio secundario para la fabricación de embalajes es de 400 m², se trata de un edificio de paredes de ladrillo armado y bóveda de cañón corrido de 16 m de luz libre. Y por último, el tanque de agua elevado tiene 25 m de altura y una capacidad de 30.000 litros. Se trata de una cuba troncocónica invertida de ladrillo armado. “El fondo de la cuba y apoyo del tubo paso de hombre para tener acceso a la losa superior, para inspección y limpieza, es una cúpula generada por anillos de ladrillos, sin armadura ni encofrado, desplazados en cada hilada medio ladrillo hacia dentro.” (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)



Fig. 39. | Vista lucernario. Fuente: Facultad de Arquitectura de Uruguay

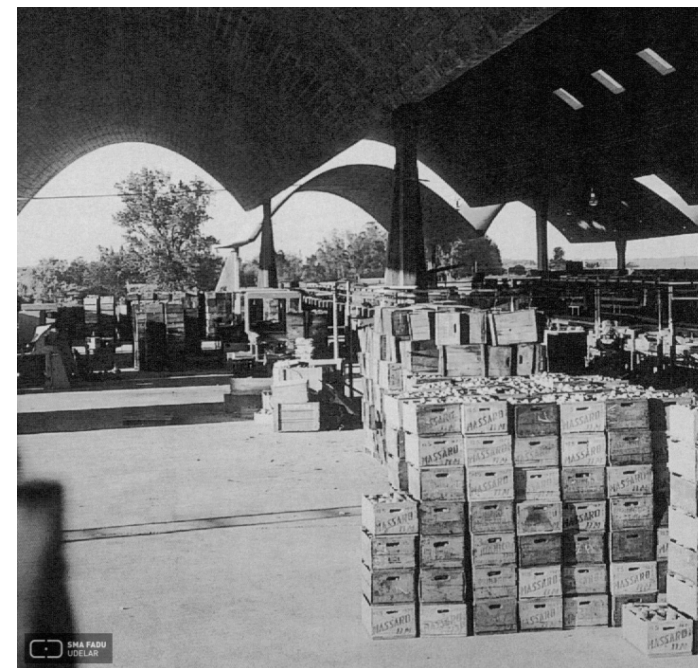


Fig. 40. | Vista interior. Fuente: Facultad de Arquitectura de Uruguay

5.3. Documentación gráfica

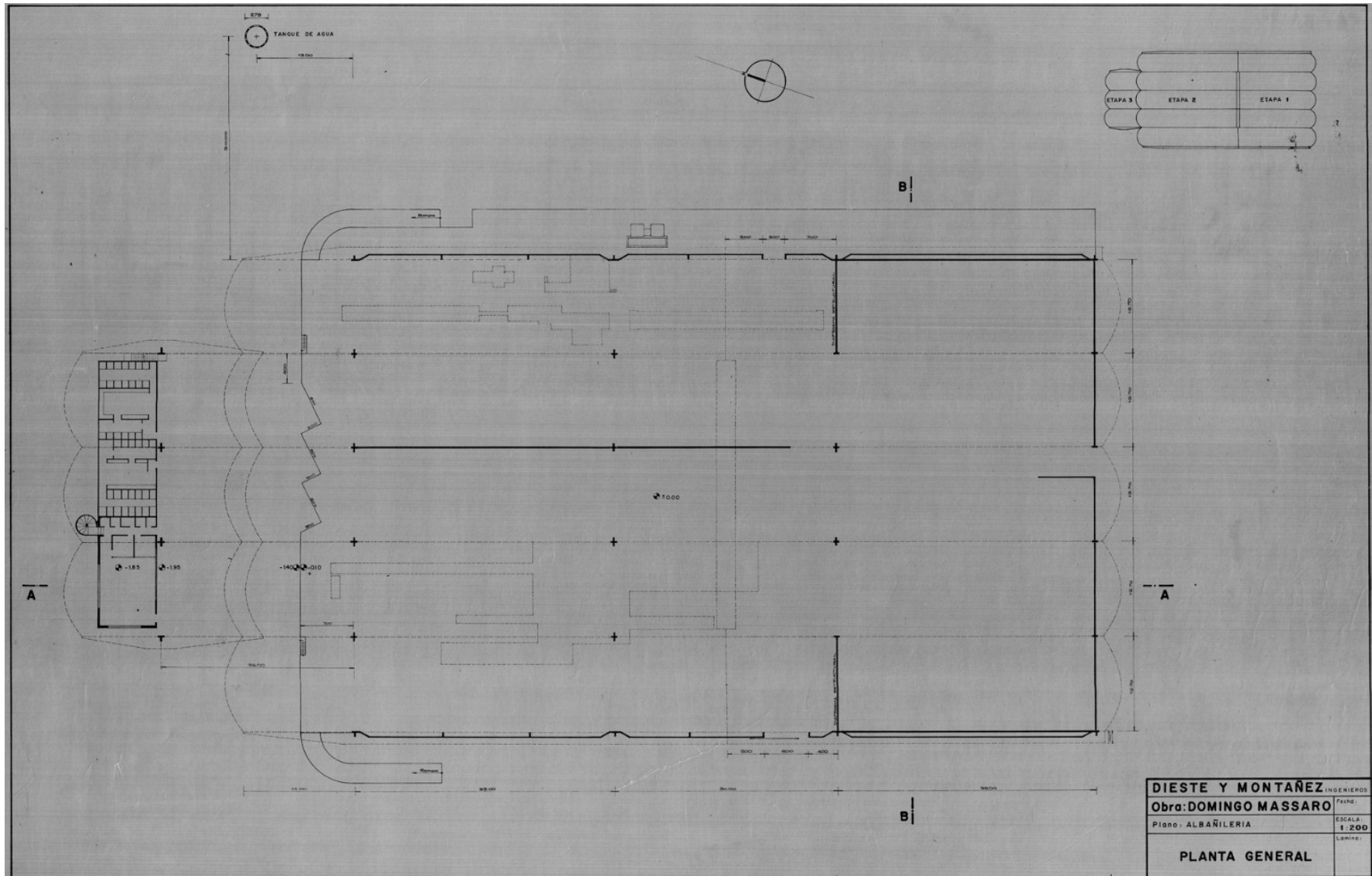


Fig. 41. I Planta general. Fuente: Centro de Documentación

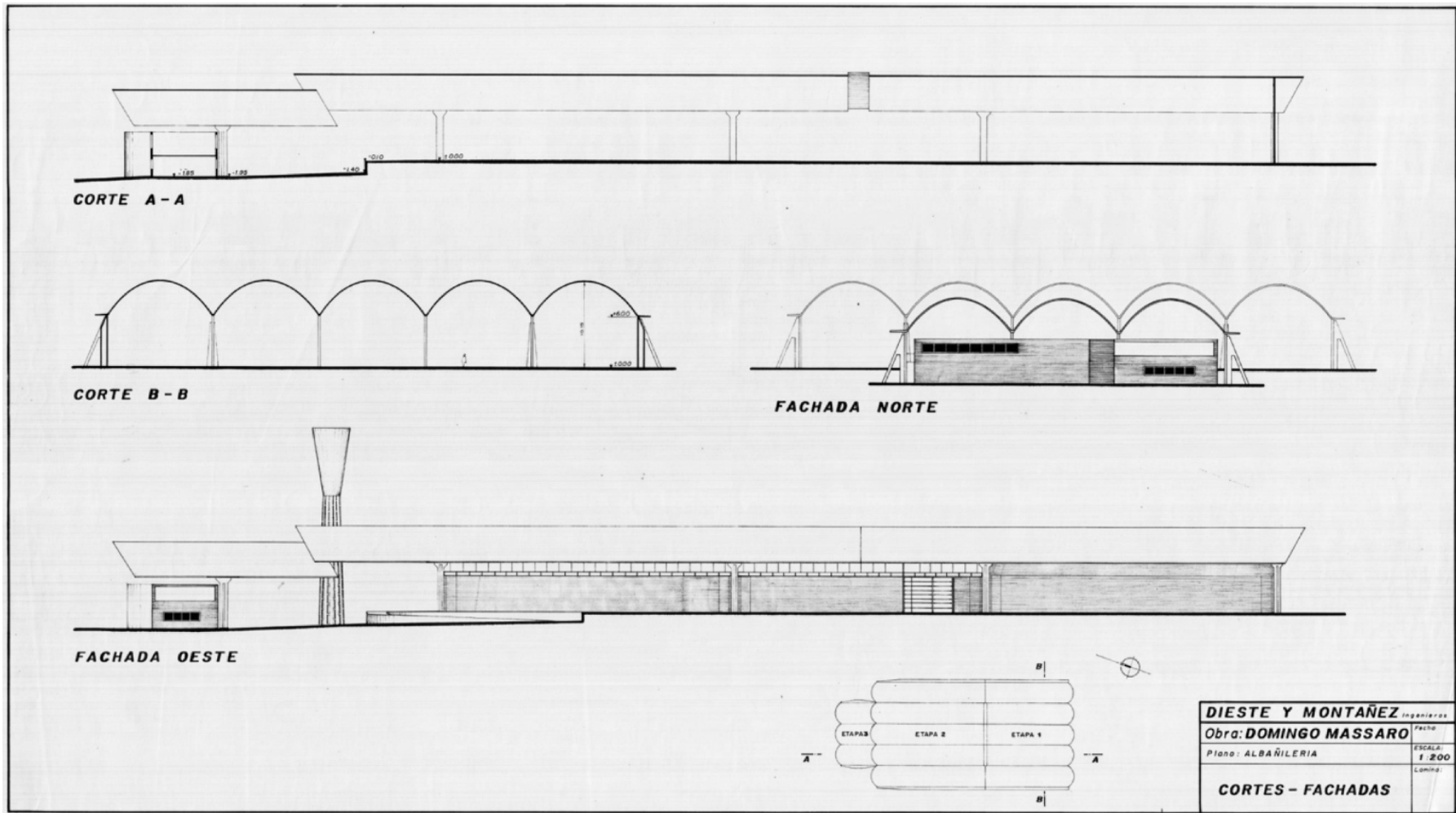


Fig. 42. | Cortes y fachadas. Fuente: Centro de Documentación

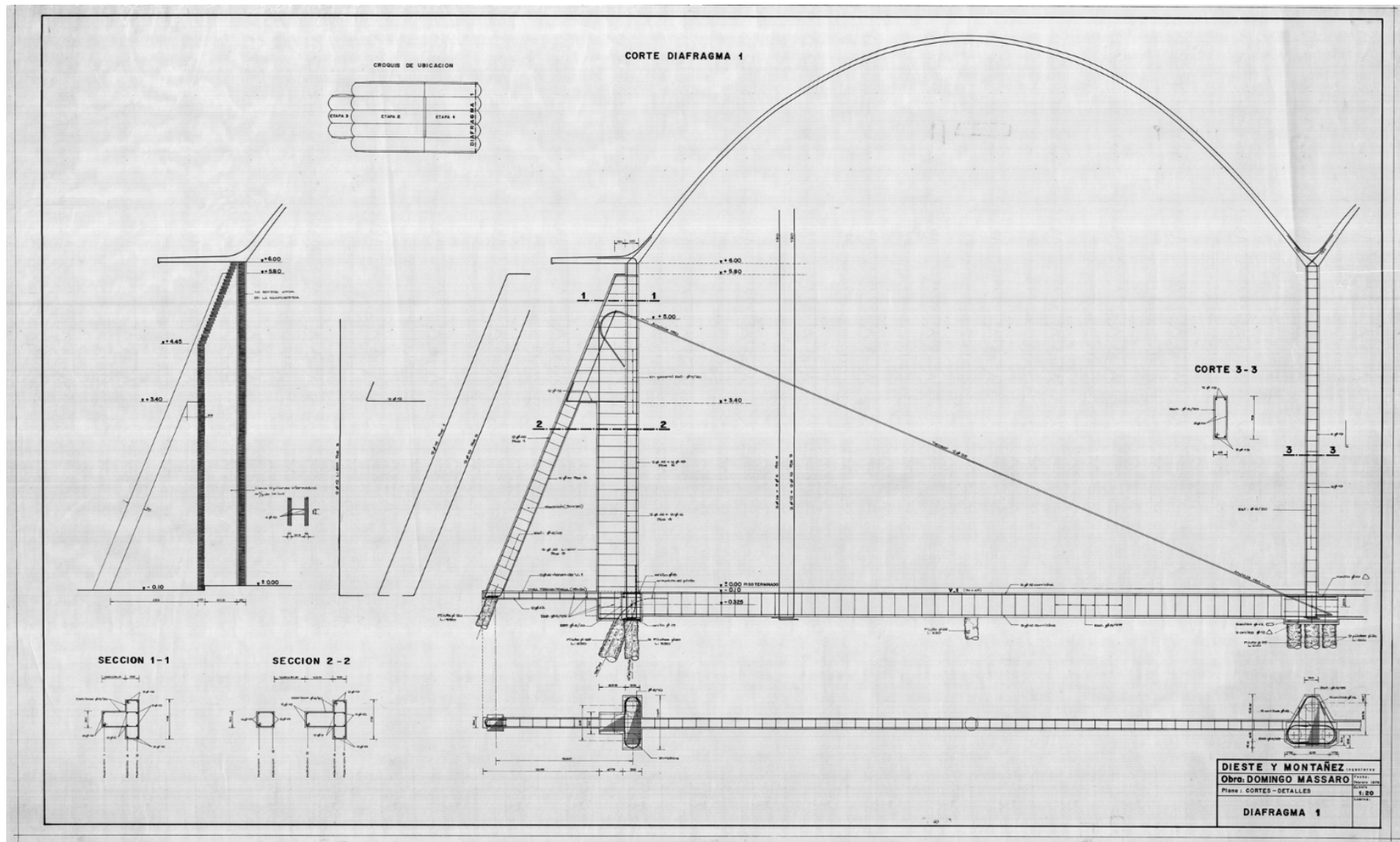


Fig. 43. | Diafragma 1. Fuente: *Centro de Documentación*

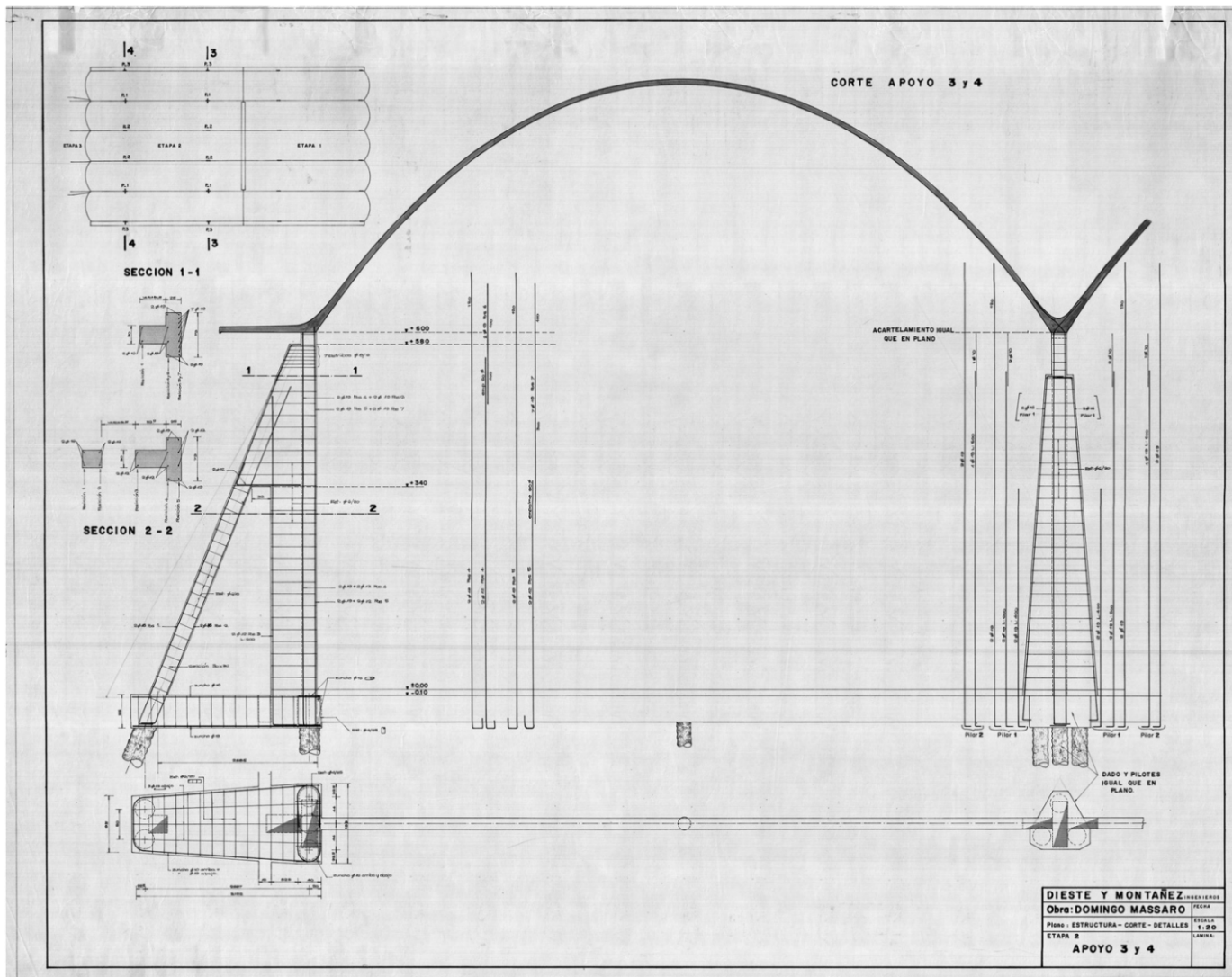


Fig. 44. | Corte apoyo 3 y 4. Fuente: *Centro de Documentación*

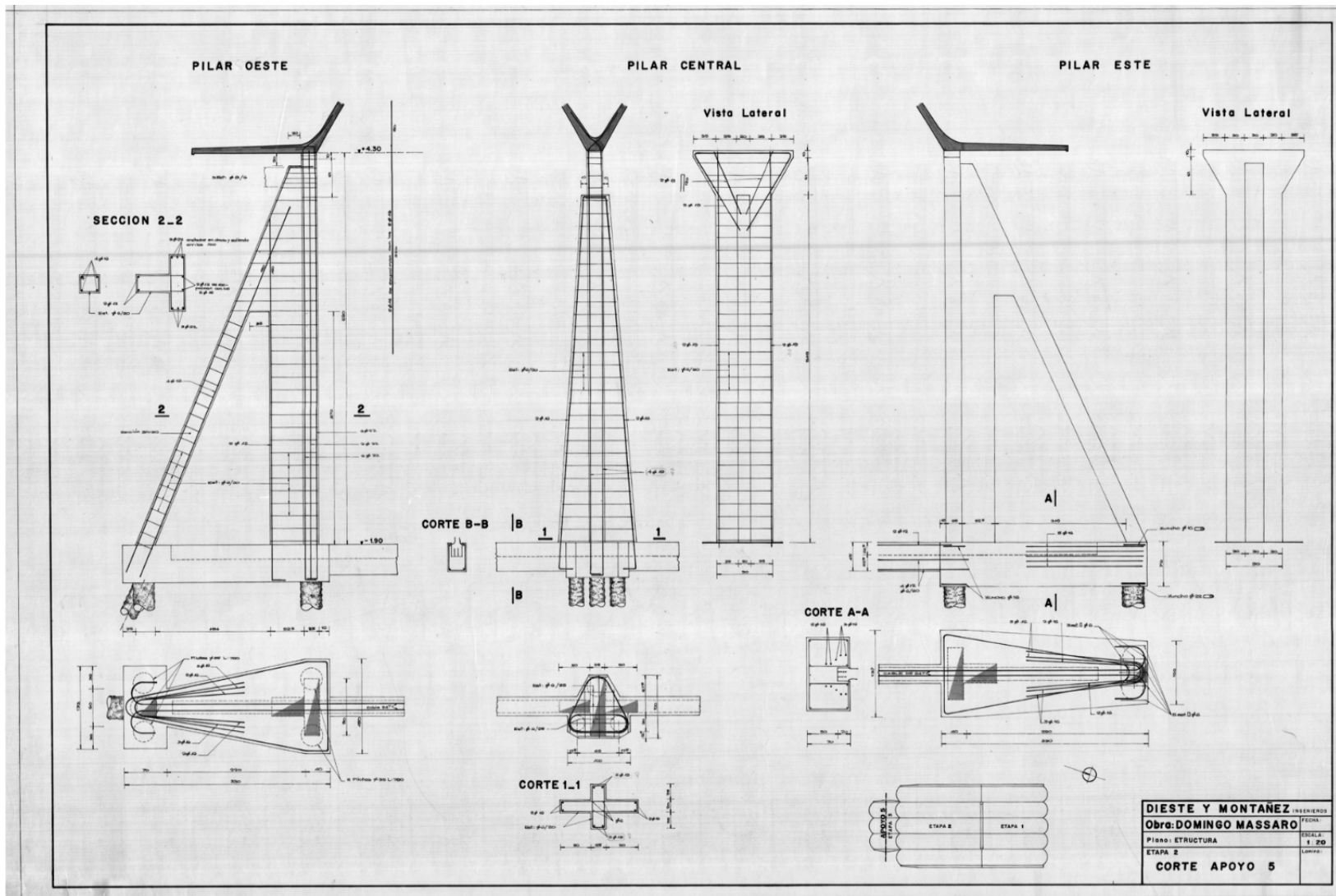


Fig. 45. I Corte apoyo 5. Fuente: Centro de Documentación

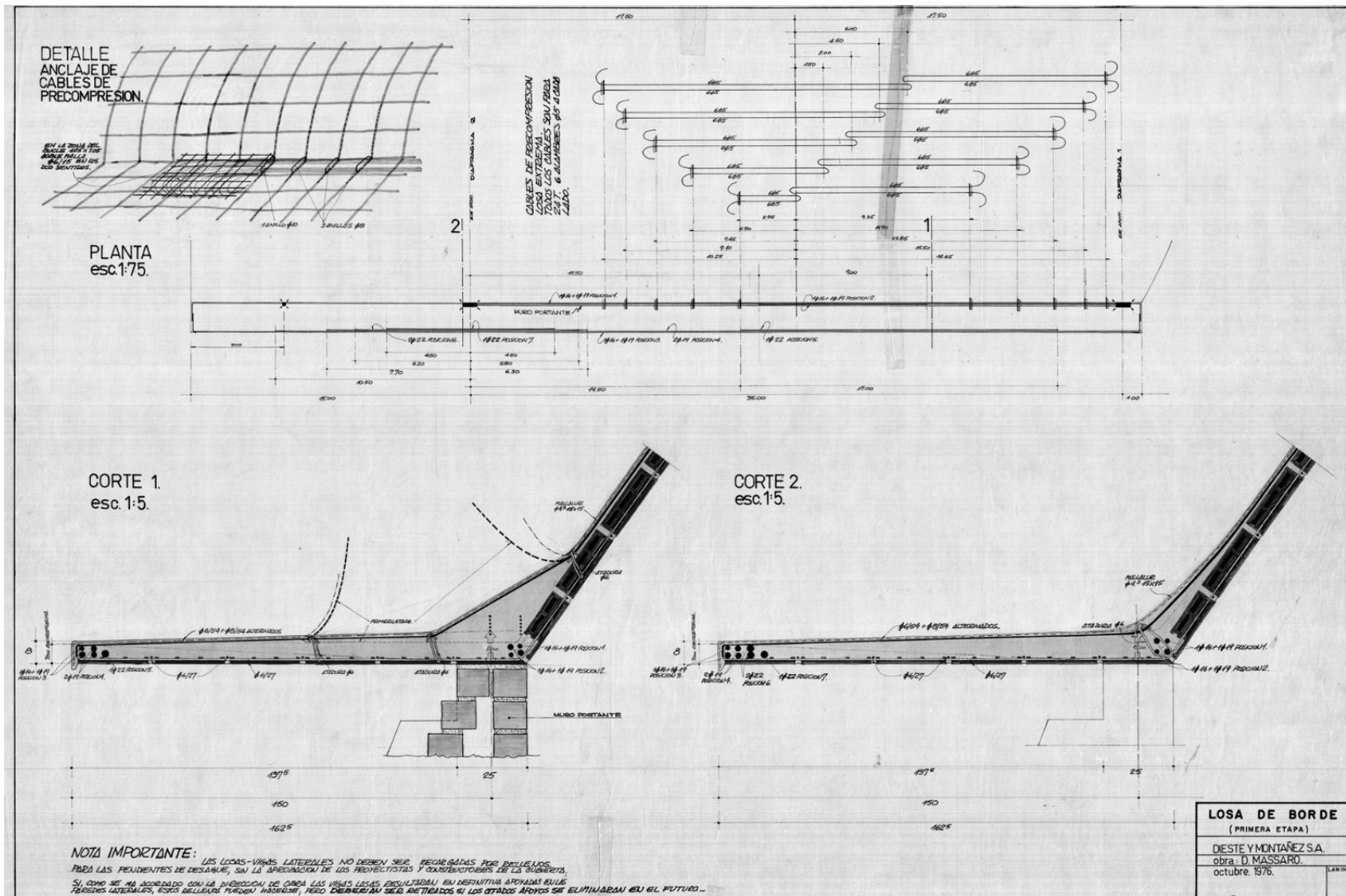


Fig. 46. I Losa de borde. Fuente: Centro de Documentación

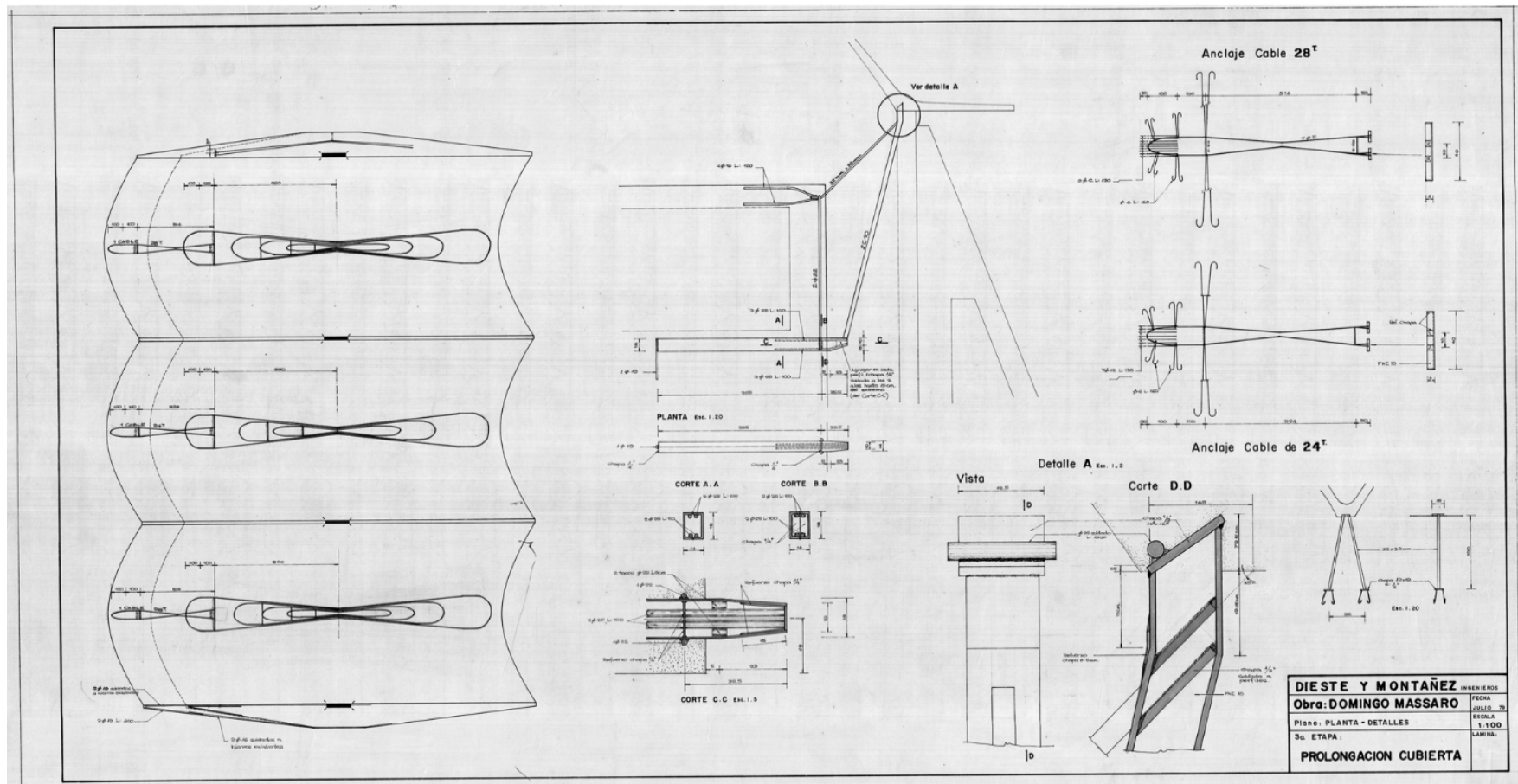


Fig. 47. | Detalle tercera etapa. Fuente: Centro de Documentación

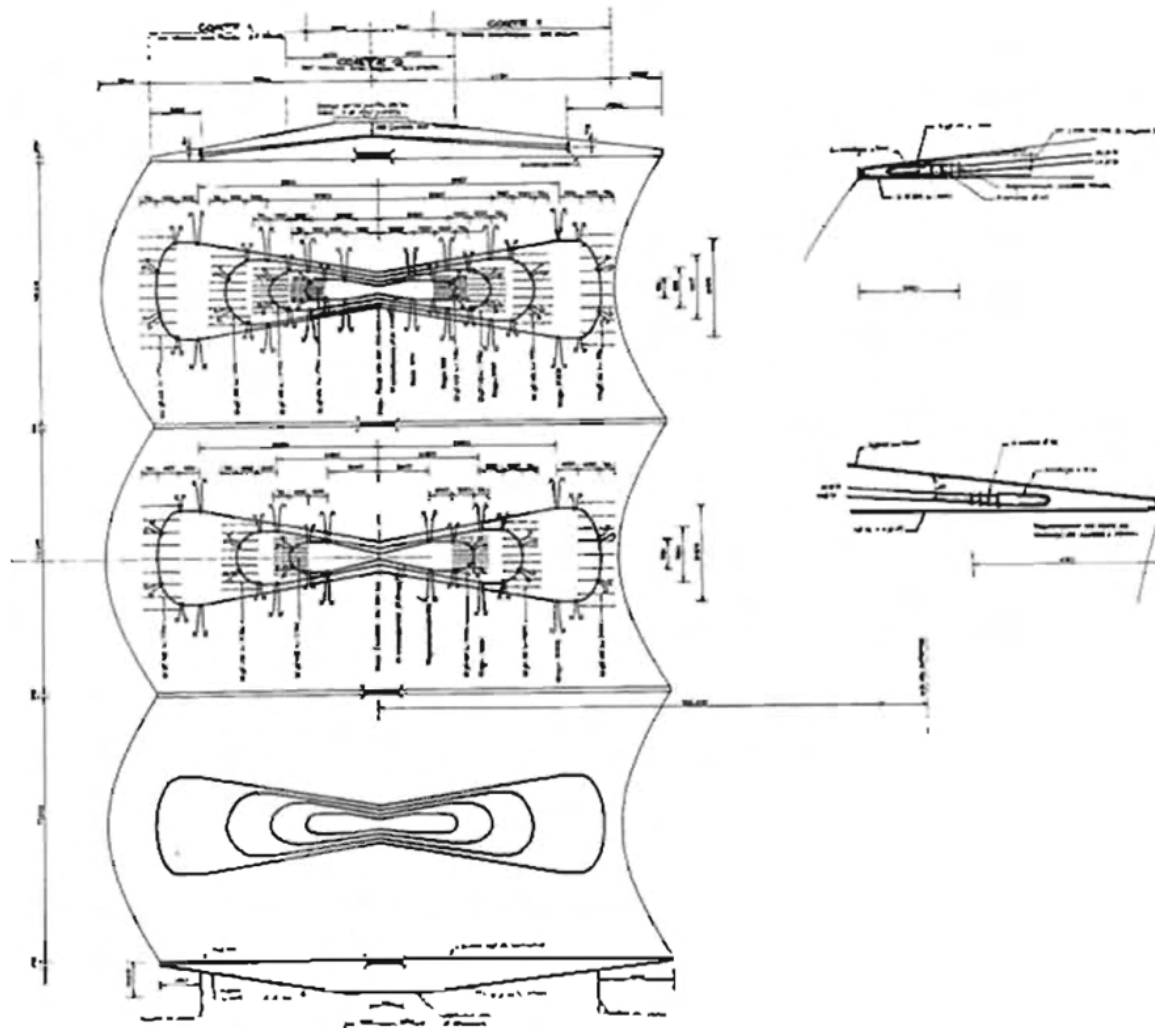


Fig. 48. I Detalle de pretensado de tercera etapa. Fuente: *Universidad de Sevilla*

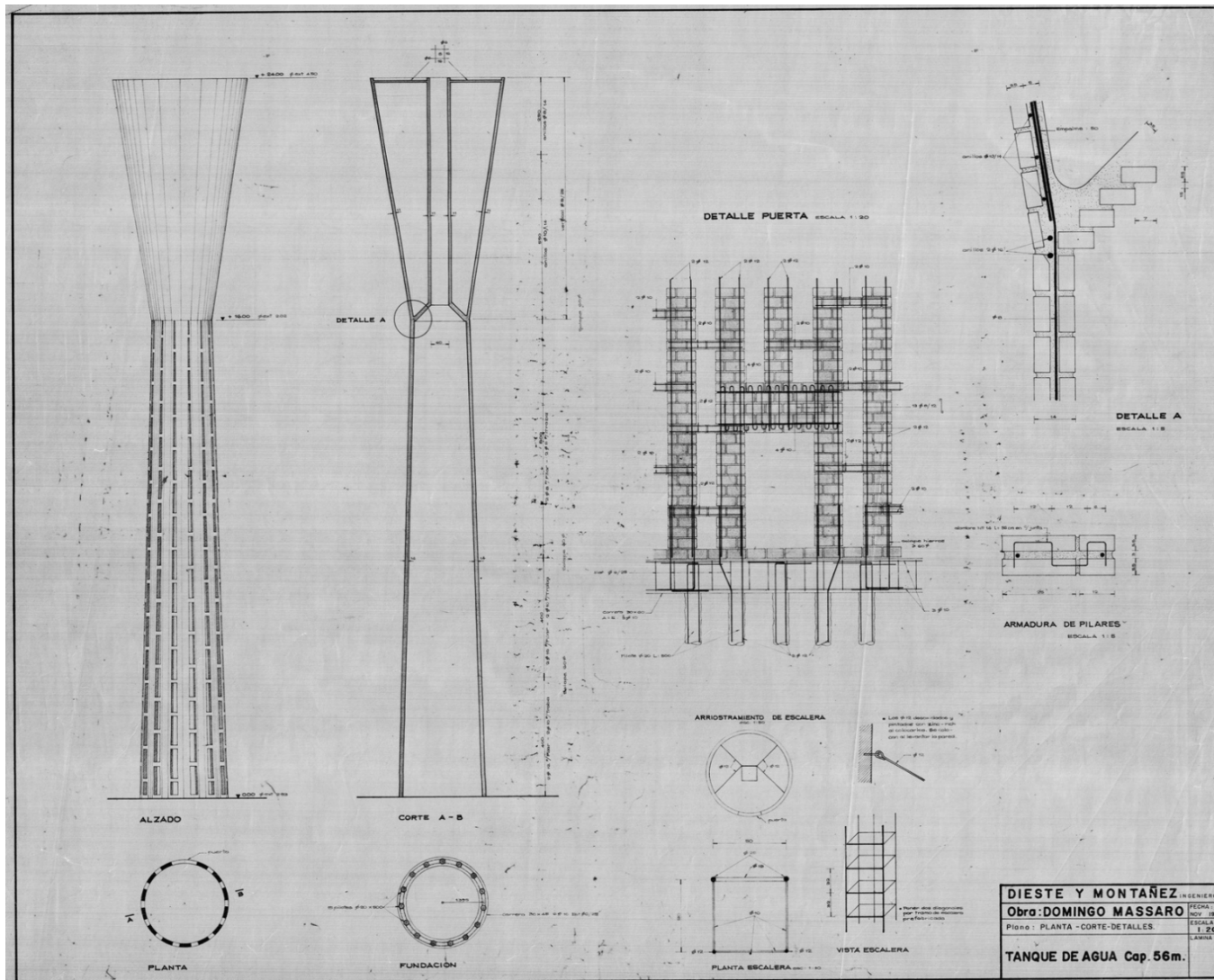


Fig. 49. I Tanque de agua. Fuente: Centro de Documentación

6. Estudio de la estructura.

6.1. Descripción y simplificación.

