



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

Diseño y cálculo de la estructura de la fábrica

FAGAR de Eladio Dieste



AUTOR: Jorge David López López

TUTOR: Ricardo Perelló Roso

ESCUELA: Escuela Técnica Superior de Arquitectura

CURSO: 2020-2021

TITULACIÓN: Grado en Fundamentos de la Arquitectura

“(...) Me apasiona la posibilidad de comprender la realidad a través del lenguaje físico-matemático.”

Eladio Dieste

0.0 índice

1.0 Resumen

2.0 Objetivos

3.0 Eladio Dieste

4.0 Fábrica FAGAR

4.1 El proyecto

4.2 El Entorno

4.3 Función y Geometría

4.4 Análisis gráfico

5.0 Modelo

5.1 Descripción y Simplificación

5.2 Modelización de Elementos Estructurales

5.2.1 Pilares

5.2.2 Vigas y Tirantes.

5.2.3 La Bóveda

5.2.4 Cerramiento

5.3 Postesado

5.3.1 Postesado Viga Tensor.

5.3.2 Postesado Viga de borde.

5.3.3 Postesado viga Central

5.3.4 Postesado Bóveda

5.4 Asignación y evaluación de cargas

5.4.1 Cargas permanentes.

5.4.2 Cargas variables

5.4.3 Hipótesis de carga

5.4.4 Combinaciones

6.0 Análisis y Resultados

6.1 Combinaciones Utilizadas.

6.2 Análisis de Resistencia: ELU_01

6.2.1 Barras

6.2.2 Viga central y perimetral

6.2.3 Bóveda

6.3 Análisis de Deformaciones: ELS_01

6.3.1 Deformaciones eje X

6.3.2 Deformaciones eje Y

6.3.3 Deformaciones eje Z

6.3.4 Comprobaciones de flechas y desplazamientos horizontales

6.3.5 Análisis de deformaciones de la bóveda.

6.3.5.1 Deformaciones estructura sin postesado

6.3.5.2 Deformaciones estructura sin Viga Tensor

6.3.5.3 Deformaciones estructura sin Viga Perimetral

7.0 Conclusiones

8.0 Bibliografía

9.0 Anexos

1.0 Resumen

Eladio Dieste fue un ingeniero uruguayo con aptitud para la construcción, lo que define su obra, repensando la forma de construir y adaptando materiales tradicionales a las necesidades de su tiempo.

Todas sus obras tienen un factor común: el uso de la cerámica armada cubriendo grandes luces a través de formas abovedadas. Tanto para estaciones de autobuses, fábricas de todo tipo o iglesias, la multiplicidad de usos para una misma tipología constructiva es algo constante en su obra. La forma nace de la estructura, es su razón de ser.

La obra para analizar, la fábrica FAGAR, está formada por dos naves longitudinales cubierta por una bóveda de cerámica armada de 11 cm de espesor que cubre una luz de 12 metros, acompañada de un tanque de agua. Lo que destaca este edificio es la resolución de un programa con la caracterización formal que imponen las obras de Eladio Dieste.

La modelización y el posterior análisis de los elementos estructurales que utiliza nos acercará a entender el funcionamiento completo del edificio, comprendiendo la solución tomada y las consecuencias de las mismas.

1.1 Palabras clave:

Eladio Dieste - Cerámica armada - Estructura - Bóveda - FAGAR

1.0 Resum

Eladio Dieste va ser un enginyer uruguaià amb aptitud per a la construcció, la qual defineix la seua obra, repensant la manera de construir i adaptant materials tradicionals a les necessitats del seu temps.

Totes les seues obres tenen un factor comú; l'ús de la ceràmica armada cobrint grans llums a través de formes voltades. Tant per a estacions d'autobusos, fàbriques de tota mena o esglésies, la multiplicitat d'usos per a una mateixa tipologia constructiva és una cosa comptant en la seua obra. La forma naix de l'estructura, és la seua raó de ser.

L'obra per a analitzar, la fàbrica *FAGAR, està formada per dues naus longitudinals cobertes per una volta de ceràmica armada de 11 cm de grossària que cobreix una llum de 12 metres, acompanyada d'un tanc d'aigua. El que destaca aquest edifici és la resolució d'un programa amb la caracterització formal que imposen les obres de Eladio Dieste.

La modelització i la posterior anàlisi dels elements estructurals que utilitza ens acostarà a entendre el funcionament complet de l'edifici, comprnent la solució presa i les conseqüències d'aquestes.

1.1 Paraules clau:

Eladio Dieste - Ceràmica armada - Estructura - Volta - FAGAR

1.0 Abstract

Eladio Dieste was an Uruguayan engineer with an aptitude for construction, which defines his work, rethinking the way of building and adapting traditional materials to the needs of his time.