Procedemos a realizar el análisis sobre el comportamiento estructural de La Fábrica Domingo Massaro mediante el programa de cálculo Angle y la modelización se realiza con el programa de diseño Autocad. Dentro de Autocad asignamos las propiedades a los distintos elementos como la geometría, los materiales, las cargas y las distintas hipótesis de cargas. La estructura se simplifica en superficies (3D caras). Una vez simplificada la estructura en Autocad, importamos el modelo a Angle, donde se calculará el comportamiento estructural tanto de una bóveda como todo el conjunto.

6.2. Análisis del comportamiento de las bóvedas.

A continuación se va a proceder a analizar únicamente el comportamiento de las bóvedas en diferentes situaciones y en cada fase de ejecución, ya que funcionan de forma independiente. Esto se hace para entender cómo funcionan estas bóvedas sin tener en cuenta ni los cerramientos ni los pilares, ya que estos últimos se sustituyen por diferentes tipos de apoyos.

6.2.1. Bóveda con función catenaria.

Se plantean 6 modelos diferentes para comprobar cómo funciona el elemento principal de la obra dependiendo de la fase de ejecución en la que se encuentren. Estos modelos de izquierda a derecha serían: sólo con apoyos en los pilares -coacción sólo vertical-, sólo con apoyos en los pilares, apoyos fijos en los pilares -borde de losa con desplazamiento horizontal coaccionado y vertical libre-, apoyo en los pilares -borde de losa libre y rigidizada con losa horizontal-, apoyo en los pilares -borde de losa libre y rigidizada con pretensado-y sistema de bóvedas múltiples. Para analizar estos 6 modelos planteados, se saca con el programa Angle las deformaciones en el eje Y y Z de la bóveda.

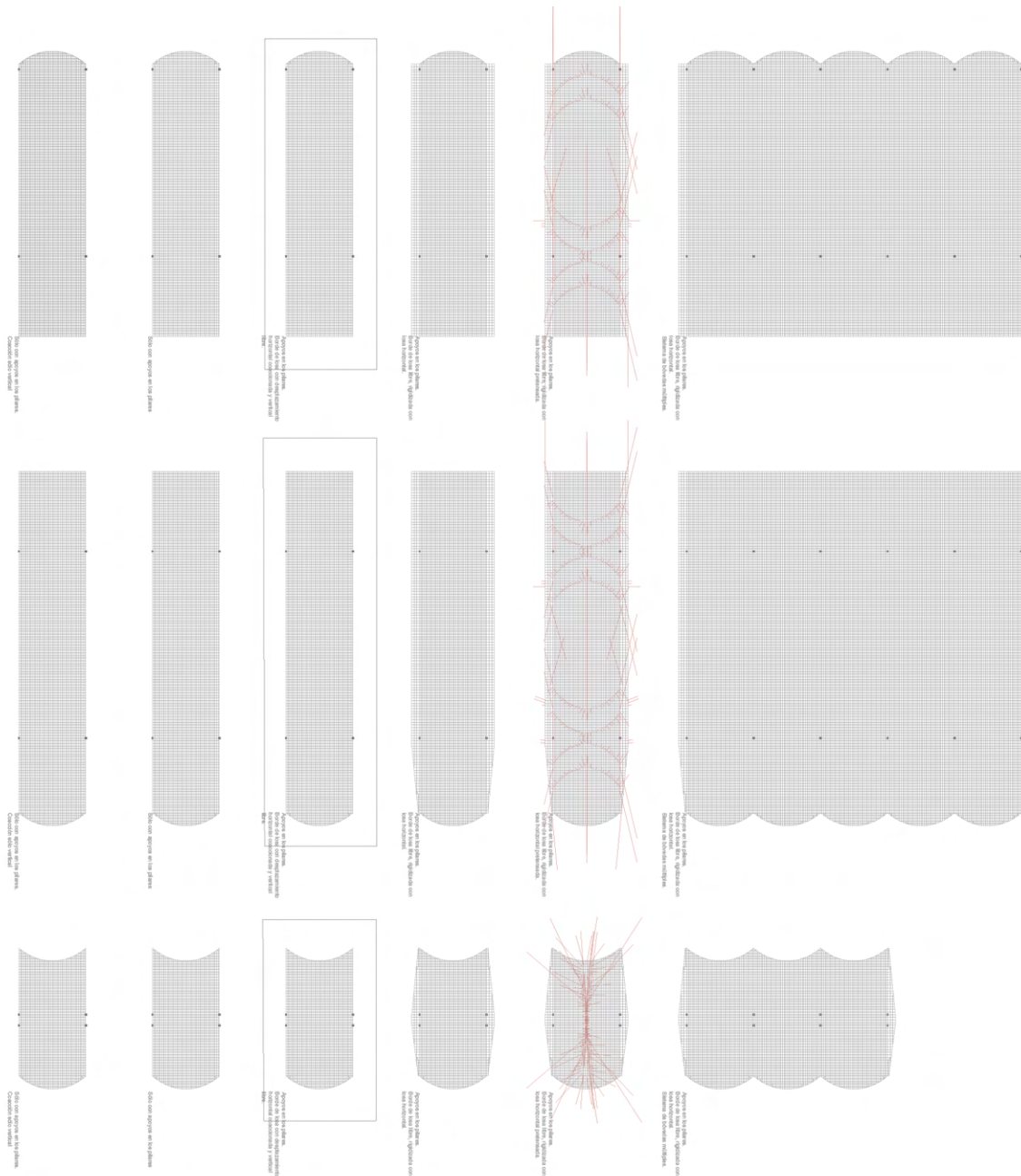


Fig. 50. | Fase 1, Fase 2 y Fase 3. Distintos modelos. Fuente: *Elaboración propia*

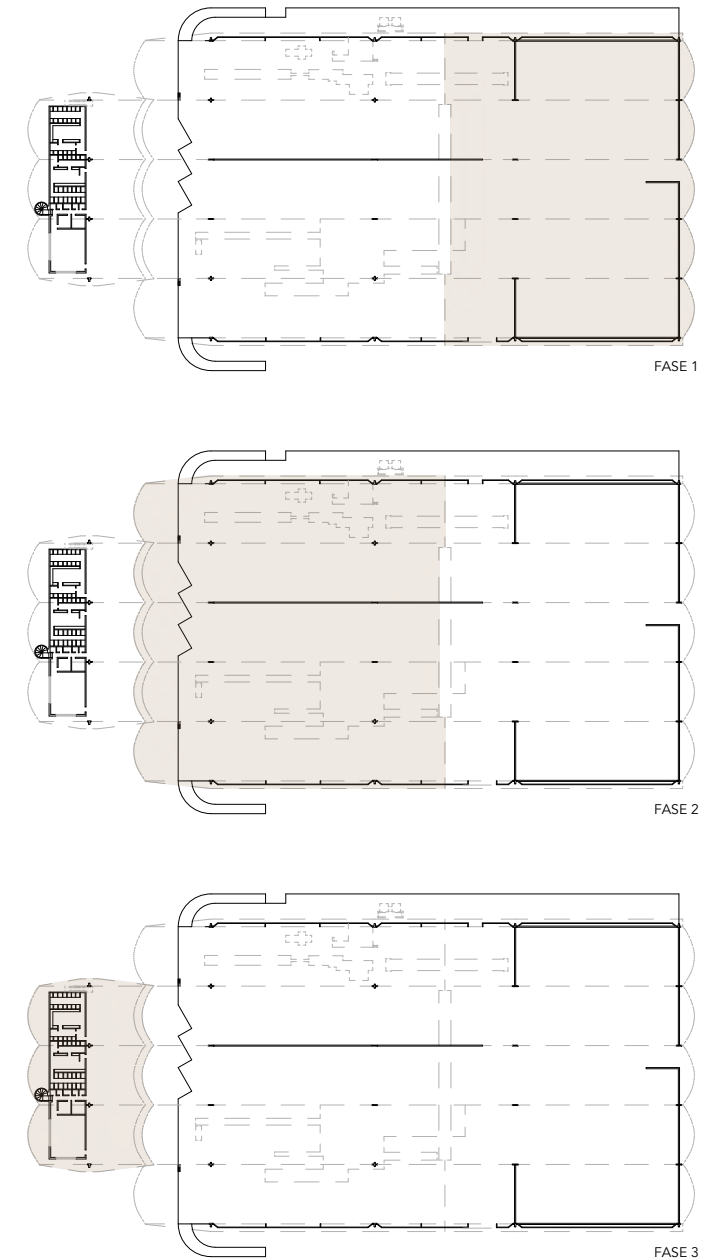
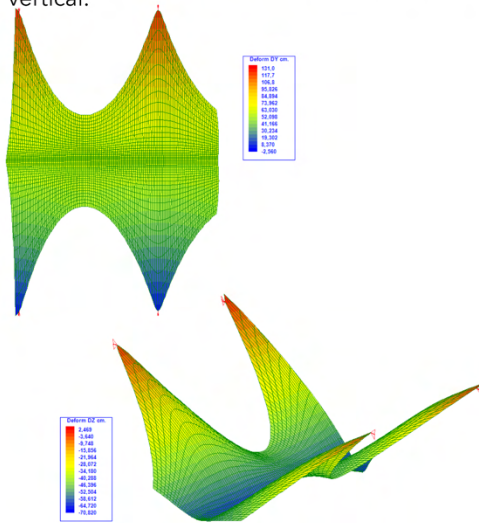
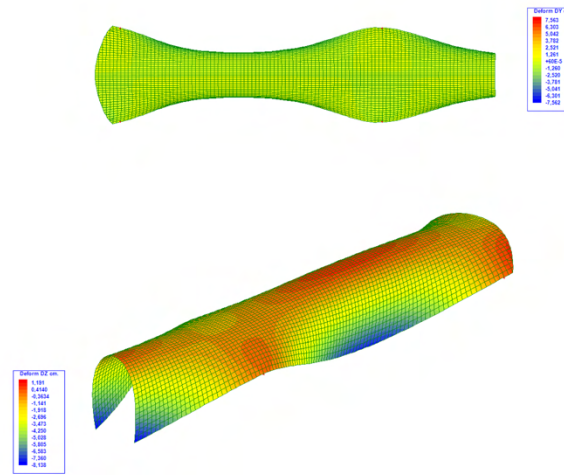


Fig. 51. | Plantas de las tres fases. Fuente: *Elaboración propia*

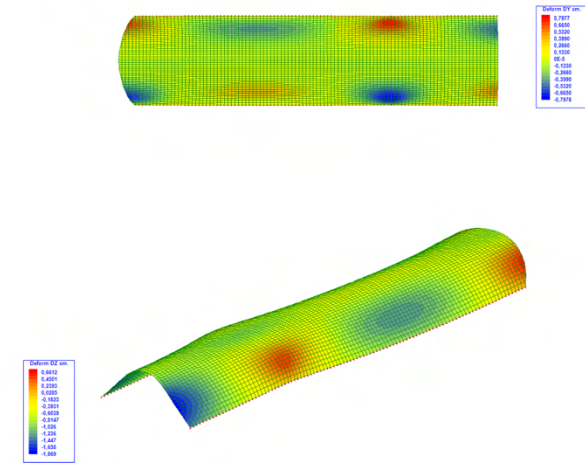
1. Sólo apoyo en los pilares. Coacción solo vertical.



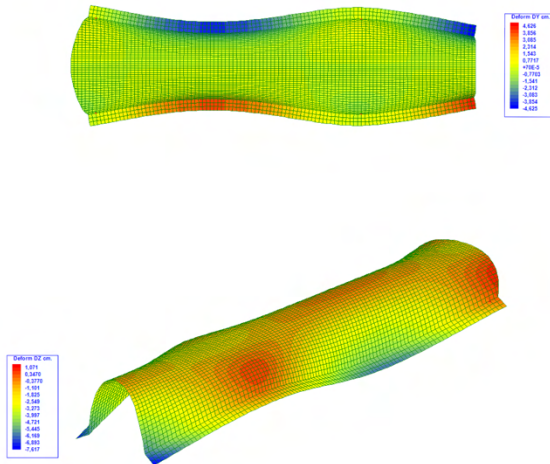
2. Sólo apoyos fijos en los pilares.



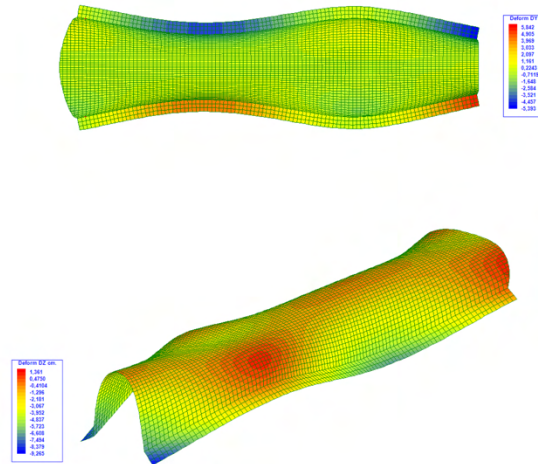
3. Apoyo en pilares. Borde de losa con desplazamiento horizontal coaccionado y vertical libre.



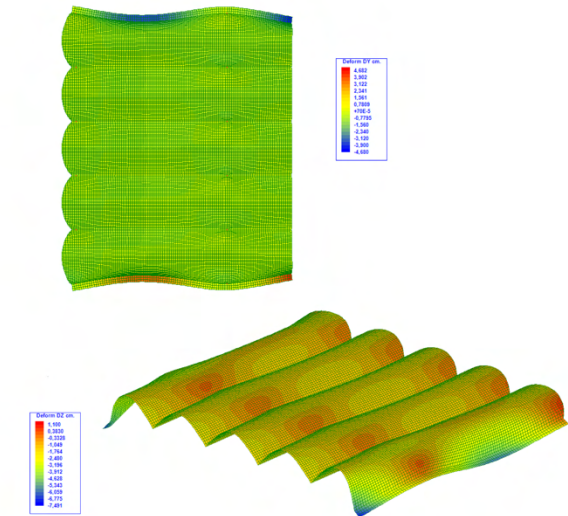
4. Apoyo en pilares. Borde de losa libre y rigidizada con losa horizontal.



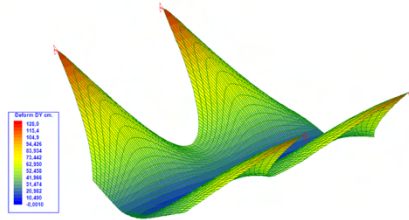
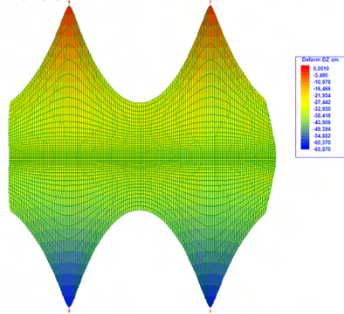
5. Apoyo en pilares. Borde de losa libre y rigidizada con pretensado.



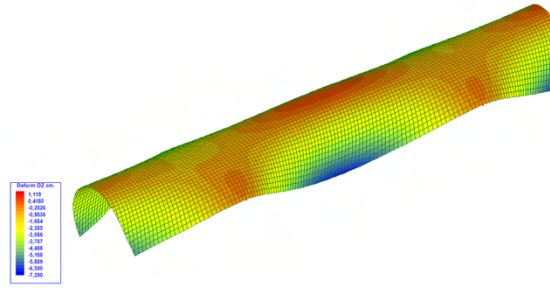
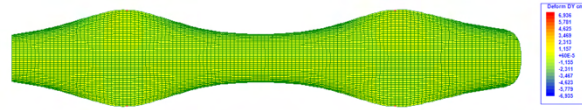
6. Sistema de bóvedas múltiples.



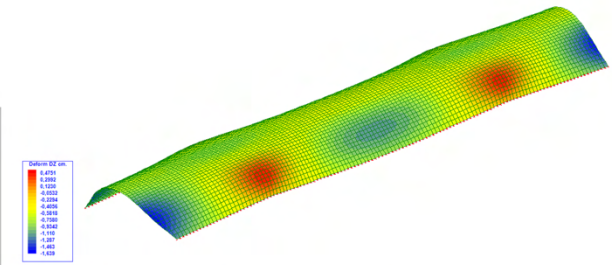
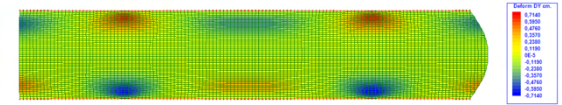
1. Sólo apoyo en los pilares. Coacción solo vertical.



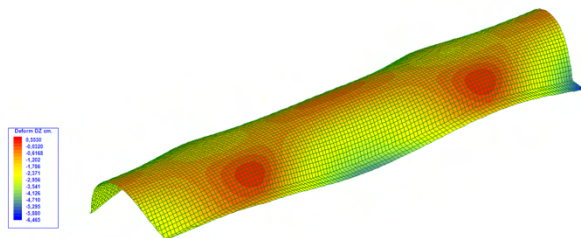
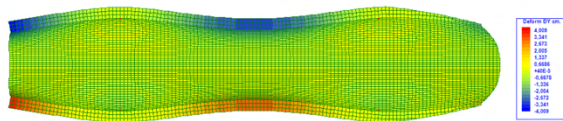
2. Sólo apoyos fijos en los pilares.



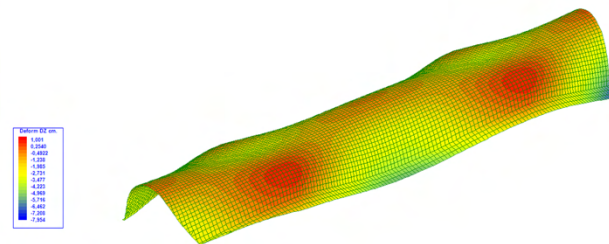
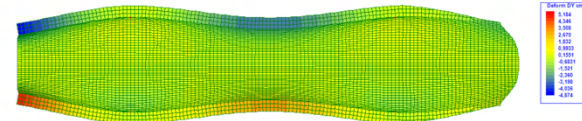
3. Apoyo en pilares. Borde de losa con desplazamiento horizontal coaccionado y vertical libre.



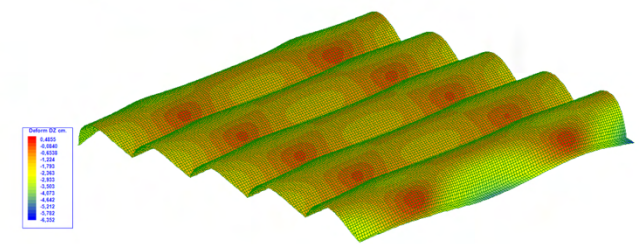
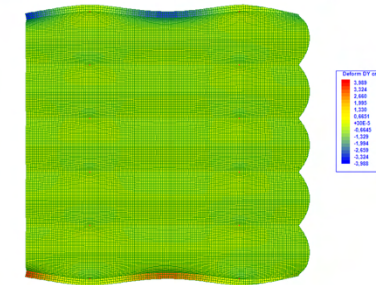
4. Apoyo en pilares. Borde de losa libre y rigidizada con losa horizontal.



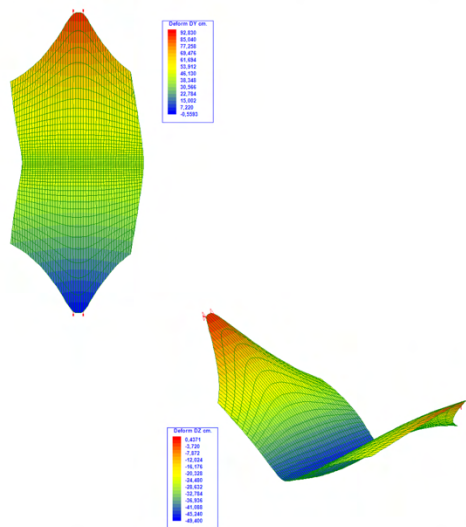
5. Apoyo en pilares. Borde de losa libre y rigidizada con pretensado.



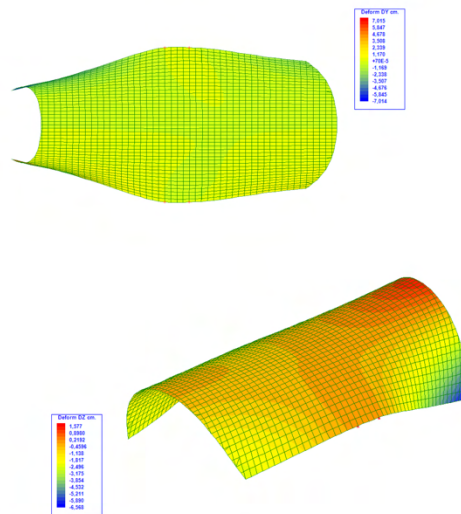
6. Sistema de bóvedas múltiples.



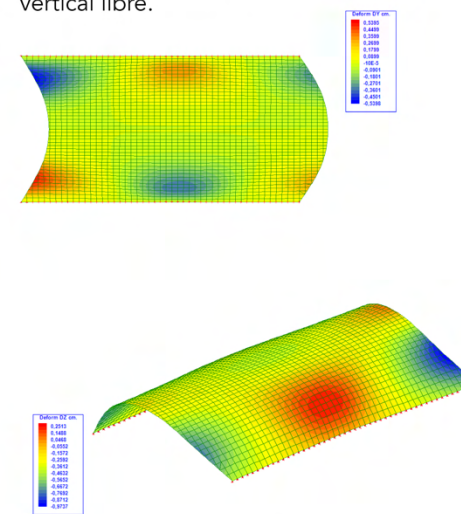
1. Sólo apoyo en los pilares. Coacción solo vertical.



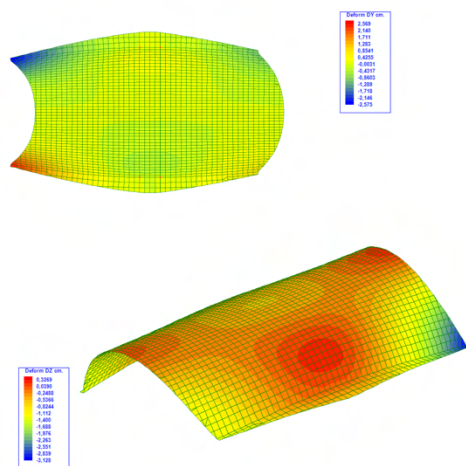
2. Sólo apoyos fijos en los pilares.



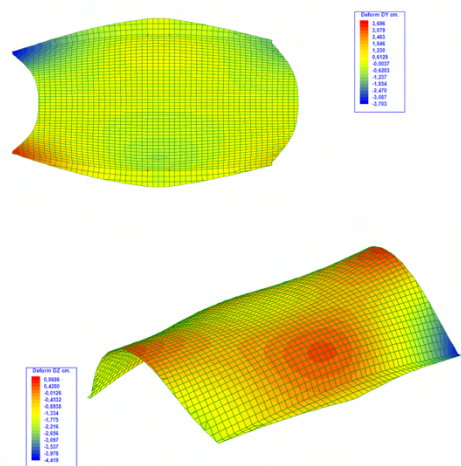
3. Apoyo en pilares. Borde de losa con desplazamiento horizontal coaccionado y vertical libre.



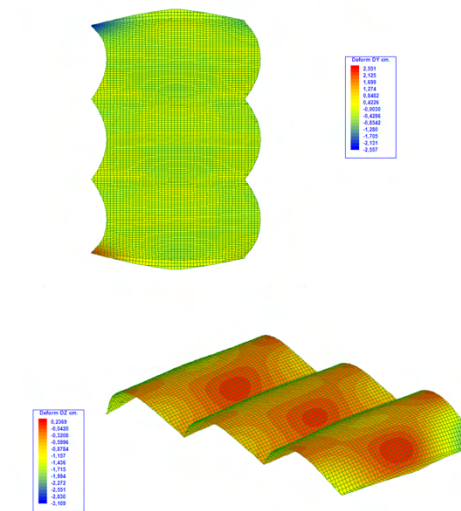
4. Apoyo en pilares. Borde de losa libre y rigidizada con losa horizontal.



5. Apoyo en pilares. Borde de losa libre y rigidizada con pretensado.



6. Sistema de bóvedas múltiples.



- Fase 1: bóveda con 2 apoyos en cada extremo y un vuelo.

Esta fase se caracteriza por tener 4 diafragmas estructurales y 2 muros portantes. A la hora de elaborar los modelos, esto no se ha tenido en cuenta ya que se valorará más adelante. Además, únicamente valoraremos el peso propio de la estructura, despreciando cualquier otro tipo de carga, a excepción del pretensado en el caso cinco.

De los seis casos que se plantean, el más desfavorable es el primero, con coacción de desplazamientos sólo verticales en la cabeza de los pilares, llegando a darse desplazamientos de -70,82 cm en el eje Z en centro de bóveda; y de hasta 131 cm en el eje Y.

Para el segundo modelo se han modificado las condiciones de apoyo de la bóveda, teniendo en este caso coacción de desplazamientos en cabeza de pilares horizontales verticales. De esta manera, observamos una mejoría notable en las deformaciones de la bóveda, reduciéndose los movimientos en el eje Z hasta un máximo de -8,14 cm; y 7,56 cm en el eje Y. Este caso sería el más parecido al comportamiento de una bóveda sencilla.

En el tercer caso, planteamos una bóveda donde se han coaccionado los desplazamientos horizontales y verticales en los apoyos, y horizontales en las aristas. Podríamos decir que este es el planteamiento más favorable de los seis, con desplazamientos máximos de -1,87 cm en el eje Z; y desplazamientos de 0,79 cm en el eje Y. Este caso es lo más parecido a una bóveda central entre bóvedas y sólo con peso propio. Sorprende el buen comportamiento fijando los desplazamientos horizontales de arista.

Para proseguir con el estudio, en el cuarto caso se añadirán al conjunto dos aletas en los laterales longitudinales. Al hacer esto, conseguimos un resultado parecido al del segundo caso. Los desplazamientos en el eje Z aumentan ligeramente, con un máximo de -7,62 cm; pero los del eje Y disminuyen hasta 4,63 cm.

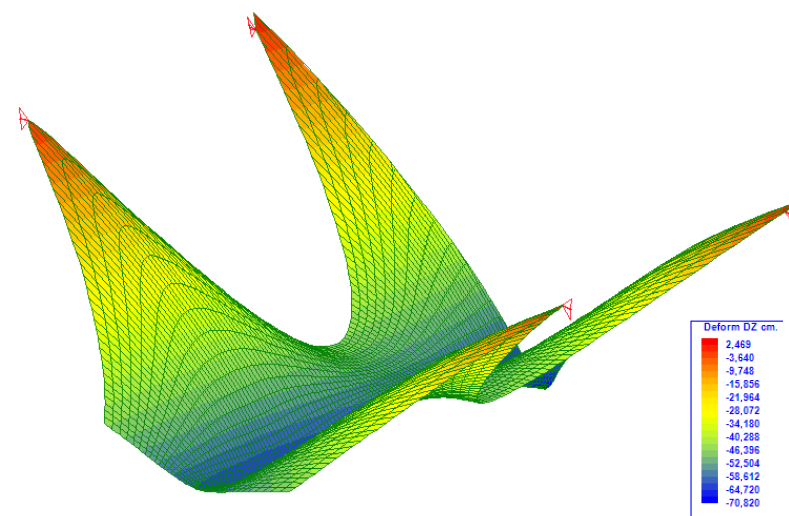


Fig. 52. I Fase 1. Modelo 1. HIP01. Fuente: *Elaboración propia*

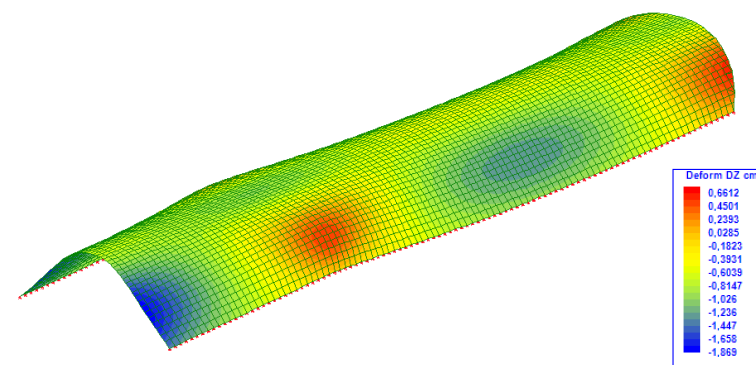


Fig. 53. I Fase 1. Modelo 3. HIP01. Fuente: *Elaboración propia*

Continuando el modelo del caso cuatro, en la quinta hipótesis se añadirá a la estructura un pretensado. Con la adición de este elemento, las deformaciones tanto en el eje Z como en el eje Y se verán incrementadas milimétricamente, siendo un aumento casi despreciable.

Para finalizar el estudio de la primera fase, se estudiarán las cinco bóvedas conjuntamente para ver su comportamiento en serie. Partiendo del mismo punto que en el cuarto caso y sin pretensado, los valores de los desplazamientos en el eje Z y el eje Y varían muy poco respecto al caso cuatro una vez más, siendo la diferencia despreciable.

En conclusión, al no ser posible llevar a cabo el tercer caso y siendo este el más favorable, sustituir ese apoyo a modo de losa por dos apoyos fijos a cada lado y dos aletas en los bordes longitudinales suponen la solución con mejor comportamiento.

- Fase 2: bóveda con 2 apoyos en cada extremo y doble vuelo.

La segunda fase se caracteriza por no tener diafragmas y muros portantes. A la hora de elaborar los modelos, esto no se ha tenido en cuenta la geometría de los pilares ya que se valorará más adelante. Esta fase es semejante a la anterior, por lo que nos centraremos en los casos que más destacan. Además, únicamente valoraremos el peso propio de la estructura, despreciando cualquier otro tipo de carga, a excepción del pretensado en el caso cinco.

De los seis casos que se plantean, el más desfavorable es el primero, con coacción de desplazamientos sólo verticales en la cabeza de los pilares, llegando a darse desplazamientos de -65,87 cm en el eje Z; y de hasta 128 cm en el eje Y.

En el tercer caso, planteamos una bóveda con coacción de desplazamientos horizontales y verticales en los apoyos, y horizontales en las aristas. Este es el planteamiento más favorable, con desplazamientos máximos de -1,64 cm en el eje Z; y desplazamientos de 0,72 cm en el eje Y.

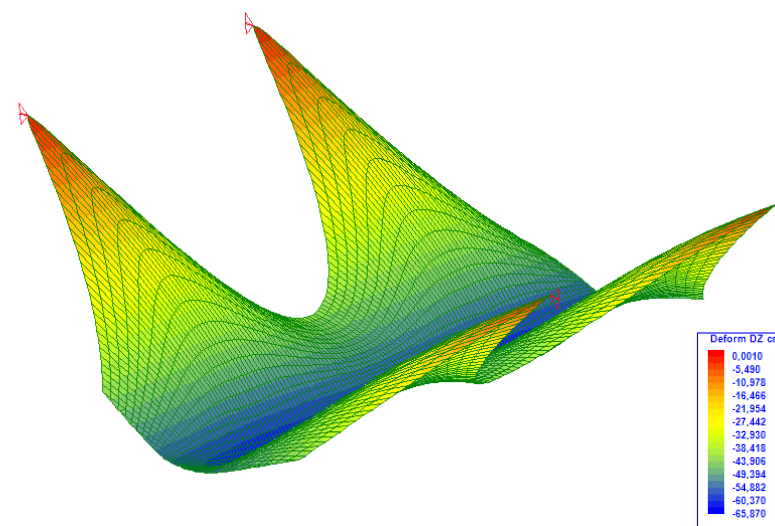


Fig. 54. I Fase 2. Modelo 1. HIP01. Fuente: *Elaboración propia*

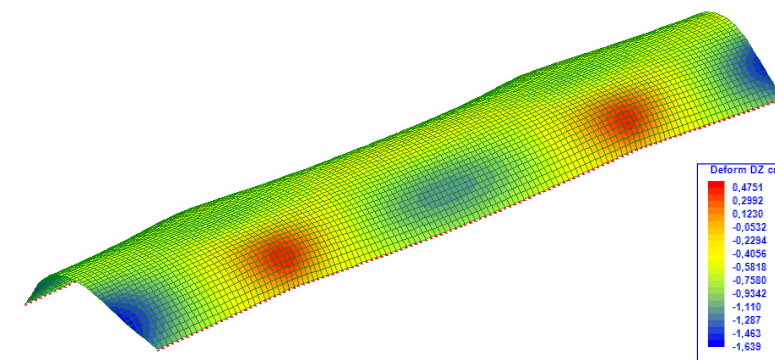


Fig. 55. I Fase 2. Modelo 3. HIP01. Fuente: *Elaboración propia*

- Fase 3: bóveda con 1 apoyo en cada extremo y doble vuelo.

En esta ocasión sustituimos el soporte por 2 apoyos fijos simulando la cabeza del soporte ya que con un único apoyo el programa Angle lo reconocía como mecanismo. Aunque esta fase sea diferente a las 2 anteriores, los casos más destacables siguen siendo el primero y el tercero; coacción sólo vertical y borde de losa con desplazamiento horizontal coaccionado y vertical libre.

El caso más desfavorable es el primero, con coacciones sólo verticales en los apoyos, llegando a darse desplazamientos de -49,40 cm en el eje Z; y de hasta 92,83 cm en el eje Y. El caso más favorable es el tercero, donde se plantea una bóveda apoyada en una losa que coacciona los movimientos horizontales, dejando libres los verticales. Este es el planteamiento más favorable de los seis, con desplazamientos máximos de -0,97 cm en el eje Z; y desplazamientos de 0,54 cm en el eje Y.

6.2.2. Bóveda con función parábola.

El objetivo de este análisis es ver cuáles son las diferencias entre una bóveda de directriz catenaria y parábola. Detallaremos los momentos en dirección transversal M_y y deformaciones en los tres ejes de una bóveda con apoyos fijos.

Podemos observar que en la bóveda con directriz catenaria, los momentos negativos máximos en el eje Y (-17,32 kN·m) son menores que los de directriz parábola (-20,32 kN·m). En los dos casos estos momentos se concentran en la zona superior de la bóveda pero si analizamos los dos ejemplos, la bóveda con catenaria tiene también una concentración de éstos en la zona de los apoyos, lo cual permite que en la zona superior de las bóvedas los momentos sean menores. Se ha elaborado una tabla comparativa de los dos casos para ver cuáles son las diferencias de las deformaciones. Las dos bóvedas deforman prácticamente lo mismo pero se demuestra que tanto en el eje Z como en el eje Y, la bóveda con catenaria tiene menores desplazamientos, por lo tanto, es mejor solución.

Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de Eladio Dieste: cerámica armada.