All his works have a common feature; the use of reinforced ceramics covering large spans through vaulted forms. Whether for bus stations, churches, all kinds of factories, the multiplicity of uses for the same type of construction is a constant feature of his work. The form is born out of the structure; it is its raison.

The work to be analysed, the FAGAR factory, is made up of two longitudinal naves covered by an 11 cm thick reinforced ceramic vault that covers a span of 12 metres, accompanied by a water tank. What makes this building stand out is the resolution of a programme with the formal characterisation imposed by the works of Eladio Dieste.

The modelling and subsequent analysis of the structural elements used will bring us closer to understanding the complete functioning of the building, as well as the solution adopted and the consequences of the same.

1.1 Key words:

Eladio Dieste – Reinforced ceramics - Structure - Vault - FAGAR

2.0 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de la obra de Eladio Dieste, concretamente el análisis de la fábrica de FAGAR. Se hace necesario, por tanto, aprender y profundizar en el programa Angle para su análisis estructural; adquirir conocimientos sobre sistemas estructurales de curvatura simple; y analizar la razón de ser de cada uno de los elementos estructurales impuestos para la realización del edificio.

2.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible

Dado que uno de los objetivos de este TFG se basa en el estudio de la obra del ingeniero Eladio Dieste se puede establecer una relación directa con el **objetivo 9** de desarrollo sostenible, dado que a lo largo de su obra Dieste modificó la forma de pensar y construir industrias.

Una de las características que destaca en la mayoría de sus obras es el uso de fábrica armada como nuevo material en contraposición al uso de Hormigón armado más estandarizado en este tipo de obras.

Este cambio, rebaja las grandes cantidades de cemento necesario para efectuar las bóvedas características del ingeniero y por tanto la huella de carbono. Por lo que se puede relacionar también con el **objetivo 13**.



3.0 Eladio Dieste

Eladio Dieste nació en Artigas (Uruguay) el 1 de diciembre de 1917 en una familia acomodada, formada por profesores, académicos e intelectuales de la época. Dieste se formó como ingeniero civil en la Universidad de la República (Uruguay), aunque a lo largo de su trayectoria ocupó profesiones de Arquitecto, Ingeniero, Pintor y Profesor Universitario.

Dieste formó parte de *la generación del 45* en Uruguay, la cual se caracterizó por el gran espíritu crítico y una sólida formación en el arte y las letras. A su vez en las facultades de tecnología y las fuerzas armadas (representadas por personajes como Rafael Languardia, Jose Luis Massera, Juio Vales) fueron incorporándose docentes de gran interés, hasta convertir la facultad de ingeniería en un centro docente de gran importancia.¹

Esta generación se caracterizaba por una solidez en la formación básica, un gran respeto a las matemáticas y la física, y un espíritu innovador. En este contexto también se formó Eugenio Montañez, quien fue compañero de promoción y con el cual en un futuro crearía una empresa de proyectos y ejecución de Obra civil: Dieste y Montañez S.A.²

A partir de 1936, grandes cantidades de emigrantes llegan a Uruguay, lo que influencia la vida de muchos artistas y críticos de la época. Uno de los más relevantes fue Joaquín Torres García, artista plástico que formó una escuela de arte constructivo. Las influencias europeas tuvieron un gran impacto en la sociedad uruguaya y en toda Latinoamérica.

¹ Juan Grompone, "Eladio Dieste, Maestro de La ' Ingenier ia," n.d., 1–36.

² Ibid.

En 1943 Dieste terminó su formación como ingeniero civil y comenzó a trabajar en sus primeros proyectos. Inicialmente trabajó para la constructora danesa *Christiani y Nielsen* donde se interesó por las bóvedas de hormigón armado que realizaba para esta empresa.

En 1945 se puso en contacto con el arquitecto Antonio Bonet, para trabajar en la ejecución de obras como la casa Berlinghieri (Imagen 1).



Imagen 1 : “Casa Berlinghieri” – Antonio Bonet (1947)

En esta obra, Bonet y Dieste debatieron sobre la tipología de las bóvedas. Dieste tendía al uso del hormigón armado, mientras Bonet, que conocía bien la técnica, prefería la bóveda catalana. Es en este proyecto donde Dieste comienza a explorar la posibilidad de realizar la cubierta mediante una cáscara de fábrica de ladrillo.

“El problema era para mí totalmente nuevo; y, a veces, la ignorancia sirve. (...) busque el camino aprovechando mis experiencias constructivas anteriores con cascaras de hormigón armado y moldes deslizantes. Se me ocurrió aliar la cerámica al molde deslizante, como se le hubiera ocurrido a cualquiera (...)”³

³ Ana M^a Marín and Gonzalo Barluenga Badiola, “Eladio Dieste y la cerámica armada: la forma de lo resistente,” article, *Arquitecturas del sur* 32, no. 45 (2014): 90–103.