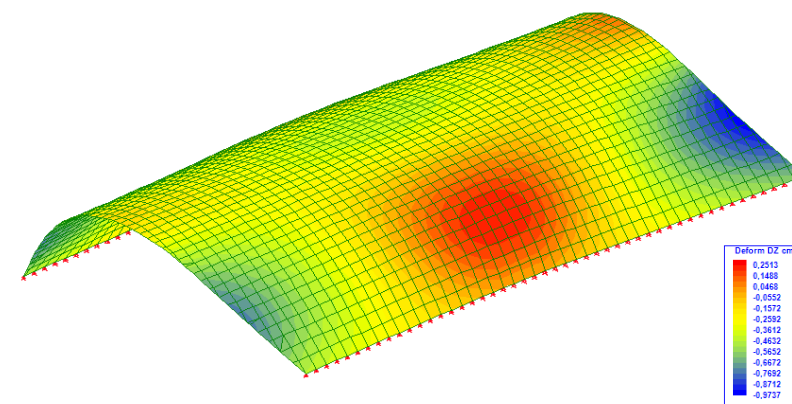


Fig. 56. | Fase 3. Modelo 3. HIP01. Fuente: *Elaboración propia*

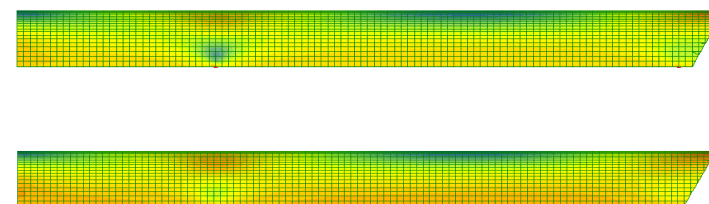


Fig. 57. | Catenaria (superior) y parábola (inferior). Momentos M_y . HIP01. Fuente: *Elaboración propia*

	Catenaria		Parábola	
	+	-	+	-
Dz (cm)	1,19	8,14	1,39	9,43
Dy (cm)	7,56	7,56	8,82	8,83
Dx (cm)	0,32	0,2	0,32	0,19

Fig. 58. | Tabla comparativa de deformaciones. HIP01. Fuente: *Elaboración propia*

6.3. Modelización de los diferentes elementos.

6.3.1. Pilares.

Los pilares que sostienen las bóvedas se pueden clasificar en 3 tipos según su forma y posición.

Los pilares tipo 1, forma de cruz en planta, cabe diferenciar entre fase 1 y 2 y la fase 3. Se sitúan en los laterales interiores sosteniendo las 2 bóvedas laterales de la nave de la fase 2 mientras que en la fase 1 solo encontramos dos pilares de este tipo sosteniendo la nave. Sus dimensiones son (50+25+50 x 35+20+35 cm). Este tipo de pilares también sostienen la bóveda central junto a las laterales de la nave secundaria (fase 3). Sus dimensiones son (50+25+50 x 35+20+35 cm). Mientras que en la fase 1 y 2 la altura es de 6 metros, en la fase 3 es de 6,20 metros.

Los pilares tipo 2, con forma de rectangular en planta, se sitúan en el centro de la nave principal sosteniendo las 3 bóvedas centrales de la fase 1 y 2. Son de dimensión constante (79 x 25 cm). La altura de estos pilares es 6 metros.

Los pilares tipo 3, con forma de T en planta más un canto variable en dirección transversal a la nave que abarca desde 20 cm debajo de la cabeza del pilar hasta la cimentación, se sitúan en los laterales exteriores sosteniendo las 2 bóvedas laterales de la nave principal. Este tipo de pilares también sostienen las 2 bóvedas laterales de la nave secundaria.

En la fase 1 y 2, su dimensión cuenta con una parte que si es constante (79 x 25 cm) y (52,5 x 30 cm) y en la fase 3 (90 x 25 cm) y (52,5 x 30 cm). La separación entre el canto en dirección transversal y el pilar es variable dependiendo de la altura. La altura de los pilares en la fase 1 y 2 es de 6 metros, y en la fase 3 es de 6,20 metros.

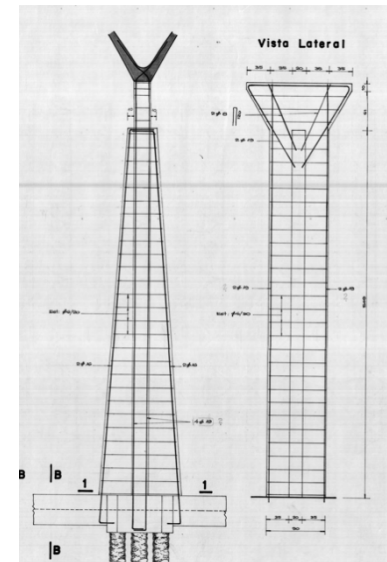


Fig. 59. | Pilar tipo 1.

Fuente: Centro de Documentación

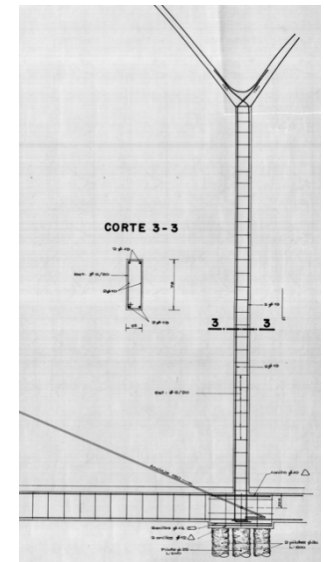


Fig. 60. | Pilar tipo 2.

Fuente: Centro de Documentación

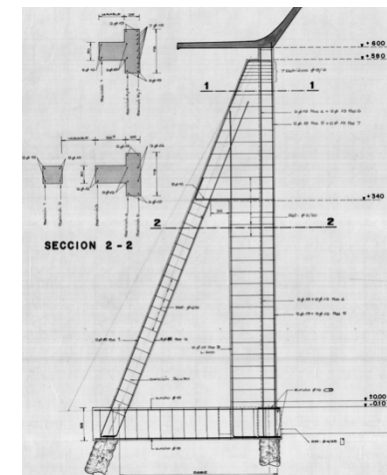


Fig. 61. | Pilar tipo 3 en la fase 1 y 2.

Fuente: Centro de Documentación

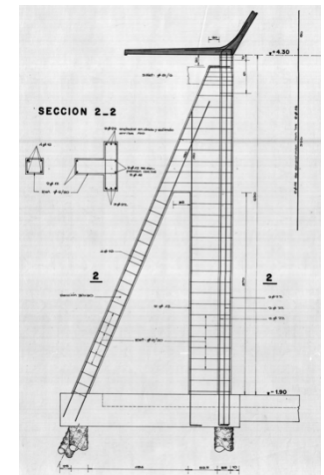


Fig. 62. | Pilar tipo 3 en la fase 3.

Fuente: Centro de Documentación

Hay que comentar que el retranqueo de 20 cm que sufren las cabezas de los pilares en la unión con las bóvedas permite disminuir la resistencia a flexión y posibilita los giros, igualando la rigidez a la del resto de pilares.

Realizamos el modelado 3D de los pilares en Autocad en su capa correspondiente capa con la información considerada anteriormente. Las propiedades de cada material se insertan a partir de una extensión del programa Angle sobre la ventana de Autocad. Como se han realizado con 3dcaras, posteriormente se les asignará simplemente el grosor que tienen con el material HA-25.

6.3.2. Vigas laterales.

Las vigas (losas) de borde nacen de la unión entre la bóveda y los pilares laterales exteriores. A su vez en el vuelo de las bóvedas, la viga de borde disminuye su espesor hasta los 8 cm al final de la unión. Controlan la deformabilidad del borde libre de la lámina. El cuerpo de oficinas se encuentra atirantando las 3 bóvedas de la fase 3 desde el encuentro de la viga con la bóveda lateral.

Realizamos el modelado 3D de las vigas en Autocad en su correspondiente capa con la información considerada anteriormente. Las propiedades de cada material se insertan a partir de una extensión del programa Angle sobre la ventana de Autocad. Como se han realizado con 3dcaras, posteriormente se les asigna simplemente el grosor que tienen con el material HA-25.

6.3.3. Bóveda.

Las bóvedas están conformadas de ladrillos huecos armados (ticholos 25x25x8) unidos con mortero de arena y portland. Las bóvedas en la superficie, por encima de la cerámica tienen una capa de mortero de 3cm con malla electrosoldada ($e=4$) y están pintadas de blanco para reflejar la radiación solar. (Facultad de Arquitectura de Uruguay [FADU], 2022)



Fig. 63. | Vista a pilares tipo 1 y 3 en la fase 3. Fuente: FADU

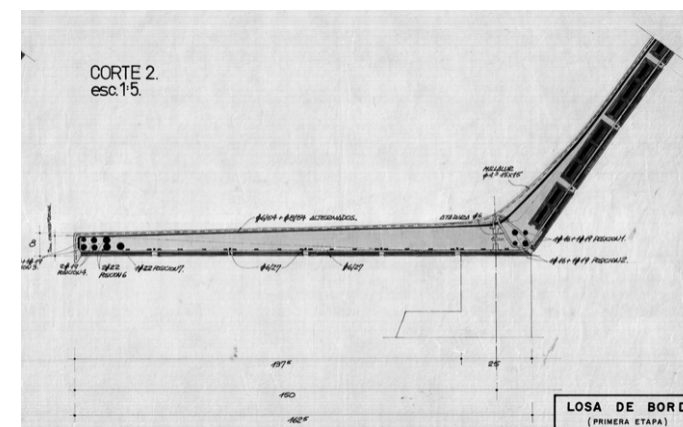


Fig. 64. | Detalle de losa de borde. Fuente: Centro de Documentación

	HA-25	HA-30	Fábrica Ladrillo	Cerámica armada
Módulo E (N/mm ²)	31000	32000	6000	18500
Coefficiente de Poisson	0,2	0,2	0,25	0,225
Módulo G trans. (N/mm ²)	12916	13333	2400	7658
Densidad (Kg/m ³)	2500	2500	1800	2150
Coef. Dilatación térmica (m/m ^o)	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001

Fig. 65. | Valores de distintos materiales. Fuente: Elaboración propia

Para realizar el modelado de la bóveda, dada la falta de información sobre la geometría se realizan hipótesis con la parábola y la catenaria. Se ha realizado una hoja de cálculo con el programa Excel para averiguar los 22 puntos que conforman la catenaria y parábola con una $L= 12,54$ metros y una $F= 4,2$ metros. Después del estudio de las dos funciones, se propone la curva catenaria como superficie ya que se asemeja a nuestra bóveda.

Realizamos el modelado 3D de las bóvedas en Autocad en su correspondiente capa con la información considerada anteriormente. Las propiedades de cada material se insertan a partir de una extensión del programa Angle sobre la ventana de Autocad. Como se han realizado con 3dcaras, posteriormente se les asigna simplemente el grosor que tienen (8 cm de ladrillo y 4 cm de la capa de mortero y la malla electrosoldada) con el material cerámica armada. Se debe crear un nuevo material que reúna características de HA-25 y de la fábrica de ladrillo. Para ello, hemos realizado una tabla para encontrar un valor intermedio de los dos materiales.

6.3.4. Cerramiento, muros portantes y diafragmas.

El cerramiento de oficinas está formado por fábrica de ladrillo, se encuentra independiente de la estructura principal pero unido mediante tensores a las bóvedas de la tercera fase, y se eleva hasta una altura de 5,50 metros.

El muro portante de la fachada oeste y este, formado por 2 hojas de 12 cm y 16 cm de fábrica de ladrillo forma parte de la estructura principal, arriostrado por pilares de hormigón armado intermedios y contrafuertes de fábrica alcanza la altura de 6 metros. Los diafragmas también son de fábrica de ladrillo y en su interior cuentan con 2 tensores del $\varnothing 25$.

Realizamos el modelado 3D de los muros portantes con sus pilares interiores y los diafragmas en Autocad en su correspondiente capa con la información considerada anteriormente. Las propiedades de cada material se insertan a partir de una extensión del programa Angle sobre la ventana de Autocad. Como se han realizado con 3dcaras, posteriormente se les asigna simplemente el grosor que tienen con el material ladrillo cerámico.

Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de Eladio Dieste: cerámica armada.

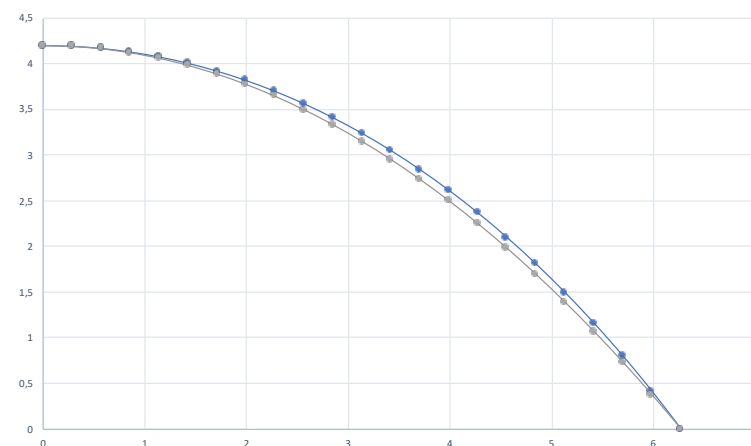


Fig. 66. | Catenaria Massaro gráfica. Fuente: Ricardo Perelló

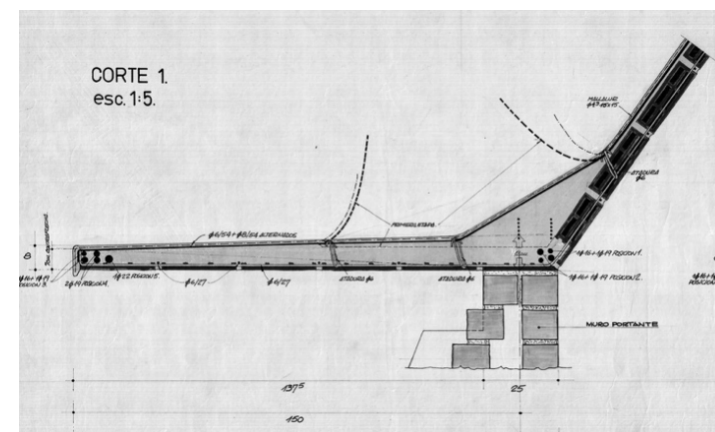
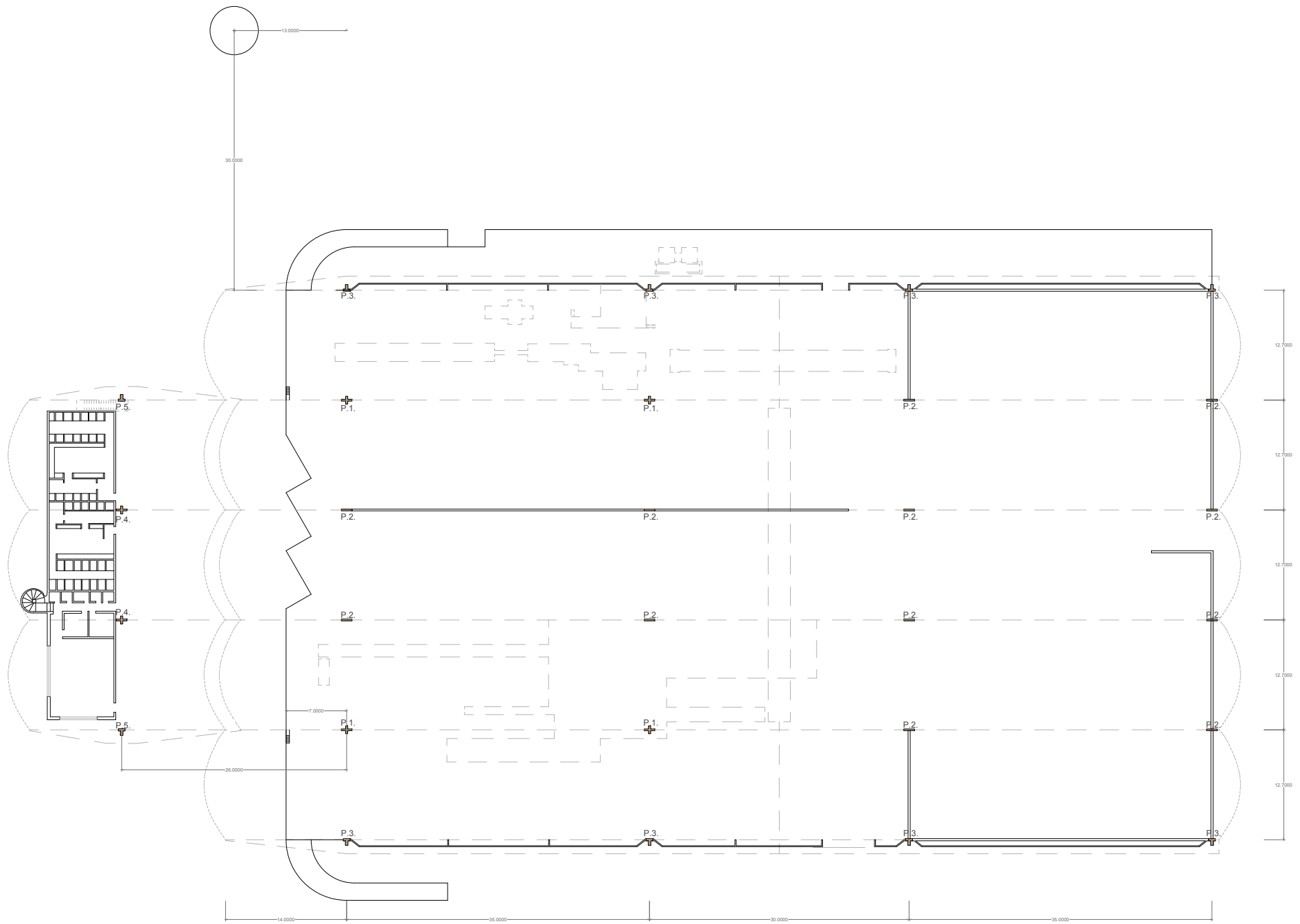


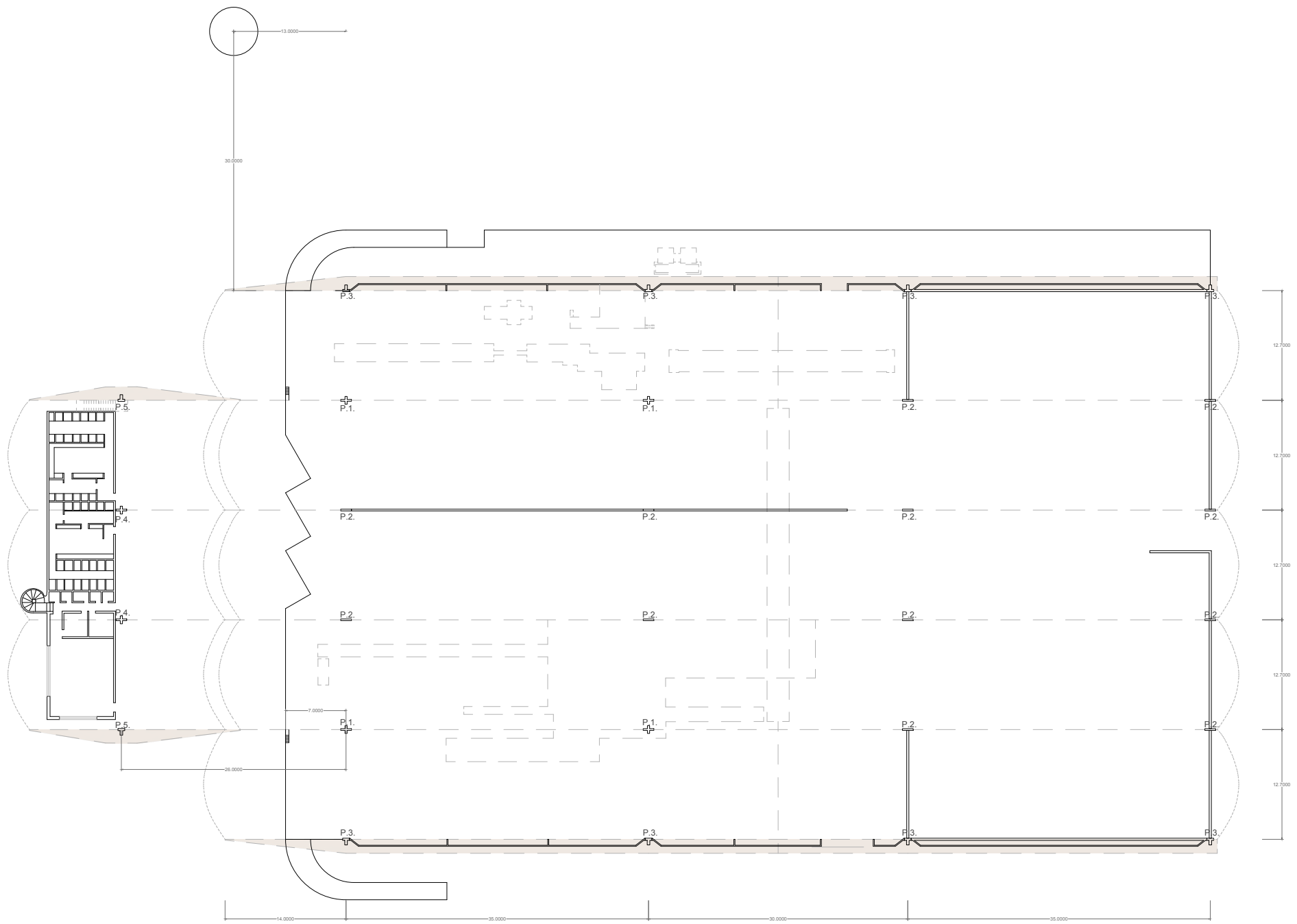
Fig. 67. | Detalle de losa de borde. Fuente: Centro de Documentación



Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de Eladio Dieste: cerámica armada.

Planta. Tipos de pilares.

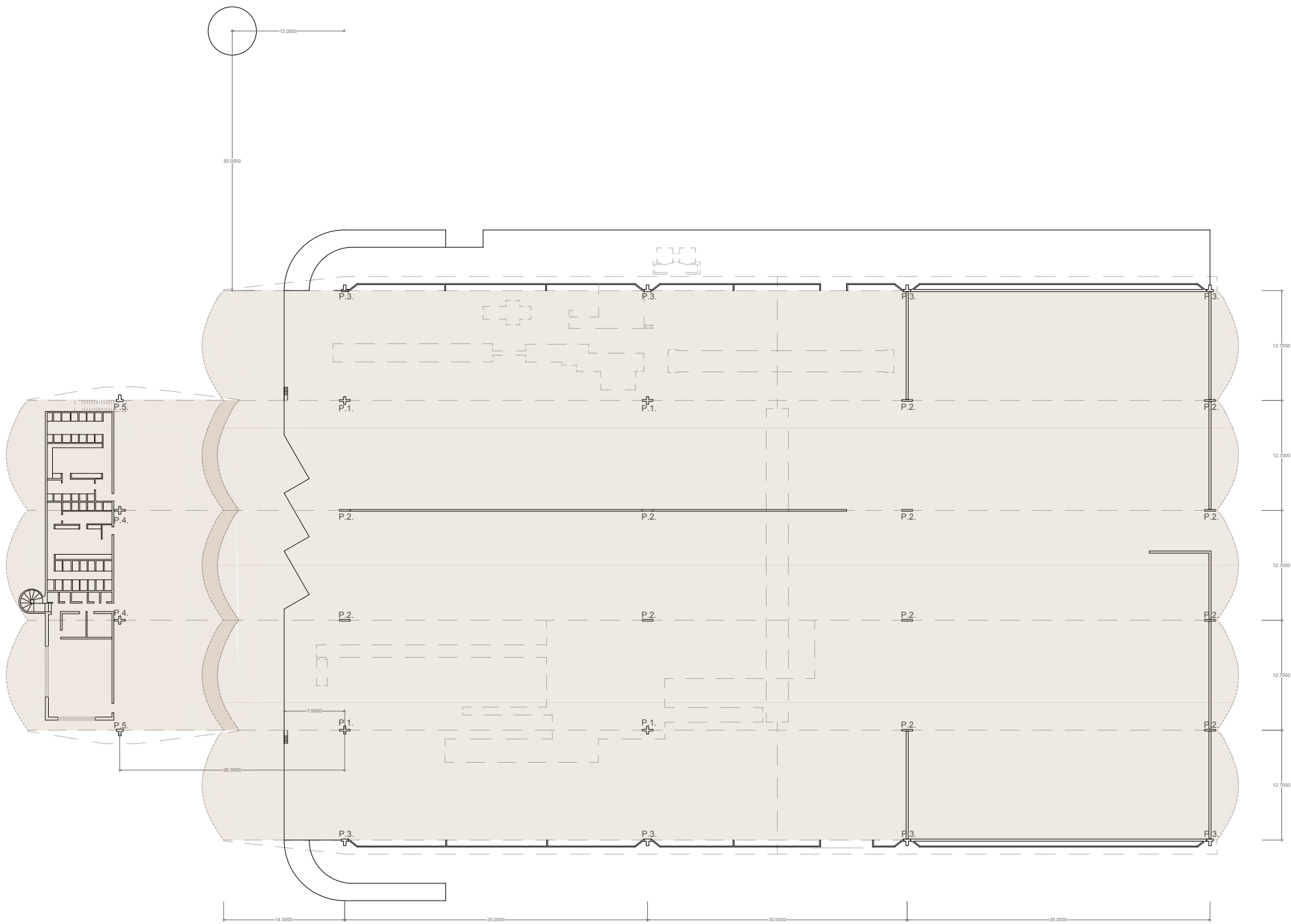




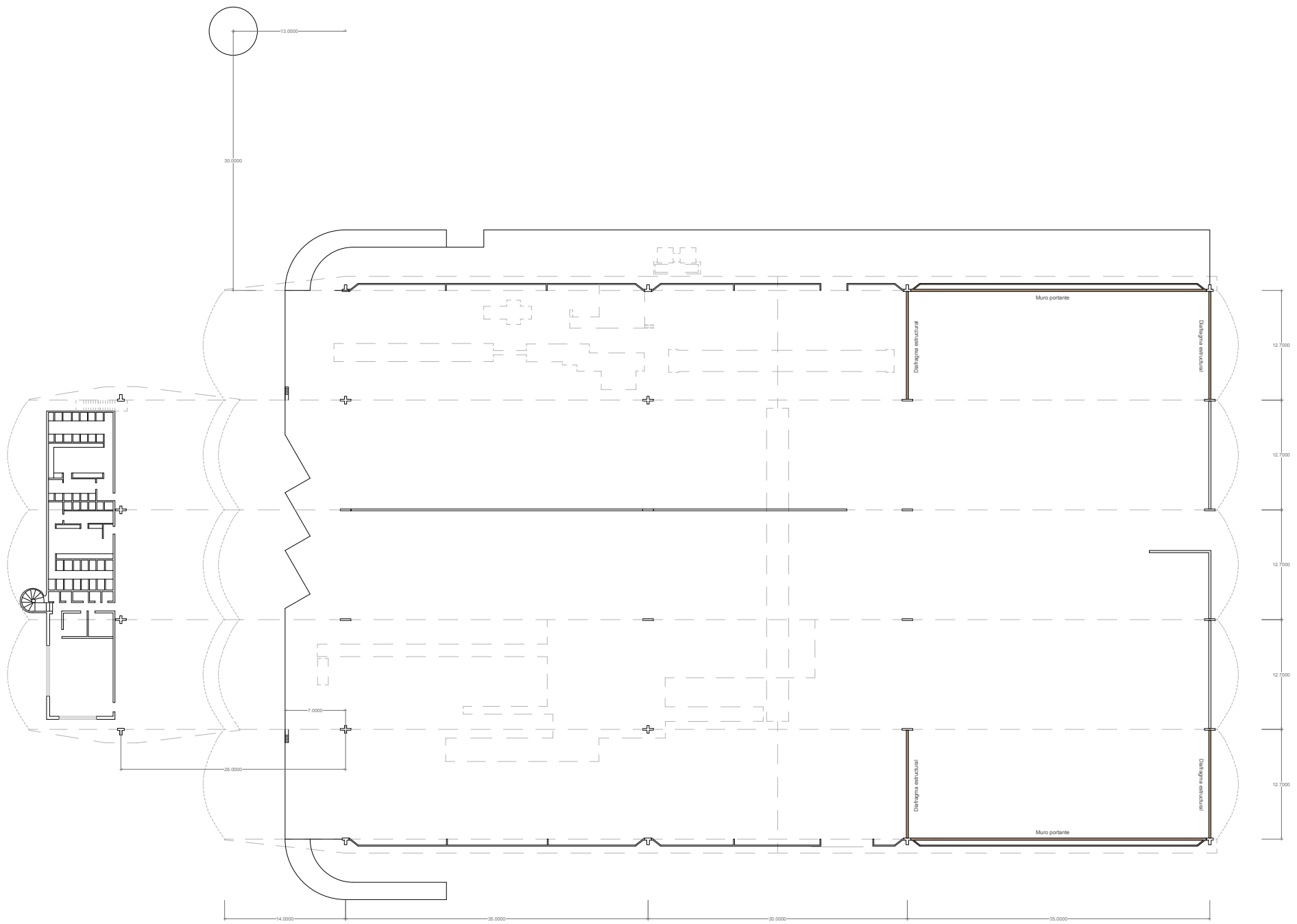
Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de Eladio Dieste: cerámica armada.

Planta. Vigas laterales.





Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de Eladio Dieste: cerámica armada.



Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de Eladio Dieste: cerámica armada.

Planta. Muros portantes y diafragmas.  Escala 1:600 

6.4. Pretensado.

Se trata de colocar una vaina con una forma, dicha vaina tiene un cable incorporado dentro, se hormigona, y una vez fraguado el hormigón, es decir, alcanzada la resistencia característica, se tensa. Al tensar se forman fuerzas de compresión en los extremos. En este caso, los tensores tienen forma de ochos, de arco o cables rectos y representan las tensiones principales de tracción que aparecen por el peso propio en la pieza. Para realizar las dos primeras fases es importante destacar que se carecía de documentación real del pretensado, por lo tanto, es una mera aproximación a la realidad donde se ha tomado como referencia otros proyectos similares.

Al realizar el modelado en Autocad con sus correspondientes capas, introduciremos con el programa Angle el pretensado en la capa HIP11.

- Pretensado de las bóvedas de la primera y segunda fase.

Las bóvedas se encuentran pretensadas con cables rectos y con forma de arco de 24 T (240 kN) cada cable y las vigas laterales con un torón cada una de 17,8 T (178 kN) colocados para eliminar las zonas de tracción. Se modeliza con un cable donde se encuentra dicho pretensado y se introduce su correspondiente carga con la extensión de Angle.

Para realizar el pretensado de estas dos fases se ha tomado como modelo la Fábrica Fagar, es un proyecto que se asemeja a la Fábrica Domingo Massaro. Para conocer cuánta cantidad de pretensado necesitamos en cada zona de la bóveda; primero se ha simplificado la bóveda como viga con apoyos fijos y posteriormente se ha dibujado las dos fases en el programa Ftool para conocer los momentos (M) tanto positivos como negativos. Conociendo el brazo mecánico de la bóveda ($z=2,232$ m), calculamos la fuerza (F). Dicha fuerza será nuestro pretensado. $[F= M/z]$

- Pretensado de las bóvedas de la tercera fase.

Las tres bóvedas se encuentran pretensadas con cables en forma de ocho, algo muy similar a la Terminal de Salto. La bóveda central se pretensa con 3 cables de 24 T (240 kN) y las bóvedas laterales con 4 cables cada una de 28 T (280 kN). Se modeliza con cables donde se encuentra dicho pretensado y se introduce su correspondiente carga con la extensión de Angle.

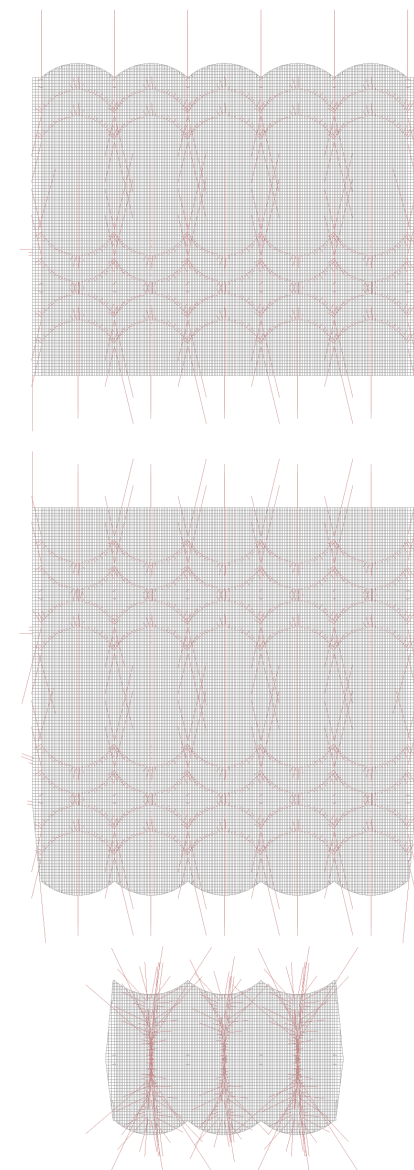


Fig. 68. | Esquema de pretensado. Fuente: *Elaboración propia*

6.5. Asignación de cargas.

Al finalizar el modelado de todos los elementos, evaluamos las cargas que actúan sobre la cubierta del edificio. Para ello, debemos prestar atención a lo establecido en el Código Técnico de la Edificación, el apartado Seguridad Estructural y Acciones de la Edificación (CTE SE-AE). Distinguiremos entre cargas permanentes y variables, y estas cargas las introduciremos con la extensión de Angle sobre las cubiertas.

6.5.1. Cargas permanentes.

Las cargas permanentes son aquellas que actúan en todo instante sobre el edificio con posición constante. En estas cargas pueden ser constantes como es el caso del peso propio de las cubiertas sin tabiquería ni solado, o no como es el caso de las acciones reológicas o el pretensado. (CTE SE-AE, 2009)

Esta se asigna directamente al aplicar los distintos materiales con la aplicación de Angle ya que se conoce la densidad y el espesor del material. En cuanto al pretensado, como se ha explicado anteriormente, son cables de 178 kN, 240 kN y 280 kN dependiendo de la posición de estos. (CTE SE-AE, 2009)

6.5.2. Cargas variables.

Las cargas variables no siempre están presentes a lo largo de la vida útil de los edificios. En este caso distinguiremos entre sobrecarga de uso, de viento (acciones climáticas). Dada la altitud de Juanicó (44 metros) no se ha considerado la carga de nieve.

- **Sobrecarga de uso.**

Según el CTE de Seguridad Estructural y Acciones de la Edificación, la tabla 3.1. vamos a tomar la subcategoría de uso G1 -cubiertas con inclinación inferior a 20 °- ya que se trata de una cubierta accesible únicamente para conservación y por lo tanto el valor de carga uniforme es de 1 KN/m².(Romera, 2021)

Al ser una cubierta definida por la función de catenaria, debemos determinar según su inclinación si estamos en la zona G1 o G2: la zona G1 donde la inclinación es inferior a 20° se le asignará una carga de 1 KN/m2 y la zona G2 donde la inclinación es superior a 40° se le asignará una carga de 0 KN/m2. También hay un tercer caso y es cuando la cubierta se sitúa entre los 20° y los 40°, es decir, entre G1 y G2, y para estos casos se asignará una carga de 0,5 KN/m2. (Romera, 2021)

La función de una catenaria según el Excel realizado es la siguiente:

$$[y = a \cdot \cosh \cdot (x/a) - a + F]$$

y: punto en el eje de ordenadas

x: punto en el eje de abscisas

a: variable dependiente de las dos variables anteriores

F: flecha máxima

Para el cálculo de los límites de la carga de sobrecarga de uso, se ha tomado de referencia los cálculos realizados por David Romera en su Trabajo de Fin de Grado. Obtenemos el valor "a" mediante aproximaciones realizadas con el programa Excel para el punto (0,0001; 4,20) que coincide con el vértice de la función y su valor es de a=-5,261. La función que define nuestra catenaria es la siguiente:

$$[y = -5,261 \cdot \cosh \cdot (x/-5,261) + 5,261 + 4,20]$$

Para sacar los puntos donde actúa cada tipo de carga, procedemos a sacar dichos puntos mediante la derivada de la función anterior. Esta derivada de la función anterior es igual a la tg(20°) y a la tg(40°):

$$[y' = -\sinh (x/5,261)]$$

Se va a proceder a sacar donde actúa cada tipo de carga en la bóveda:

El punto a partir del cual se considerará cubierta de 40° es el de tg(40°)= 0,839 → x= -4,013

El punto a partir del cual se considerará cubierta de 20° es el de tg(20°)= 0,36397 → x= -1,875

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

(1) Deben descomponerse en dos cargas concentradas de 10 kN separadas entre sí 1,8 m. Alternativamente dichas cargas se podrán sustituir por una sobrecarga uniformemente distribuida en la totalidad de la zona de 3,0 kN/m² para el cálculo de elementos secundarios, como nervios o viguetas, doblemente apoyados, de 2,0 kN/m² para el de losas, forjados reticulados o nervios de forjados continuos, y de 1,0 kN/m² para el de elementos primarios como vigas, ábacos de soportes, soportes o zapatas.
 (2) En cubiertas transitables de uso público, el valor es el correspondiente al uso de la zona desde la cual se accede.
 (3) Para cubiertas con un inclinación entre 20° y 40°, el valor de q_s se determina por interpolación lineal entre los valores correspondientes a las subcategorías G1 y G2.
 (4) El valor indicado se refiere a la proyección horizontal de la superficie de la cubierta.
 (5) Se entiende por cubierta ligera aquella cuya carga permanente debida únicamente a su cerramiento no excede de 1 kN/m².
 (6) Se puede adoptar un área tributaria interior a la total de la cubierta, no menor que 10 m² y situada en la parte más desfavorable de la misma, siempre que la solución adoptada figure en el plan de mantenimiento del edificio.
 (7) Esta sobrecarga de uso no se considera concomitante con el resto de acciones variables.

Fig. 69. | Tabla 3.1. | Valores característicos de las sobrecargas de uso.

Fuente: CTE DB SE-AE

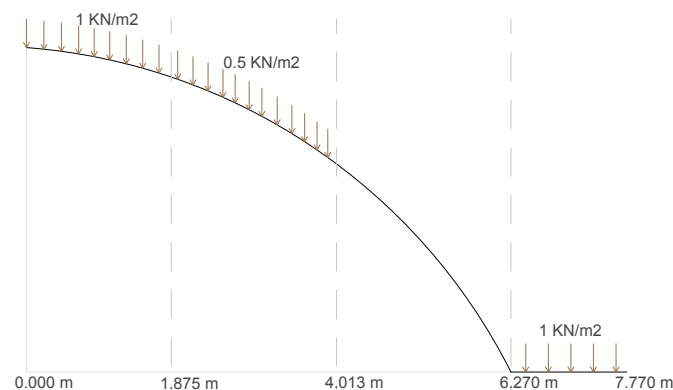


Fig. 70. | Esquema de sobrecarga de uso. Fuente: Elaboración propia

- **Sobrecarga de viento.**

La acción de viento o cualquier fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto o presión estática, q_e , se puede expresar de la siguiente forma:

$$[q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p]$$

- Presión dinámica el viento. q_e

Adoptamos $q_e = 0,5 \text{ KN/m}^2$ de forma simplificada.

- Coeficiente de exposición. c_e

Variable con la altura del punto considerado, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra la edificación. Se determina de acuerdo con lo establecido en el punto 3.3.3. tabla 3.4. del CTE DB SE-AE.

En nuestro caso se trata de un terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia (grado II) y una altura desde los 6 m hasta 10,15 m. Para los 6 m $c_e = 2,5$ y para los 10,15 $c_e = 2,7$.

- Coeficiente de presión. C_p

Dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento y de la situación del punto respecto a los bordes de esa superficie. Se determina de acuerdo con lo establecido en el anejo D del CTE DB SE-AE.

Dirección transversal (HIP04, HIP05)

Según el CTE DB SE-AE tabla D.9. la cubierta de la nave principal de la Fábrica Domingo Massaro está formada por 5 bóvedas, por lo tanto, se trata de una cubierta múltiple y hay una reducción del coeficiente de presión.

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Fig. 71. | Tabla 3.4. | Valores del coeficiente de exposición. Fuente: CTE DB SE-AE

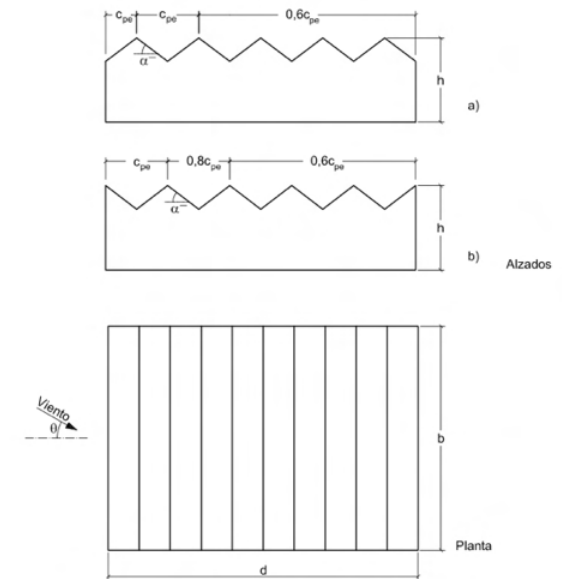


Fig. 72. | Tabla D.9. | Cubiertas múltiples. Fuente: CTE DB SE-AE

Debemos saber cuál es el valor del coeficiente de presión de la primera bóveda y para ello recurrimos al CTE DB SE-AE tabla D.12. cubierta cilíndrica. Se va a proceder a dividir la cubierta en tres zonas: A,B y C.

$$f/d = 4,2/12,7 = 0,331; g/d = 6/12,7 = 0,472 < 0,5$$

Con estos valores entramos en grafica correspondiente y obtenemos:

$$c_{p,A} = 0,55; c_{p,B} = -1,05; c_{p,C} = -0,4$$

Por lo tanto, para HIP04 y HIP05 para la dirección de viento E-W:

Zona A: $q_e = 0,69 \text{ KN/m}^2$; Zona B: $q_e = -1,42 \text{ KN/m}^2$; Zona C: $q_e = -0,5 \text{ KN/m}^2$

Dirección longitudinal (HIP06, HIP07)

Para calcular la sobrecarga de viento en la dirección longitudinal de la bóveda se va a proceder con la tabla D.10. marquesina a un agua. En este caso se debe distinguir entre fuerzas hacia arriba y fuerzas hacia abajo para las zonas A, B y C. La pendiente de α es de 10° . Para las fuerzas hacia abajo se va a tomar un factor de obstrucción entre 0 y 1; y en el caso de las fuerzas hacia arriba se hará una media aritmética de los 2 valores existentes dependiendo de la zona.

En esta dirección la cubierta es simétrica, por lo tanto, los valores son iguales en ambos lados. Además, aclaramos que la zona B es la que pertenece a las vigas laterales mientras que las zonas A y C son la bóveda.

Por lo tanto, para HIP06 y HIP07 para la dirección de viento N-S:

- Sentido descendente:

Zona A: $q_e = 0,68 \text{ KN/m}^2$; Zona B: $q_e = 2,25 \text{ KN/m}^2$; Zona C: $q_e = 1,485 \text{ KN/m}^2$

- Sentido ascendente:

Zona A: $q_e = -1,78 \text{ KN/m}^2$; Zona B: $q_e = -2,13 \text{ KN/m}^2$; Zona C: $q_e = -2,754 \text{ KN/m}^2$

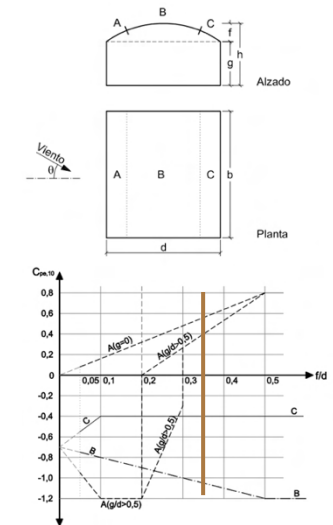
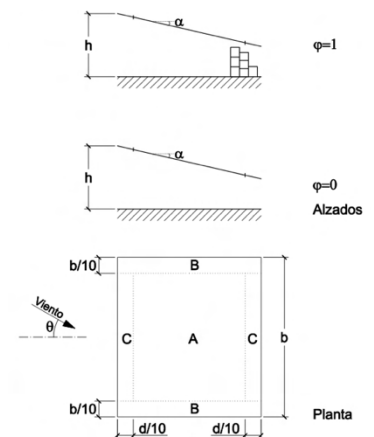


Fig. 73. | Tabla D.12. | Cubiertas cilíndricas. Fuente: CTE DB SE-AE



		Coeficientes de presión exterior			
		$c_{p,10}$			
Pendiente de la cubierta α	Efecto del viento hacia	Factor de obstrucción φ	Zona (según figura)		
			A	B	C
0°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	0,5	1,8	1,1
	Arriba	0	-0,6	-1,3	-1,4
	Arriba	1	-1,5	-1,8	-2,2

Fig. 74. | Tabla D.10. | Marquesina a un agua. Fuente: CTE DB SE-AE

Viento 1
W-E/E-W

1° bóveda						
Zonas	Ámbito	Cpe	Ce	qb	qe	
A	2,645	0,45	2,5	0,5	0,56	
B	7,41	-1,05	2,7	0,5	-1,42	
C	2,645	-0,4	2,5	0,5	-0,5	

2° bóveda						
Zonas	Ámbito	Cpe	Ce	qb	Coef.	qe
A	2,5	0,45	2,5	0,5	1	0,56
B1	3,705	-1,05	2,7	0,5	1	-1,42
B2	3,705	-1,05	2,7	0,5	0,6	-0,85
C	2,5	-0,4	2,5	0,5	0,6	-0,30

3-4-5° bóveda						
Zonas	Ámbito	Cpe	Ce	qb	Coef.	qe
A	2,5	0,45	2,5	0,5	0,6	0,34
B1	2,47	-1,05	2,7	0,5	0,6	-0,85
B2	2,47	-1,05	2,7	0,5	0,6	-0,85
B3	2,47	-1,05	2,7	0,5	0,6	-0,85
C	2,5	-0,4	2,5	0,5	0,6	-0,30

Fig. 75. | Viento dirección W-E/E-W. Fuente: *Elaboración propia*

Viento 2
N-S/S-N

efecto de viento	factor de obstruccion	zonas (cp)		
		A	B	C
abajo	$0 \leq x \leq 1$	0,5	1,8	1,1
arriba	$0 \leq x \leq 1$	-1,32	-1,7	-2,04

Las 5 bóvedas -abajo						
Zonas	Ámbito	Cpe	Ce	qb	qe	
A		0,5	2,7	0,5	0,68	
B		1,8	2,5	0,5	2,25	
C		1,1	2,7	0,5	1,485	

Las 5 bóvedas -arriba						
Zonas	Ámbito	Cpe	Ce	qb	qe	
A		-1,32	2,7	0,5	-1,78	
B		-1,7	2,5	0,5	-2,13	
C		-2,04	2,7	0,5	-2,754	

Ámbito			
	FASE 1	FASE 2	FASE 3
A= d-2B	50,89	63,89	19,2
B= b/10	1,27	1,27	1,27
C= d/10	5,343	6,643	2,4

d=	53,43 m	66,43 m	24 m
b=	12,7 m	12,7 m	12,7 m

Fig. 76. | Viento dirección N-S/S-N. Fuente: *Elaboración propia*

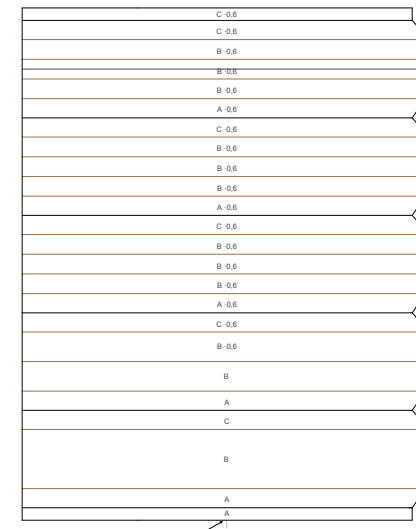


Fig. 77. | Esquema viento dirección W-E/E-W. Fuente: *Elaboración propia*

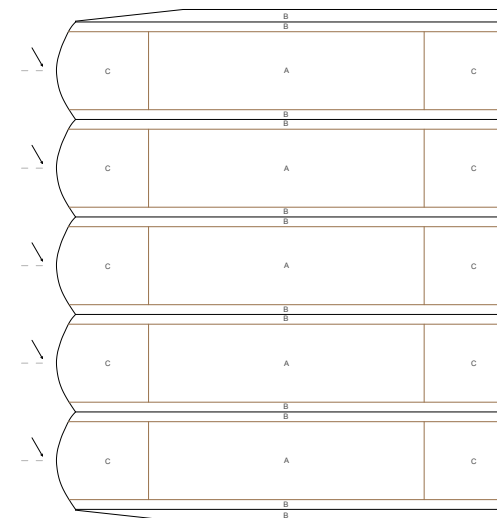


Fig. 78. | Esquema viento dirección N-S/S-N. Fuente: *Elaboración propia*

6.6. Hipótesis de cargas.

Hipótesis 1 (HIP01):	carga permanente, peso propio
Hipótesis 2 (HIP02):	carga variable, sobrecarga de uso cubierta
Hipótesis 4,5,6,7(HIP04, HIP05, HIP06, HIP07):	carga variable, sobrecarga de viento
Hipótesis 11 (HIP11):	carga permanente, pretensado

6.7. Combinación de cargas.

Para comprobar que nuestra estructura es resistente a las cargas anteriormente calculadas, se deben realizar una serie de combinaciones para comprobar que no supera ni los estado límites de servicio ni los estados limite últimos. Estas combinaciones se deducen a partir de las fórmulas expuestas en el CTE DB SE con sus correspondientes coeficientes.