Es en este punto donde Eladio Dieste comienza a estudiar las posibilidades de las bóvedas a través de este tipo de obras, como las que ejecuta como ingeniero de la empresa danesa.

La bóveda para la casa Berlinghieri tenía unos 6m de luz y estaba armada con alambres. Poco después Dieste construyó una bóveda para la fábrica MAUSA de 10,5m de luz en 1947 y la bóveda para la fábrica IPUSA en 1948, todas ellas autoportantes y de directriz elíptica.⁴

La base para explorar construcciones de fábrica armada ha sido recurrente en la Historia de la arquitectura, pero no es hasta la producción industrial del hierro y el acero que se comienza a experimentar con la ejecución de un material mixto (material cerámico y armado metálico). La base de esta tipología constructiva nace de la necesidad de dotar a materiales pétreos de resistencia a tracción, empezando por los sistemas de *ciment armé* del ingeniero francés Paul Cottancin en 1890.⁵

Eladio Dieste comienza su segunda etapa, dejando de lado sus conocimientos sobre las bóvedas para entrar a trabajar en una empresa de pilotaje (Viermond S.A), que finalmente abandona diez años después.

En 1952 Alberto Giudice y su mujer Urioste le encargan una de sus obras más célebres; La iglesia de Atlántida. Esta obra hizo replantearse la materialidad de sus obras a muchos arquitectos latinoamericanos como Rogelio Salmona, Barraco Barrios o José Ignacio Díaz y tuvo un gran impacto internacional.

⁴ Eladio Dieste and Ana M Marín De Palma, "Eladio Dieste, El Arte de Construir En Ladrillo," *Historia*, 2000, 26–28.

⁵ Jose María and Cabeza Lainez, "Las Bóvedas de Cerámica Armada En La Obra de Eladio Dieste . Análisis y Posibilidades de Adaptación a Las Condiciones Constructivas Españolas," *Historia*, 1996, 19–21.

El edificio está formado por una única nave franqueada por paredes laterales como curvas Gaussianas que soportan una lámina plegada y pretensada de ladrillo de 8 cm de espesor.

En esta obra, titulada por Dieste como *“mi primera experiencia arquitectónica”*, se muestra un lenguaje arquitectónico de racionalidad constructiva alejado de las posibilidades de países desarrollados.⁶



En 1955 comienza una nueva etapa. Se asocia con su compañero de promoción Eugenio Montañez y realizan distintos proyectos de carácter industrial como depósitos con bóveda armada para ANCAP en Capurro (Imagen 3) o para Frugoni en Montevideo.

⁶ “Iglesia de Atlantida - Ficha, Fotos y Planos - WikiArquitectura,” accessed July 8, 2021, <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/iglesia-de-atlantida/>.



Imagen 3: “Planta Elaboradora de Lubricantes ANCAP” – Eladio Dieste y Eugenio Montañez (1955)

Entre 1958 y 1971 Dieste desarrolló tanto de manera experimental como teóricamente el concepto de las bóvedas de cerámica armada. Dieste junto a Montañez, optimizaron y refinaron la bóveda hasta lograr una nueva forma de construir y de pensar. A su vez, Eladio exploró las posibilidades de la cerámica armada en otras tipologías constructivas como bóvedas autoportantes, bóvedas de doble curvatura, diafragmas o tanques de agua. Cada proyecto era una posibilidad de explorar las posibilidades de la fábrica armada, Como se puede ver en su propia casa (Imagen 4).



Imagen 4: “Casa Dieste” – Eladio Dieste (1961-1963)

“El cálculo perfecto y acabado de una estructura de doble curvatura, por ejemplo, recién se hizo diez o doce años después. (...) Lo mismo sucedió con las bóvedas autoportantes: las utilice por primera vez en mi casa, viendo cómo funcionaba la estructura y estableciendo luego la teoría.”⁷

Dieste desarrollaba sus bóvedas siguiendo los principios de absorción de esfuerzos a través de sistemas de arcos funiculares, donde la forma específica se relaciona con la función específica.⁸

Los conocimientos obtenidos para la ejecución y diseño de las bóvedas de fábrica armada se aplicaron a una nueva tipología constructiva, los Silos. La diferencia está en el sistema de absorción de los esfuerzos horizontales. Mientras en obras anteriores de varias naves, el flujo de acciones horizontales era contenido mediante varios vanos, contrafuertes o tirantes, los silos son arcos anclados directamente a tierra⁹. Dieste y Montañez construyeron gran cantidad de estos silos como El Silo de la fábrica Vergara, el Silo de Young (figura 5) o los silos de Nueva Palmira. El 1965 se construyó el Silo de Fosfato Thomas, una bóveda empotrada en el suelo que cubría 1900 m² con una luz libre de 30 m.