Tanto los coeficientes parciales de seguridad como los coeficientes de simultaneidad se pueden sacar de las tablas 4.1. y tabla 4.2., respectivamente.

A continuación se procede a explicar en qué consisten los dos tipos de estados limites:

- Estados Limite Últimos (ELU).

Los estados límite último son los que, al superarse, suponen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta en servicio del edificio o el colapso total o parcial de este. Se produce una pérdida de equilibrio del edificio o hay fallos por deformación excesiva. (CTE SE-AE, 2009)

El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a una situación persistente o transitoria, se puede determinar a partir de la siguiente expresión (CTE SE-AE, 2009):

$$[\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}]$$

	HIP_01	HIP_02	HIP_04	HIP_05	HIP_06	HIP_07	HIP_11
Carga perm.	1,35	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1
ψ0	1	0	0,6	0,6	0,6	0,6	1
ψ1	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1
ψ2	1	0	0	0	0	0	1

Fig. 79. | Hipótesis de carga. Fuente: *Elaboración propia*

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente	1,35	0,80
	Peso propio, peso del terreno		
	Empuje del terreno		
	Presión del agua	1,20	0,90
Variable	1,50	0	
		desestabilizadora	estabilizadora
Estabilidad	Permanente	1,10	0,90
	Peso propio, peso del terreno		
	Empuje del terreno		
	Presión del agua	1,05	0,95
Variable	1,50	0	

⁽¹⁾ Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Fig. 80. | Tabla 4.1. | Coeficientes seguridad. Fuente: *CTE DB SE*

	ψ ₀	ψ ₁	ψ ₂
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas(Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		⁽¹⁾	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

⁽¹⁾ En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Fig. 81. | Tabla 4.2. | Coeficientes de simultaneidad. Fuente: *CTE DB SE*

ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS (ELU)		HIP_01	HIP_02	HIP_04	HIP_05	HIP_06	HIP_07	HIP_11
ELU 01	Gravitatorias	1,35	1,5					1
ELU 02		1,35	0					1
ELU 03	Perm. + Uso Cubierta Princ.	1,35	1,5	0,9				1
ELU 04		1,35	1,5		0,9			1
ELU 05		1,35	1,5			0,9		1
ELU 06		1,35	1,5				0,9	1
ELU 07	Perm. Viento W-E Princ.	1,35	0	1,5				1
ELU 08	Perm. Viento E-W Princ.	1,35	0		1,5			1
ELU 09	Perm. Viento N-S Princ.	1,35	0			1,5		1
ELU 10	Perm. Viento S-N Princ.	1,35	0				1,5	1

Fig. 82. | Estados límite últimos (ELU). Fuente: *Elaboración propia*

- Estados Limite de Servicio (ELS).

Los estados límite de servicio son los que, al superarse, afectan al confort de los usuarios, al correcto funcionamiento del edificio o a la apariencia del mismo. Estos estados limite pueden ser reversibles o no. Se supera este estado cuando las deformaciones afectan a la apariencia de la obra, cuando hay vibraciones excesivas que afectan al confort del usuario o los daños afectan a la durabilidad del edificio. En este caso, los ELS son favorables y no influyen. (CTE SE-AE, 2009)

Los efectos de cálculo debido a las acciones de corta duración que pueden resultar irreversibles, se determinan mediante combinaciones de acciones, de tipo característica y se pueden determinar a partir de la siguiente expresión (CTE SE-AE, 2009):

$$[\sum G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}]$$

ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO (ELS)		HIP_01	HIP_02	HIP_04	HIP_05	HIP_06	HIP_07	HIP_11
ELS 01	Característica 1 (uso princ.)	1	1	0,5				1
ELS 02		1	1		0,5			1
ELS 03		1	1			0,5		1
ELS 04		1	1				0,5	1
ELS 05	Característica 3 (viento princ.)	1	0	1				1
ELS 06		1	0		1			1
ELS 07		1	0			1		1
ELS 08		1	0				1	1
ELS 09	Frecuente 1 (uso princ.)	1	0	0	0	0	0	1
ELS 10	Frecuente 3 (viento princ.)	1	0	0,5				1
ELS 11		1	0		0,5			1
ELS 12		1	0			0,5		1
ELS 13		1	0				0,5	1
ELS 14	Casi permanente	1	0	0	0	0	0	1

Fig. 83. | Estados límite de servicio (ELS). Fuente: *Elaboración propia*

7. Análisis del comportamiento estructural.

Para analizar nuestra estructura, procederemos a dividir este análisis en dos partes: primero estudiaremos los efectos causados por el peso propio, cargas gravitatorias y sobrecarga de uso y en segundo lugar añadiremos la carga de viento para observar cómo funciona nuestro edificio con todas las cargas combinadas. Nos fijaremos en los valores de las tensiones y de las deformaciones según las diferentes hipótesis.

Hasta este momento hemos creado materiales, hemos calculado y asignado las diferentes cargas y hemos asignado las diferentes combinaciones de carga tanto en estado límites últimos como en estados límite de servicio. Todo esto se ha realizado en Autocad con la pestaña de Angle cargada.

Tras exportar en Dxe nuestro modelo, procedemos a importarlo en el programa Angle. Tras importarlo, analizaremos los esfuerzos y deformaciones de nuestra estructura. Si seleccionamos la opción de isovalores podemos observar mediante colores muy visuales las zonas de tensiones y deformaciones.

7.1. Cargas gravitatorias.

Fase 1: Tensiones.

Como se ha definido anteriormente en la tabla de ELU, las cargas gravitatorias son las que corresponden con las hipótesis ELU01 y ELU02.

- Dirección longitudinal (Sx).

En la dirección longitudinal de la bóveda hemos escogido la hipótesis ELU01 al ser esta la más desfavorable. Esto se debe a que en este caso se tienen en cuenta las cargas permanentes y las sobrecargas de uso.

Como podemos observar en la figura, todas las bóvedas trabajan a compresión. Los valores máximos de este tipo de tensiones aparecen en las zonas donde se ubican los soportes de la estructura más cercanos al vuelo de mayor tamaño. Dichas tensiones alcanzan valores máximos de -30,97 MPa.

Las únicas tracciones del conjunto aparecen en las aletas laterales, concretamente en las partes aledañas a los soportes anteriormente mencionados. Esto se debe a la función de rigidización que cumplen dichas vigas laterales. Se alcanzan valores máximos de tracción de 19,32 MPa.

- Dirección transversal (S_y).

Del mismo modo que en el caso anterior, en la dirección transversal de las bóvedas elegiremos también la hipótesis ELU01, ya que por el mismo motivo que hemos mencionado anteriormente, será considerada la más desfavorable.

Una vez más, todas las bóvedas trabajan a compresión, pero en este caso las tensiones son menores, por lo que el comportamiento es mejor que en la dirección longitudinal. En este caso se aprecian con mayor claridad las zonas en las que se ha colocado el pretensado, ya que las tracciones son menores en dichos puntos. El valor de las compresiones máximas que se dan es de -25,30 MPa.

- Tensiones principales.

Volvemos a tomar la hipótesis más desfavorable, ELU01 de nuevo, y analizamos las tensiones que aparecen en las bóvedas. Las tensiones de tracción máximas, S_I , aparecen en los bordes de las aletas aledañas a los apoyos de la estructura, en la parte con vuelo de mayor longitud. Esto es muy similar a lo que ocurría en el caso de las tensiones en el eje longitudinal. El valor máximo es de 19,32 MPa.

Las tensiones de compresión, S_{II} , aparecen en el resto del conjunto, adoptando valores más notables en los puntos cercanos a los apoyos. El valor máximo de dichas tensiones es de -36,86 MPa, valor muy similar a las tensiones en el eje longitudinal de la bóveda una vez más.

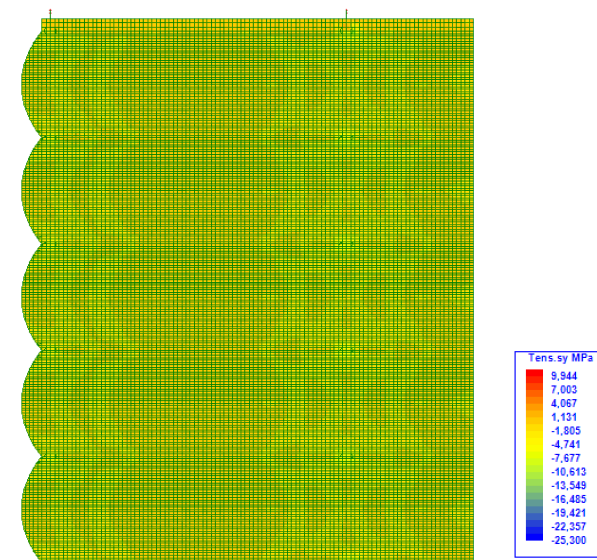


Fig. 84. I Fase 1. Tensiones S_y . ELU01. Fuente: *Elaboración propia*

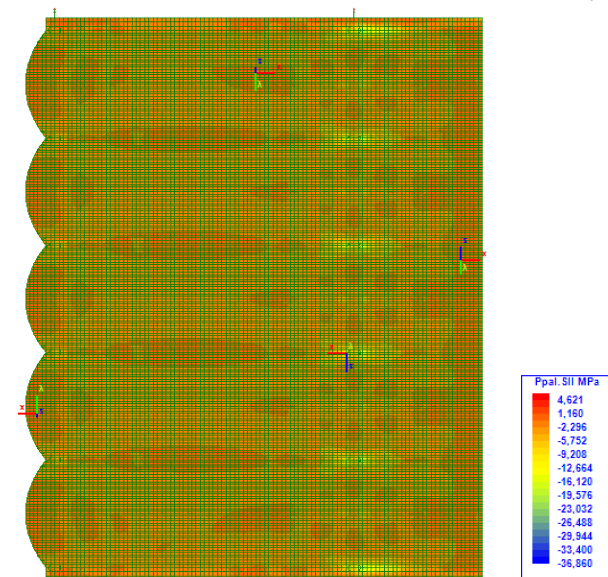


Fig. 85. I Fase 1. Tensiones S_{II} . ELU01. Fuente: *Elaboración propia*

Fase 1: Deformaciones.

Se pueden apreciar deformaciones considerables en la parte del voladizo de mayor dimensión, sobre todo en las partes exteriores de las bóvedas laterales, con un descenso máximo de 6,14 cm. Por el contrario, en la zona de los muros portantes dichas deformaciones adoptan valores prácticamente nulos. Estas deformaciones se asemejan considerablemente a los estudiados en la Fábrica Fagar. Esto se debe a que ambas estructuras son muy similares.

Fase 2: Tensiones .

Como se ha definido anteriormente en la tabla de ELU, las cargas gravitatorias son las que corresponden con las hipótesis ELU01 y ELU02.

- Dirección longitudinal (Sx).

En la dirección longitudinal de la bóveda volvemos a escoger la hipótesis ELU01, siendo esta la más desfavorable. Todas las bóvedas trabajan a compresión. Los valores máximos de este tipo de tensiones aparecen en las zonas donde se ubican los soportes de la estructura. Dichas tensiones alcanzan valores máximos de -30,55 MPa, muy similares a los comentados en la Fase 1.

Las únicas tracciones del conjunto aparecen en las aletas laterales, concretamente en las partes aledañas a los soportes anteriormente mencionados. Esto se debe a la función de rigidización que cumplen dichas vigas laterales. Se alcanzan valores máximos de tracción de 22,38 MPa.

- Dirección transversal (Sy).

Volvemos a escoger la hipótesis ELU01. Una vez más, todas las bóvedas trabajan a compresión, pero en este caso las tensiones son menores, por lo que el comportamiento es mejor que en la dirección longitudinal. Volvemos a apreciar con mayor claridad las zonas en las que se ha colocado el pretensado, ya que las tracciones son menores en dichos puntos. El valor de las compresiones máximas que se dan es de -25,77 MPa.

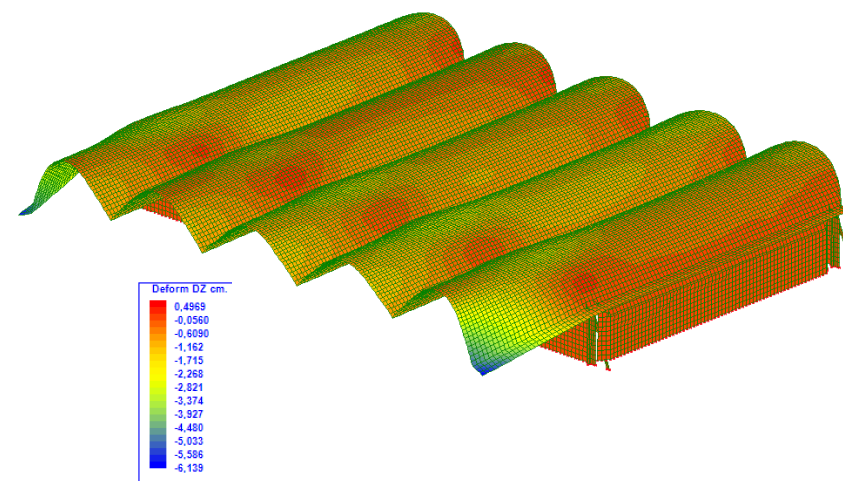


Fig. 86. | Fase 1. Deformaciones Dz. ELS14. Fuente: *Elaboración propia*

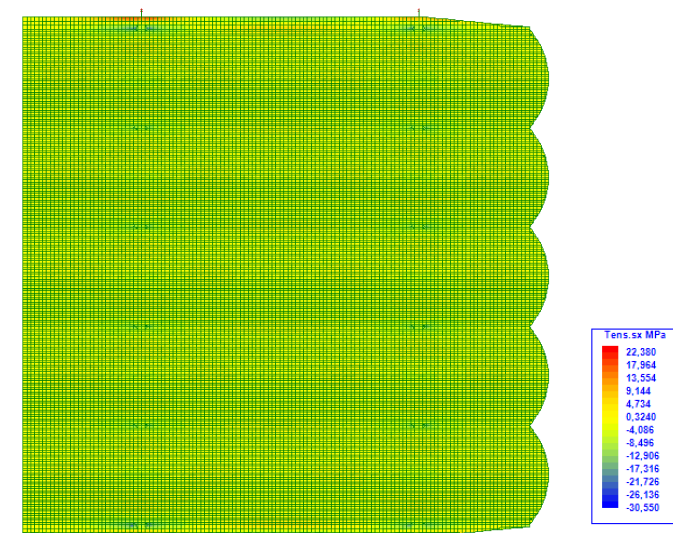


Fig. 87. | Fase 2. Tensiones Sx. ELU01. Fuente: *Elaboración propia*

- Tensiones principales.

Con la hipótesis ELU01 de nuevo, analizamos las tensiones que aparecen en las bóvedas. Las tensiones de tracción máximas, S_I , aparecen en los bordes de las aletas aledaños a los apoyos de la estructura. Esto es muy similar a lo que ocurría en el caso de las tensiones en el eje longitudinal. El valor máximo es de 22,38 MPa.

Las tensiones de compresión, S_{II} , aparecen en el resto del conjunto, adoptando valores más notables en los puntos cercanos a los apoyos. El valor máximo de dichas tensiones es de -36,57 MPa, valor muy similar a las tensiones en el eje longitudinal de la bóveda una vez más.

Fase 2: Deformaciones.

Se pueden apreciar deformaciones considerables en los extremos de los vuelos y en el vano entre los apoyos. El descenso más pronunciado es de 6,10 cm. Por el contrario, en la zona de los apoyos dichas deformaciones adoptan valores prácticamente nulos. Estas deformaciones se asemejan considerablemente a los estudiados en la Fábrica Fagar.

7.2. Todas las cargas.

Fase 1: Tensiones.

En este supuesto, tomaremos las cargas referentes al viento junto con las del apartado anterior. Estudiaremos por ende los casos desde ELU03 a ELU10.

- Dirección longitudinal (S_x).

Al analizar las distribuciones de tensiones en el sentido longitudinal de las bóvedas y con una carga de viento en su misma dirección, podemos apreciar que la variación respecto a la distribución en el mismo caso pero sin carga de viento es muy similar.

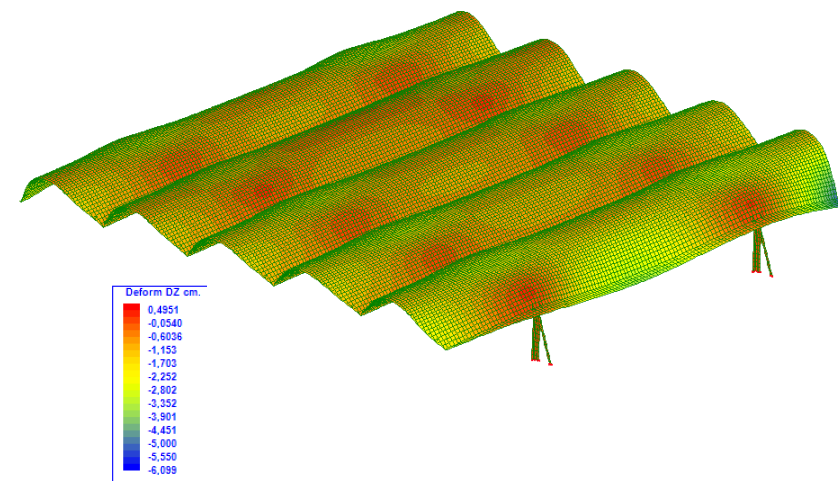


Fig. 88. | Fase 2. Deformaciones Dz. ELS14. Fuente: *Elaboración propia*

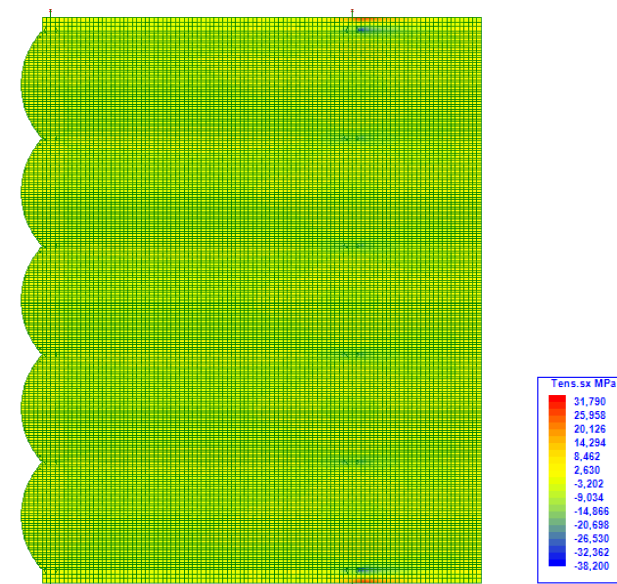


Fig. 89. | Fase 1. Tensiones S_x . ELU09. Fuente: *Elaboración propia*

En la combinación ELU09, con la carga de viento hacia abajo, se mejoran las compresiones en el centro de las bóvedas, pero esto provoca que las tensiones se concentren en los apoyos de la estructura, llegando a tener tensiones de compresión de -38,20 MPa en el caso más desfavorable.

En la ELU10, la dirección del viento cambia y va hacia arriba. Por ende, las tensiones de compresión no se concentran tanto en los apoyos y mejora la distribución a lo largo de la estructura. Los valores de tensión máximos serán de -13 MPa.

- Dirección transversal (Sy).

En la dirección transversal de las bóvedas, el comportamiento de las bóvedas mejora mínimamente respecto al caso anterior.

En la combinación ELU09, las tensiones de compresión vuelven a concentrarse en los puntos de apoyo, llegando a valores de -37,94 MPa. Esto confirma que es la peor de las combinaciones en este sentido también.

En la ELU10, con el viento hacia arriba, las tensiones se distribuyen por toda la bóveda de manera más uniforme. Los valores máximos de tensiones de compresión son de -7,31 MPa.

Fase 1: Deformaciones.

Se analizan las deformaciones de la estructura con la carga de viento aplicada en todas las direcciones posibles.

En la combinación ELS08, el viento se aplica hacia arriba y de sur a norte. Las deformaciones máximas en este supuesto serían de -0,91 cm en el eje z y se situarían en la parte superior de las bóvedas.

Por el contrario, en la combinación ELS12, el viento se aplica hacia abajo y en sentido norte-sur. Las deformaciones alcanzan valores de 14,10 cm en sentido descendente, dándose en el extremo de los voladizos laterales y constituyendo así el supuesto más desfavorable.

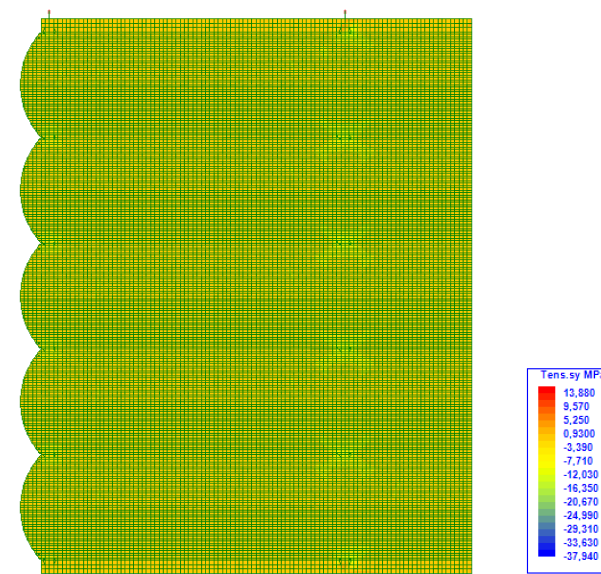


Fig. 90. I Fase 1. Tensiones Sy. ELU09. Fuente: *Elaboración propia*

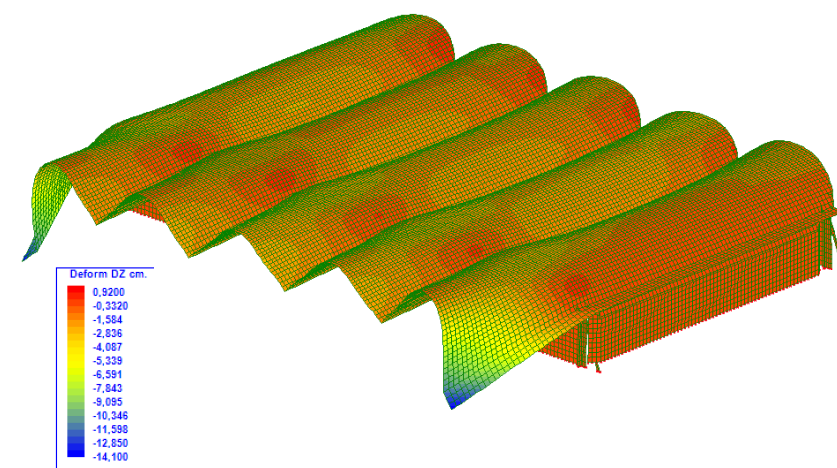


Fig. 91. I Fase 1. Deformaciones Dz. ELS12. Fuente: *Elaboración propia*

Fase 2: Tensiones.

Volveremos a tomar los casos desde ELU03 a ELU10 para estudiar la segunda fase de nuestro edificio.

- Dirección longitudinal (Sx).

Al analizar las distribuciones de tensiones en el sentido longitudinal de las bóvedas y con una carga de viento en su misma dirección, podemos apreciar que la variación respecto a la distribución en el mismo caso pero sin carga de viento vuelve a ser muy similar.

En la combinación ELU09, se mejoran nuevamente las compresiones en el centro de las bóvedas, pero vuelven a concentrarse tensiones en los apoyos de la estructura, llegando a tener tensiones de compresión de -40,99 MPa en el caso más desfavorable.

En la ELU10, las tensiones de compresión no se concentran tanto en los apoyos y mejora la distribución a lo largo de la estructura. Los valores de tensión máximos serán de -17,20 MPa.

- Dirección transversal (Sy).

En la dirección transversal de las bóvedas, el comportamiento de las bóvedas mejora mínimamente respecto al caso anterior de nuevo. En la combinación ELU09, las tensiones de compresión vuelven a concentrarse en los puntos de apoyo, llegando a valores de -30,22 MPa. Por tanto, vuelve a ser la combinación menos favorable.

En la ELU10, las tensiones se distribuyen por toda la bóveda de manera más uniforme. Los valores máximos de tensiones de compresión son de -16,86 MPa, asemejándose mucho a las tensiones en el eje x.

Fase 2: Deformaciones.

Se analizan de nuevo las deformaciones de la estructura con la carga de viento aplicada en todas las direcciones posibles.

Análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro de Eladio Dieste: cerámica armada.

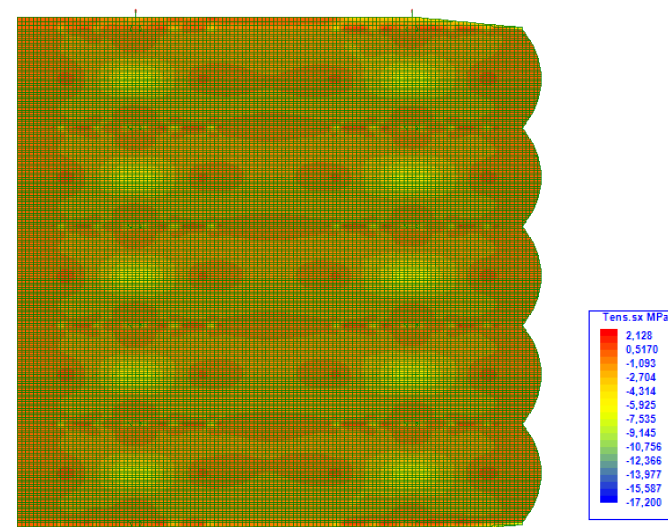


Fig. 92. I Fase 2. Tensiones Sx. ELU10. Fuente: *Elaboración propia*

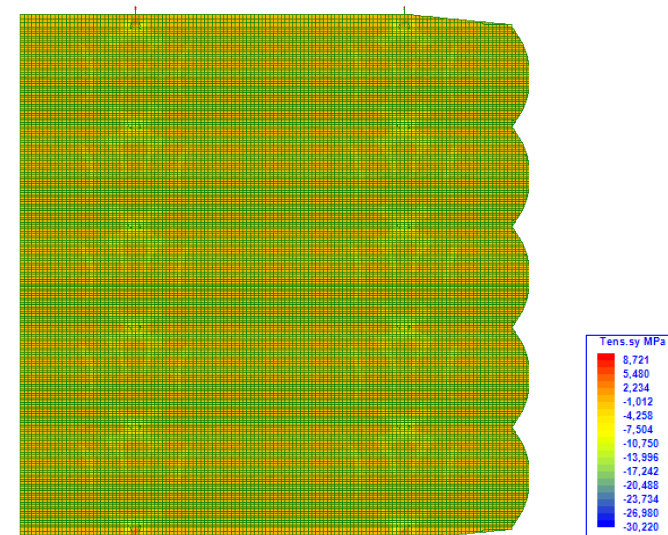


Fig. 93. I Fase 2. Tensiones Sy. ELU09. Fuente: *Elaboración propia*

En la combinación ELS08, el viento se aplica hacia arriba y de sur a norte. Las deformaciones máximas en este supuesto serían de 2 cm en el eje z y se situarían en el extremo del voladizo lateral de la estructura. En sentido negativo, se dan deformaciones de 0,98 cm en el centro de las bóvedas, en la zona entre los apoyos.

En la combinación ELS07, el viento se aplica hacia abajo y en sentido norte-sur. Las deformaciones alcanzan valores de 10,53 cm en sentido descendente, dándose en el extremo de los voladizos laterales y constituyendo en este caso el supuesto más desfavorable.

7.3. Fase 1 sin muros portantes ni diafragmas.

En este caso analizaremos la fase 1 sin muros y sin diafragmas para observar cómo influyen tanto en las tensiones como en las deformaciones. En ambos casos nos centraremos en las combinaciones donde actúa el viento y donde resulta ser más desfavorable.

- Dirección longitudinal (sx).

Como se puede observar, las tensiones en esta dirección aumentan considerablemente respecto a la estructura con muros portantes y diafragmas. Analizaremos la estructura con la combinación ELU09 ya que esta combinación es la que posee los valores máximos, tanto de compresión en la zona de apoyos como de tracción en el extremo de las aletas, zona próxima a los apoyos.

Recordamos que en la ELU09 el viento tiene sentido descendente, lo cual mejora las compresiones las bóvedas pero concentra los máximos valores en los apoyos.

En el caso de la estructura con muros portantes y diafragmas, los valores máximos de compresión son de -38,2 MPA y los de tracción son de 31,8 MPA. Si eliminamos los muros portantes, las tensiones de compresión máximos disminuyen a -38 MPA pero las de tracción aumentan hasta 33 MPA. El último caso sería sin muros portantes y sin diafragmas, en este supuesto las tensiones de compresión máximas son de -39,7 MPA y las de tracción son de 34,63 MPA.

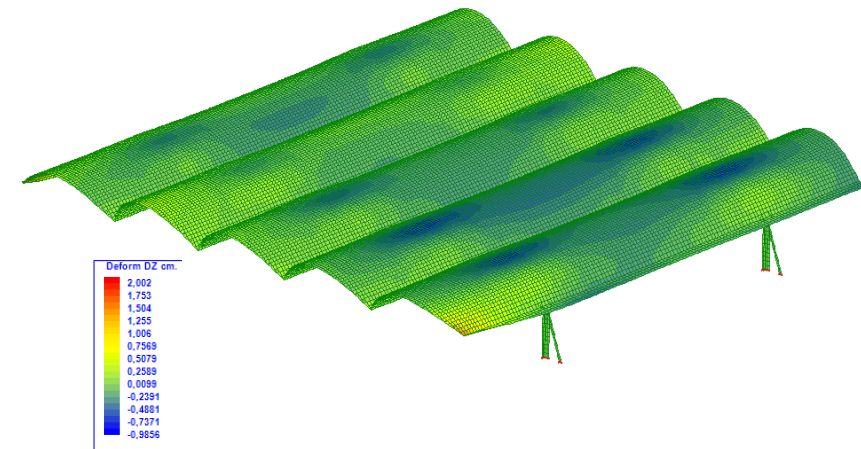


Fig. 94. | Fase 2. Deformaciones Dz. ELS08. Fuente: *Elaboración propia*

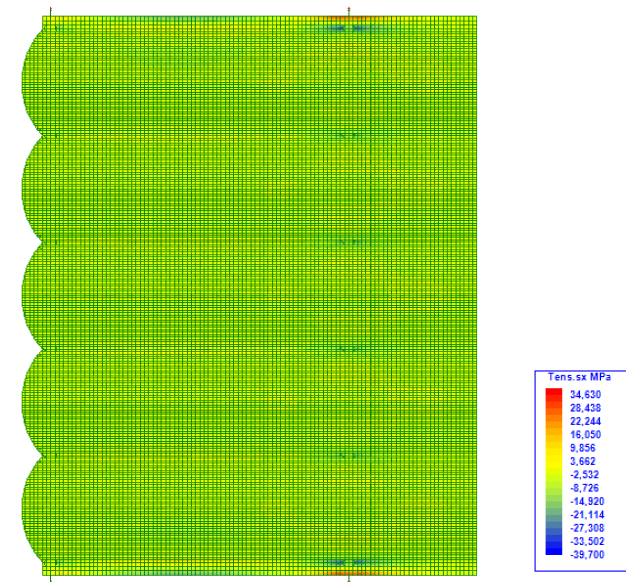


Fig. 95. | Fase 1 sin muros portantes ni diafragmas. Tensiones Sx. ELU09. Fuente: *Elaboración propia*

Como se puede deducir, tanto los muros portantes como los diafragmas ayudan en el comportamiento de la estructuras cuando el viento actúa en sentido descendente.

- Dirección transversal (sy).

Analizamos de nuevo el caso ELU09. Las tensiones máximas de tracción son ligeramente superiores cuando eliminamos los muros portantes y los diafragmas; y las compresiones máximas son ligeramente mayores.

- Deformaciones verticales (Dz).

Para el análisis de las deformaciones, estudiaremos la hipótesis 4 donde el viento tiene una dirección de este-oeste. las deformaciones máximas son de 0,99 cm en sentido descendente y se da en extremo de voladizo cuando la estructura cuenta con muros portantes y diafragmas.

A continuación, estudiaremos la hipótesis 6 donde el viento tiene una dirección de norte-sur. Las deformaciones máximas son de 5,31 cm en sentido descendente y se da en extremo de voladizo cuando la estructura cuenta con muros portantes y diafragmas .

- Deformaciones horizontales (Dy).

Estudiaremos ahora la hipótesis 4, donde el viento tiene una dirección de este-oeste. Las deformaciones máximas son de 1,28 cm en sentido descendente y se dan en extremo d voladizo y vano entre pilares cuando la estructura no cuenta con muros portantes y ni diafragmas.

También estudiaremos la hipótesis 6 donde el viento tiene una dirección de norte-sur. Las deformaciones máximas son de 3,41 cm tanto en sentido descendente como en ascendente y se da en extremo d voladizo y vano entre pilares cuando la estructura cuenta con muros portantes y diafragmas.

Los muros y diafragmas mejoran notablemente los desplazamientos laterales cuando el viento actúa en sentido transversal pero cuando el viento actúa en dirección longitudinal, no trabajan mucho ya que los encargados de absorber este viento son los pilares y la propia cubierta.

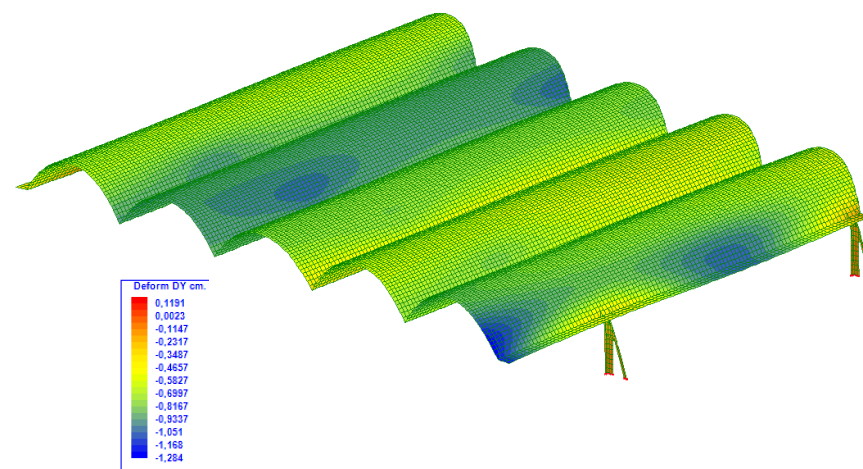


Fig. 96. I Fase 1 sin muros portantes ni diafragmas. Deformaciones Dy. HIP04. Fuente: *Elaboración propia*

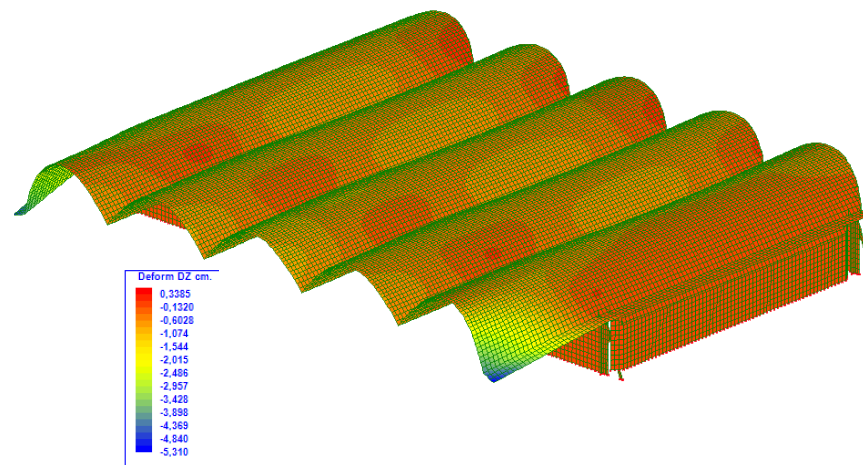


Fig. 97. I Fase 1. Deformaciones Dz. HIP06. Fuente: *Elaboración propia*

7.4. Fase 2 sin pretensado.

En este caso analizaremos la segunda fase sin pretensado para observar cómo influye este tanto en las tensiones como en las deformaciones. En ambos casos nos centraremos en las combinaciones donde actúa la carga permanente y las cargas de viento, y donde resulta ser más desfavorable.

Tensiones.

- Dirección longitudinal (sx).

Analizamos el caso ELU01, teniendo en cuenta solo las cargas gravitatorias. Tanto las tensiones máximas de tracción como las de compresión son ligeramente menores sin el pretensado. Por otro lado, la parte superior de las bóvedas sin los cables de pretensado tracciona, mientras que con la colocación de los mismos trabaja a compresión.

El caso ELU09 con pretensado y con el viento hacia abajo en dirección norte-sur, se reducen notablemente las tracciones en las zonas de coronación de las bóvedas, donde se sitúan los cables de pretensado. Además, las compresiones se concentran de manera más localizada en los puntos de apoyo de la estructura.

- Dirección transversal (sy).

Analizamos de nuevo el caso ELU01, teniendo en cuenta solo la carga permanente. Tanto las tensiones máximas de tracción como las de compresión son en este caso ligeramente menores con el pretensado. Con esto deducimos que el pretensado cumple mejor su función en este sentido.

Deformaciones.

Para el análisis de las deformaciones, estudiaremos el comportamiento desde los casos ELS01 a ELS14. Cuando solo se tienen en cuenta las cargas gravitatorias sin pretensado, las deformaciones máximas son de 7,20 cm en sentido descendente y en extremo de voladizo.

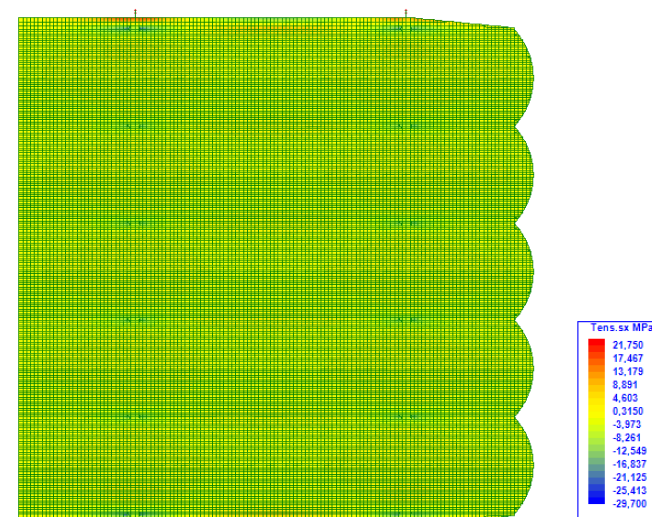


Fig. 98. I Fase 2 sin pretensado. Tensiones Sx. ELU01.
Fuente: *Elaboración propia*

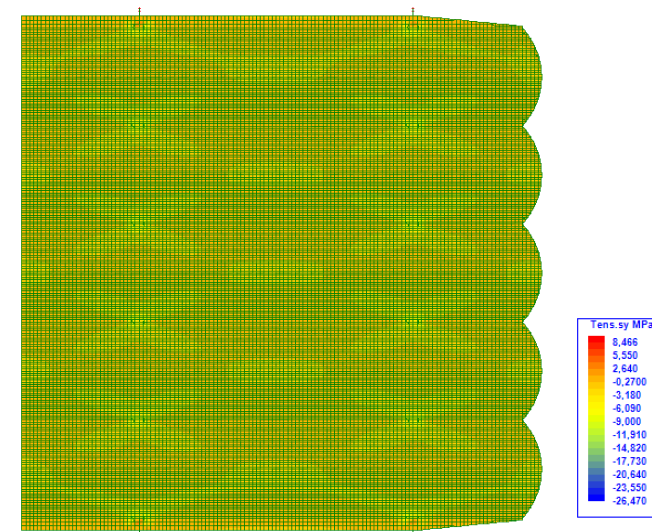


Fig. 99. I Fase 2 sin pretensado. Tensiones Sy. ELU01.
Fuente: *Elaboración propia*

Por otro lado, cuando introducimos las cargas de viento, la combinación que más deformaciones sufre es la ELS07, con viento en dirección descendente. El descenso máximo sufrido es de 10,16 cm y se da en el extremo de los voladizos laterales.

7.5. Comportamiento en fase 3.

Esta fase se asemeja a Terminal de Salto ya que se trata de unas bóvedas con doble vuelo, atirantadas a un cuerpo de oficinas (la Terminal de Salto esta atirantada a un forjado y a unos muros) y con un pretensado similar (cables en la cima de las bóvedas con forma de ochos).

Tensiones.

- Dirección longitudinal (sx).

Comenzamos nuestro análisis teniendo en cuenta solo las cargas gravitatorias, ELU01 y ELU02. La combinación más desfavorable en este caso sería la ELU01, donde contamos con las cargas permanentes, la sobrecarga de uso y el pretensado.

En esta dirección observamos que las cargas de compresión se concentran en los puntos de apoyo y en la zona superior de las bóvedas donde se han colocado los cables de pretensado, mientras que las zonas de máxima tracción se concentran en las vigas laterales, cerca de los apoyos.

Cuando introducimos las cargas de viento, observamos que la cubierta trabaja de manera óptima cuando el viento va en sentido descendente, ya que prácticamente toda la cubierta trabaja a compresión, excepto unas zonas traccionas que se encuentran en las aletas laterales aledañas a los soportes de hormigón.

En este caso, la combinación que más tracciones y compresiones tiene es la ELU09, viento nortesur con dirección descendente. El valor máximo de estas tracciones llega a los 20,63 MPa mientras que los soportes llegan a un máximo de tensiones de compresión de -22,86 MPa.

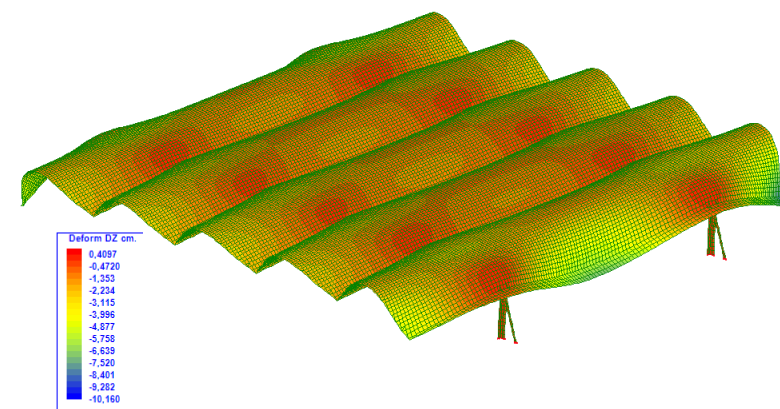


Fig. 100. | Fase 2 sin pretensado. Deformaciones Dz. ELS07. Fuente: *Elaboración propia*

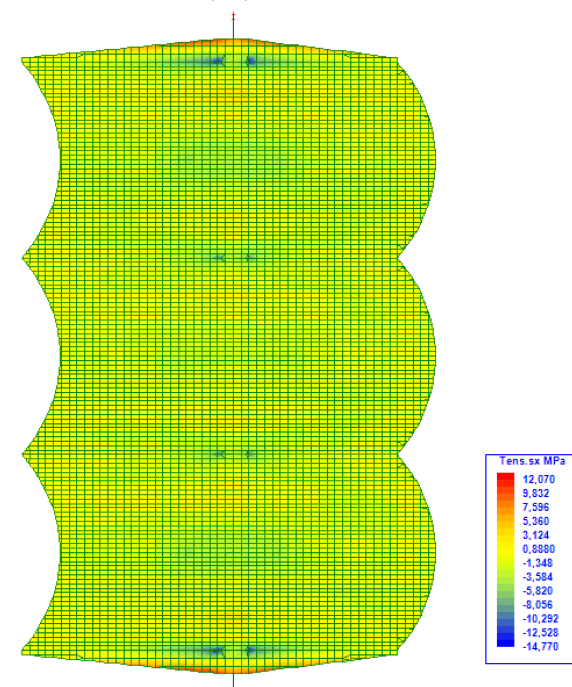


Fig. 101. | Fase 3. Tensiones Sx. ELU01. Fuente: *Elaboración propia*

- Dirección transversal (sy).

Podemos ver que en esta dirección hay una mejora tanto en las compresiones como en las tracciones. Cuando el viento actúa en sentido descendente, ELU09, observamos una mejora en las compresiones en el centro de las bóvedas y una concentración de tensiones de compresión en los apoyos con un máximo de -15,54 MPa.

Cuando el viento actúa en sentido ascendente, ELU10, no hay prácticamente concentración de tensiones de compresión en apoyos y la tensión en la cascara disminuye, siendo esto algo favorable.

Deformaciones.

Para el análisis de las deformaciones, estudiaremos el comportamiento desde los casos ELS01 a ELS14, donde se tienen en cuenta todo tipo de carga. La combinación donde menos deformaciones se producen es la ELS08, viento con dirección sur-norte y sentido ascendente. El descenso máximo en este caso es de -0,68 cm y se da en la zona superior de las cascara, sobre todo en las dos bóvedas laterales.

La combinación que más descenso produce es la ELS07, viento con dirección norte-sur y sentido descendente. Aunque el viento en esta dirección es favorable, las zonas de los voladizos extremos que no se encuentran atirantados al cuerpo de oficinas descienden hasta 8,45 cm.

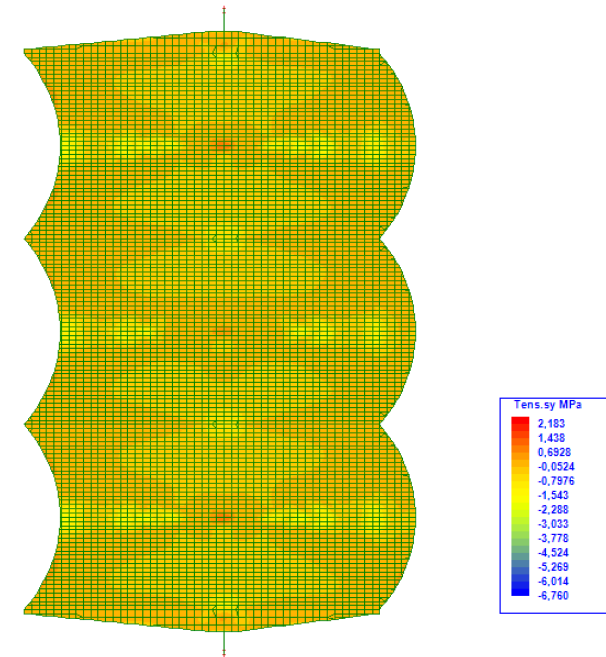


Fig. 102. | Fase 3. Tensiones Sy. ELU10. Fuente: *Elaboración propia*

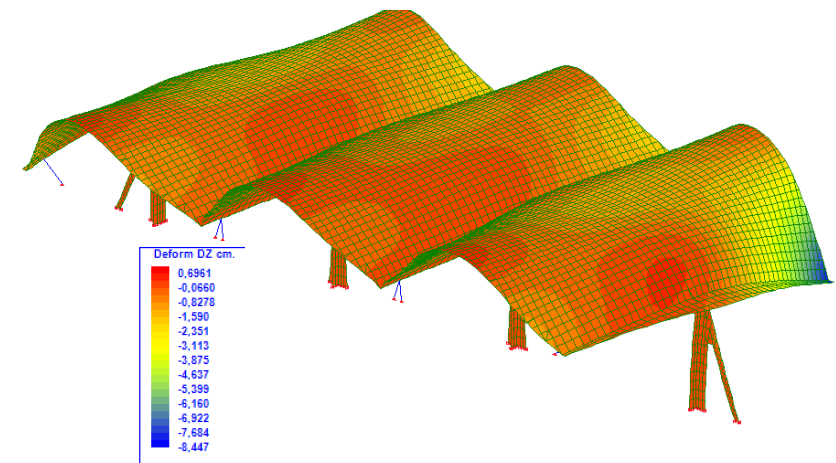


Fig. 103. | Fase 3. Deformaciones Dz. ELS07. Fuente: *Elaboración propia*

8. Objetivos del desarrollo sostenible.

Estudiada la obra de Dieste y dado que uno de los objetivos del Trabajo Final de Grado incluye un análisis de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se puede observar que la característica más reconocida de toda la obra de Dieste es la economía de ejecución de sus estructuras cerámicas.

En primer lugar, se puede establecer una relación directa con el objetivo 9, "industria, innovación e infraestructuras", ya que Dieste construye edificios fiables, sostenibles, resilientes y de calidad -meta 9.1-. La Fábrica Domingo Massaro en un principio iba a ser construida por otro arquitecto y seguramente no sería de ladrillo, por lo que se podría relacionar con la -meta 9.4- donde se expone la utilización de recursos de mayor eficacia y promover la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios.

El uso de cerámica armada permite el no uso de hormigón armado, lo cual reduce las emisiones de CO2 relacionado con el objetivo 13. El objetivo 12 -meta 12.2- donde se expone el uso eficiente de recursos naturales también se relaciona con el uso de cerámica.

Dieste fue un ingeniero que en muchas de sus obras incluía silos o tanques de agua para abastecer las infraestructuras. Esto lo podemos relacionar con el objetivo 6 -meta 6.5- donde se expone la implementación de gestión integrada de recursos hídricos a todos los niveles. En las obras de Dieste participaba una cantidad significativa de mano de obra que debía ser cualificada ya que era un trabajo muy cuidado y si no se ejecutaba de la forma correcta podría ser catastrófico.

Esto lo podemos relacionar con el objetivo 8 -meta 8.2- donde se pretende optimizar la productividad económica mediante la diversificación, centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra.

Con su obra arquitectónica se puede decir que Dieste fue un pionero en el desarrollo sostenible, ya que se adelantó a la noción social actual de abogar por el uso de materiales obtenidos de la naturaleza, en lugar de desperdiciarlos, y permitiendo su posterior reutilización ya que se pueden reciclar.



Fig.104 | Objetivos de desarrollo sostenible.
Fuente: Naciones Unidas

9. Conclusiones.

El objetivo principal de este trabajo es el análisis estructural de la Fábrica Domingo Massaro, obra realizada por Eladio Dieste en el año 1976 y ubicada en Juanicó. Para cumplir dicho objetivo, se ha realizado primeramente un profundo estudio sobre la vida de dicho autor, sus obras más emblemáticas y su relación con otros arquitectos importantes de la época.

Entre 1945 y 1975, Dieste comienza a utilizar dichas bóvedas con la técnica de la cerámica armada, poniendo así en valor materiales tradicionales como el ladrillo y el mampuesto. Esto le convierte en uno de los pioneros de la arquitectura sostenible.

Se ha estudiado la técnica de la cerámica armada en profundidad. Dieste empleaba el ladrillo en sus cubiertas en forma de bóvedas, que podían clasificarse en varios tipos en función de su tipo estructural. La Fábrica Domingo Massaro es un claro ejemplo de bóveda autoportante de directriz catenaria que descarga sobre elementos resistentes.

Un acontecimiento importante en la carrera de Dieste fue su relación profesional con Bonet ya que gracias al proyecto de la Casa Berliengieri consiguió plasmar sus conocimientos sobre la cerámica armada.

Centraremos el estudio en la Fábrica Domingo Massaro y su modelo estructural. Como se ha explicado anteriormente, el edificio está compuesto por una serie de bóvedas autoportantes de directriz catenaria. Es una estructura que carece de vigas y tímpanos, asemejándose a las soluciones estructurales metálicas.

Para comenzar nuestro análisis estructural, primero se ha modelado una bóveda con función catenaria con el programa de diseño Autocad, posteriormente a dicha bóveda se le han aplicado distintas situaciones para ver su comportamiento. Este primer análisis no tiene en cuenta ni los muros portantes, ni los pilares ni los diafragmas.

Si observamos las deformaciones de las tres fases con el programa Angle, una bóveda con apoyos y con coacción de desplazamientos sólo verticales en cabeza de pilares tiende a deformarse mucho más que una bóveda con vigas laterales o con vigas laterales y pretensado, siendo el caso más favorable el de bóveda con coacción de desplazamientos horizontales y verticales en apoyos, y horizontales en las aristas. Sorprende el buen comportamiento fijando los desplazamientos horizontales de arista.

A continuación se ha realizado una comparación de una bóveda propia de la primera fase de directriz catenaria y parábola. Esta comparación simplemente se lleva a cabo para ver cuál es la mejor solución. Se ha llegado a la conclusión de que ambas funciones proporcionan unos resultados muy similares en cuanto a momentos en dirección transversal y deformaciones. En este caso la bóveda con catenaria es la que ofrece menos momentos negativos en la cima de ésta y menores deformaciones tanto verticales como horizontales.

Después se ha modelizado los distintos pilares, los diafragmas y los muros portantes. Las bóvedas se encuentran pretensadas; se han encontrado dificultades en el pretensado de la dos primeras fases ya que la documentación facilitada por el Centro de Documentación de la Universidad de Uruguay no incluía esta información. Finalmente se ha optado por realizar una aproximación similar al de la obra Fábrica Fagar, ya que es un proyecto que se asemeja a estas dos fases.

Cabe mencionar que dividimos la estructura en primera y segunda fase debido a que estructuralmente funcionan de manera independiente ya que se encuentran divididas por un lucernario. Esta división genera una primera fase que cuenta con sólo vuelo y una segunda fase con doble vuelo. Inequívocamente, la cubierta de 3 bóvedas compone una fase independiente ya que no está unida de ninguna forma a las dos anteriores y de encuentra en otro nivel de cota.

Se ha realizado en cálculo de las cargas variables tanto la de sobrecarga de uso como las de viento. No se tiene en cuenta la nieve ya que donde se ubica la obra (Juanicó, Uruguay) apenas alcanza los 45 m de altitud. Introducimos en su correspondiente capa estas dos cargas y la carga de pretensado sobre las cubiertas de las tres fases con la extensión de Angle en la aplicación de Autocad.

Una vez tenemos los modelos de las tres fases con las cargas introducidas y con las combinaciones adecuadas, procedemos a analizar el comportamiento estructural de la Fábrica Domingo Massaro.

En primer lugar, nos centraremos en observar cómo trabajan las dos primeras fases por separado con sólo cargas gravitatorias. En ambas fases las cubiertas trabajan prácticamente a compresión, las zonas donde se ha distribuido el pretensado cuenta con unos valores de compresión inferiores al resto de la cubierta, mientras que las compresiones máximas las absorben los apoyos. En cuanto a tracciones, éstas aparecen en las vigas laterales, concretamente en las partes aledañas a los apoyos. Esto se debe a que la función principal de estas vigas es rigidizar la estructura.

Las deformaciones máximas que sufren las cubiertas en las dos fases se dan en los extremos de voladizos, sobre todo en las partes exteriores de las bóvedas laterales. Por el contrario, las zonas que se encuentran apoyadas sobre elementos estructurales, por ejemplo, muros portantes o pilares, son prácticamente nulos los ascensos que sufren.

En segundo lugar, introduciremos las cargas de viento para ver cómo pueden llegar a influir éstas tanto en sentido longitudinal como transversal. La carga de viento con sentido descendente, es decir, de norte a sur, mejora las compresiones de las bóvedas pero estas se concentran en los apoyos de la estructura en dirección longitudinal (Sx) . Esto ocurría también en el caso de sólo cargas gravitatorias pero al incluir la carga de viento aumenta considerablemente el valor de las compresiones máximas.

En cuanto a deformaciones, éstas aumentan considerablemente respecto a los desplazamientos con sólo cargas gravitatorias si las comparamos con el caso más desfavorable (viento con sentido descendente). Las zonas donde se dan estas deformaciones son las mismas que en el caso anterior, es decir, extremo de voladizo en las bóvedas laterales.

En tercer lugar, se ha hecho una simple comprobación para la primera fase en la que se han eliminado tanto los muros portantes como los diafragmas para observar cuál es su función estructural. Se ha deducido que cuando el viento actúa en sentido descendente, estos elementos ayudan a absorber las compresiones máximas que se encuentran en la zona de pilares.

En cuarto lugar, realizamos una sencilla comprobación para la segunda fase donde eliminamos el pretensado de las cubiertas y vigas para observar cómo puede llegar este elemento a reducir las tracciones en las bóvedas. Como se ha señalado anteriormente en punto 6.4., se carecía de documentación real para esta fase. Se concluye que este pretensado efectivamente ayuda a eliminar las tracciones de la cubierta ya que los resultados de las tensiones de Angle demuestran que la cubierta trabaja prácticamente a compresión.

Por último, se ha analizado el comportamiento estructural de la tercera fase. Esta fase que cuenta con doble vuelo se asemeja a la Terminal de Salto; si comparamos los resultados de las dos estructuras trabajan de manera similar. Si observamos las tensiones sobre las bóvedas y vigas, en el caso de que solo actúan las cargas gravitatorias, hay una concentración de compresiones en sentido longitudinal (S_x) en los puntos de apoyo y en la zona superior de las bóvedas donde se ha colocado el pretensado. En cuanto a deformaciones en el eje Z, el voladizo que se encuentra atirantado al cuerpo de oficinas apenas sufre desplazamientos mientras que el voladizo libre si sufre un descenso.

Para concluir, se ha demostrado que todas las decisiones llevadas a cabo por Dieste para la Fábrica de Domingo Massaro están estudiadas y analizadas para que la estructura trabaje de manera correcta. Realizar cubiertas de grandes dimensiones y con luces importantes con un material tan económico y sostenible como es el ladrillo convierte a Eladio Dieste en un referente para la arquitectura en general pero sobre todo para la arquitectura sostenible.

10. Bibliografía.

- Adell Argilés, J. M., & Mas-Guindal Lafarga, A. J. (2005). Eladio Dieste y la cerámica estructural en Uruguay= Eladio Dieste and structural brick in Uruguay. *Informes de la Construcción*, 56(496), 13-23.
- Jiménez Torrecillas, A., & Pérez, M. D. P. R. (1996). Eladio Dieste, 1943-1996. Sevilla-Montevideo: *Consejería de Obras Públicas y Transportes–Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Junta de Barcelona*.
- Grompone, J. (2011). (7 de junio de 2022). Eladio Dieste, Maestro de La Ingeniería.
- Petrina, A. (junio de 1988). Una estética de la ética. Reportaje a Eladio Dieste. *SUMMA*, Buenos Aires. pp. 23–32, N. 247 [entrevista]
- Cabeza Laínez, J.M. y Almodóvar Melendo, J.M. (2000). Las bóvedas de cerámica armada en la obra de Eladio Dieste. Análisis y posibilidades de adaptación a las condiciones constructivas españolas. En *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la construcción (135-142)*, Sevilla: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla
- Esteban Maluenda, A. (2021). Conexiones transatlánticas. Antonio Bonet y Eladio Dieste: la alteridad constructiva. *Anales del IAA*, 51(2), pp. 1-13. Recuperado de: <http://www.iaa.fadu.uba.ar/ojs/index.php/anales/article/view/402/666>
- Sert, J. L. (1934). Conferencia de J.L. Sert, arquitecto del GATEPAC. *AC*, 16, pp. 43-44.
- Bonet Castellana, A. (1938, 11 de febrero). Carta personal a Josep Torres Clavé. Arxiu Col·legi d'Arquitectes de Catalunya.
- Facultad de Arquitectura de Uruguay. (23 de junio de 2022). *Eladio Dieste Obras*. FADU. <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>
- Baldassari, D., Cueto, G., Fadigati, M., González, N., Keuerk, M., Papa, L. (n.d.). Construcción III – Ejercicio 2. Cerámica armada. Eladio Dieste. Fábrica TEM
- Mas, A. – Adell, J.M. (2005, marzo-abril). *Informes de la Construcción*, Vol.56, n° 496
- Basset Salom, L. (2013). Estructuras laminares.
- Marín, A. M., & Barluenga, G. (2014). ELADIO DIESTE y LA CERÁMICA ARMADA: La forma de lo resistente. *Arquitecturas del Sur*, 90-103.

- Marín, A.M. (2017, 13 de noviembre). Eladio Dieste y la tecnología de la cerámica armada
- Alvarez, O. M. A. (2014). La modernidad en Bóveda. Bonet Castellana (1913-1972). In *I Congreso Pioneros de la Arquitectura Moderna Española: Vigencia de su pensamiento y obra: Actas digitales de las Comunicaciones aceptadas al Congreso.* (pp. 38-48). Fundación Alejandro de la Sota
- Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.
- Arnaldos Montaner, A. (2014). Antonio Bonet Castellana, Le Corbusier y la bóveda catalana: forma y orden. *Dearq. Revista de Arquitectura*, (14), 122-135.
- Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.
- Martí Arís, C. (2001). Las bóvedas autoportantes. *DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura*, (15), 26-31.
- de la Edificación, C. T. (2009). Cte. *Disponible en la web:*
<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>
- Objetivos de desarrollo sostenible. Fuente:
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/news/communications-material/>
- Romera Navarro, D. (2021). Estudio del comportamiento estructural de la terminal de ómnibus de la compañía Turlit(Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

11. Bibliografía fotográfica.

Fig. 1. | Eladio Dieste.

Fuente: <https://brecha.com.uy/tecnica-etica-estetica/>

Fig. 2. | Generación del 45.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Generación_del_45

Fig. 3. | Dieste con sus compañeros de promoción.

Fuente: Grompone, J. (2011). (7 de junio de 2022). Eladio Dieste, Maestro de La Ingeniería.

Fig. 4. | Campamento de estudiantes de ingeniería.

Fuente: Grompone, J. (2011). (7 de junio de 2022). Eladio Dieste, Maestro de La Ingeniería.

Fig. 5. | Construcción de la Iglesia de Saint Jean de Montmartre.

Fuente: Cabeza Laínez, J.M. y Almodóvar Melendo, J.M. (2000). Las bóvedas de cerámica armada en la obra de Eladio Dieste. Análisis y posibilidades de adaptación a las condiciones constructivas españolas. En Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la construcción (135-142), Sevilla: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla

Fig. 6. | Sección de la Iglesia de Saint Jean de Montmartre.

Fuente: Cabeza Laínez, J.M. y Almodóvar Melendo, J.M. (2000). Las bóvedas de cerámica armada en la obra de Eladio Dieste. Análisis y posibilidades de adaptación a las condiciones constructivas españolas. En Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la construcción (135-142), Sevilla: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla

Fig. 7. | Escuela de trabajadores de la Sagrada Familia.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Escuelas_de_la_Sagrada_Familia

Fig. 8. | Exterior de la Maison Henfel.

Fuente: https://www.urbipedia.org/hoja/Casa_de_fin_de_semana_en_Celle-Saint-Cloud

Fig. 9. / Sert, Gropius y Le Corbusier, de izquierda a derecha, hacia 1949.

Fuente: https://elpais.com/cultura/2019/06/04/actualidad/1559663372_528528.html

Fig. 10 | Casa Eladio Dieste.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 11 | Terminal Municipal de Ómnibus.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 12 | Fábrica Domingo Massaro.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 13 | Iglesia de Atlántida Cristo Obrero y Nuestra Señora de Lourdes.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 14 | Fábrica TEM S.A.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 15 | Gimnasio y Colegio Don Bosco.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 16 | Silo de Young.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 17 | Iglesia de San Pedro.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/san-pedro/>

Fig. 18 | Construcción y capas de una bóveda.

Fuente: Baldassari, D., Cueto, G., Fadigati, M., González, N., Keuerk, M., Papa, L. (n.d.).

Construcción III – Ejercicio 2. Cerámica armada. Eladio Dieste. Fábrica TEM

Fig. 19 | Funcionamiento de la curva catenaria.

Fuente: Baldassari, D., Cueto, G., Fadigati, M., González, N., Keuerk, M., Papa, L. (n.d.).
Construcción III – Ejercicio 2. Cerámica armada. Eladio Dieste. Fábrica TEM

Fig. 20 | Bóveda autoportante.

Fuente: *Eladio Dieste 1943–1996*. Sevilla: Conserjería de Obras Públicas y Transportes.
Dirección General de Arquitectura y Vivienda

Fig. 21 | Perspectiva y sección de bóveda autoportante.

Fuente: *Eladio Dieste 1943–1996*. Sevilla: Conserjería de Obras Públicas y Transportes. Dirección
General de Arquitectura y Vivienda

Fig. 22 | Alzado bóveda autoportante.

Fuente: *Eladio Dieste 1943–1996*. Sevilla: Conserjería de Obras Públicas y Transportes. Dirección
General de Arquitectura y Vivienda

Fig. 23 | Bóveda gausa.

Fuente: *Eladio Dieste 1943–1996*. Sevilla: Conserjería de Obras Públicas y Transportes. Dirección
General de Arquitectura y Vivienda

Fig. 24 | Alzado bóveda gausa.

Fuente: *Eladio Dieste 1943–1996*. Sevilla: Conserjería de Obras Públicas y Transportes. Dirección
General de Arquitectura y Vivienda

Fig. 25 | Sección transversal Iglesia de San Pedro.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 26 | Ejecución de bóvedas de cerámica armada.

Fuente: Baldassari, D., Cueto, G., Fadigati, M., González, N., Keuerk, M., Papa, L. (n.d.).
Construcción III – Ejercicio 2. Cerámica armada. Eladio Dieste. Fábrica TEM

Fig. 27 | Bóveda tabicada.

Fuente: <https://bovedastabicas.wordpress.com/la-boveda-tabicada/>

Fig. 28 | Vivienda Berlingieri.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 29 | Vivienda Berlingieri.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 30 | Vista aérea de La Ricarda.

Fuente: Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.

Fig. 31 | Vista frontal de La Ricarda.

Fuente: Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.

Fig. 32 | Vista de la cubierta de La Ricarda.

Fuente: Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.

Fig. 33 | Vista interior de La Ricarda.

Fuente: Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.

Fig. 34 | Dimensiones de las bóvedas .

Fuente: Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.

Fig. 35 | Detalle constructivo.

Fuente: Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.

Fig. 36 | Problemas estructurales detectados.

Fuente: Álvarez, F., Roig, J., & Segura, P. (2005). Rehabilitación de La Ricarda de Antonio Bonet. *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, (18), 62-81.

Fig. 37 | Vista exterior.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 38 | Vista de bóvedas.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 39 | Vista lucernario.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 40 | Vista interior.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 41 | Planta general.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 42 | Cortes y fachadas.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 43 | Diafragma 1.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 44 | Corte apoyo 3 y 4.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 45 | Corte apoyo 5.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 46 | Losa de borde.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 47 | Detalle tercera etapa.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 48 | Detalle pretensado de la tercera etapa.

Fuente: Cabeza Laínez, J.M. y Almodóvar Melendo, J.M. (2000). Las bóvedas de cerámica armada en la obra de Eladio Dieste. Análisis y posibilidades de adaptación a las condiciones constructivas españolas. En Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la construcción (135-142), Sevilla: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla

Fig. 49 | Tanque de agua.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 50 | Fase 1, Fase 2 y Fase 3. Distintos modelos.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 51 | Plantas de las tres fases.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 52 | Fase 1. Modelo 1. HIP01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 53 | Fase 1. Modelo 3. HIP01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 54 | Fase 2. Modelo 1. HIP01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 55 | Fase 2. Modelo 3. HIP01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 56 | Fase 3. Modelo 3. HIP01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 57 | Catenaria (superior) y parábola (inferior). Momentos My. HIP01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 58 | Tabla comparativa de deformaciones. HIP01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 59 | Pilar tipo 1.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 60 | Pilar tipo 2.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 61 | Pilar tipo 3 en la fase 1 y 2.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 62 | Pilar tipo 3 en la fase 3.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 63 | Vista a pilares tipo 1 y 3.

Fuente: <http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>

Fig. 64 | Detalle de losa de borde.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 65 | Valores de distintos materiales.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 66 | Catenaria Massaro gráfica.

Fuente: Excel del profesor tutor Ricardo Perelló

Fig. 67 | Detalle de losa de borde.

Fuente: Centro de Documentación iha.documentacion@gmail.com

Fig. 68 | Esquema de pretensado.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 69 | Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso.

Fuente: CTE DB SE-AE

Fig. 70 | Esquema de sobrecarga de uso.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 71 | Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición.

Fuente: CTE DB SE-AE

Fig. 72 | Tabla D.9. Cubiertas múltiples.

Fuente: CTE DB SE-AE

Fig. 73 | Tabla D.12. Cubiertas cilíndricas.

Fuente: CTE DB SE-AE

Fig. 74 | Tabla D.10. Marquesina a un agua.

Fuente: CTE DB SE-AE

Fig. 75 | Viento dirección W-E/E-W.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 76 | Viento dirección N-S/S-N.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 77 | Esquema viento W-E/E-W.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 78 | Esquema viento N-S/S-N.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 79 | Hipótesis de carga.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 80 | Tabla 4.1. Coeficientes de seguridad.

Fuente: CTE DB SE

Fig. 81 | Tabla 4.2. Coeficientes de simultaneidad.

Fuente: CTE DB SE

Fig. 82 | Estados límite últimos (ELU).

Fuente: Elaboración propia

Fig. 83 | Estados límite de servicio (ELS).

Fuente: Elaboración propia

Fig. 84 | Fase 1. Tensiones Sy. ELU01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 85 | Fase 1. Tensiones SII. ELU01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 86 | Fase 1. Deformaciones Dz. ELS14

Fuente: Elaboración propia

Fig. 87 | Fase 2. Tensiones Sx. ELU01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 88 | Fase 2. Deformaciones Dz. ELS14.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 89 | Fase 1. Tensiones Sx. ELU09.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 90 | Fase 1. Tensiones Sy. ELU09.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 91 | Fase 1. Deformaciones Dz. ELS12.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 92 | Fase 2. Tensiones Sx. ELU10.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 93 | Fase 2. Tensiones Sy. ELU09.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 94 | Fase 2. Deformaciones Dz. ELS08.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 95 | Fase 1 sin muros portantes ni diafragmas. Tensiones Sx. ELU09.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 96 | Fase 1 sin muros portantes ni diafragmas. Deformaciones Dy. HIP04.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 97 | Fase 1. Deformaciones Dz. HIP06.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 98 | Fase 2 sin pretensado. Tensiones Sx. ELU01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 99 | Fase 2 sin pretensado. Tensiones Sy. ELU01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 100 | Fase 2 sin pretensado. Deformaciones Dz. ELU07.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 101 | Fase 3. Tensiones Sx. ELU01.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 102 | Fase 3. Tensiones Sy. ELU10.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 103 | Fase 3. Deformaciones Dz. ELU07.

Fuente: Elaboración propia

Fig. 104 | Objetivos de desarrollo sostenible.

Fuente: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/news/communications-material/>