⁷ Grompone, “Eladio Dieste, Maestro de La Ingeniería.”

⁸ María and Lainez, “Las Bóvedas de Cerámica Armada En La Obra de Eladio Dieste . Análisis y Posibilidades de Adaptación a Las Condiciones Constructivas Españolas.”

⁹ Engel, H. (2001). Sistemas de estructuras= Sistemas estruturais. Barcelona: Gustavo Gili.



Imagen 6: "Silo de Young" – Eladio Dieste y Eugenio Montañez (1978)

En 1966 las torres cónicas cobraron gran importancia en la obra de Eladio Dieste, como en la obra Las Vegas en Canelones, donde se proyecta un tanque de agua con 27 metros de altura con capacidad para 120 metros cúbicos de agua. Sin embargo, la obra más relevante entre esta tipología es la torre para la antena del canal 9 construida en 1987 con 66 metros de altura.¹⁰

En la obra de Eladio Dieste como ingeniero y como constructor solamente tuvo dos accidentes en la ejecución de sus bóvedas. La primera ocurrió en 1978 en las bóvedas de los refrescos del norte, debido a la falta de armadura de la losa de borde por parte de los obreros. El segundo fue en la construcción de la nave de la planta de jugos Azucitrus S.A. donde la bóveda se desplomó . A través de un juicio de 2 años de duración se demostró que el fallo se había producido por culpa de la empresa suministradora de Cemento Portland (ANCAP) la cual entregó un cemento con una velocidad de fraguado distinta a la solicitada.

¹⁰ Grompone, "Eladio Dieste, Maestro de La ´ Ingenier ia."

Durante toda la obra de Eladio Dieste las dificultades para el dimensionamiento frente a pandeo siempre ha estado presente y sus resoluciones siempre han partido de datos experimentales. La gran problemática deriva de la transformación de fórmulas expuesta en barras comprimidas en forma excéntrica a arcos y bóvedas de doble curvatura¹¹. Las soluciones analíticas eran inviables de calcular y siempre se optaba por metodologías aproximadas que derivaban de la práctica.¹²

“Para cada familia de problemas es posible encontrar reglas practicas que permitan obtener [la carga crítica] con aproximación suficiente; pero para obtener estas reglas, es indispensable la seguridad que solo pueden dar los procesos más exactos de que son ejemplo los explicados aquí.”¹³

Finalmente, Dieste a través de las primeras computadoras llegadas a la universidad de la república en Uruguay se diseñó unas tablas aproximadas para el cálculo de las bóvedas.

En 1980 La empresa Dieste y Montañez adquirió una de las primeras computadoras de aquel entonces, lo que les permitió continuar con el desarrollo y cálculo de todas sus obras posteriores. La mentalidad de Dieste cambió a favor del cálculo computacional dado que las suposiciones que tenía que adoptar para el cálculo analítico podía contener ciertos errores. Además de formas que se podía suponer su buen funcionamiento, como las campanas de Gauss, se comprendía a nivel analítico con un cálculo extenso.

¹¹ M Salvadori, R Heller, and S C Milicay, *Estructuras Para Arquitectos / Structures in Architecture*, Elibro Cátedra (Nobuko Sa, 2005), <https://books.google.es/books?id=5zFKPQAACAAJ>.

¹² Dieste and Palma, “Eladio Dieste, El Arte de Construir En Ladrillo.”

¹³ Marín and Barluenga Badiola, “Eladio Dieste y la cerámica armada: la forma de lo resistente.”

“pocas cosas en este mundo son más prodigiosas que la computación. Muchas de las dificultades de cálculo (...) han desaparecido, porque no hay sistema de ecuaciones diferenciales, por complejo que sea que resista a la capacidad de resolución de una buena máquina. Pero esta no responde por sí misma, nunca nos dará substancialmente más que lo que le ponemos dentro; o sea que la creación de la forma seguirá siendo el resultado del trabajo de la mente humana, ese prodigio que produjo las computadoras y las trasciende infinitamente. Desde luego que hay una interacción entre hombre y máquina; el que sabe y puede computar adquiere un gran poder, pero existen riesgos cuando nos dejamos llevar por la fascinación del instrumento.”¹⁴

En 1978 Mariano Arana le preguntó a Eladio Dieste si se consideraba arquitecto, a lo él que contestó rápidamente:

“No. Para ser arquitecto se necesita una formación académica que no tengo. En último caso podría ser un idóneo que puede encarar algunos programas muy simples de arquitectura”¹⁵

Sin embargo, poco después de un largo debate con Mariano, repasando cada pequeño detalle de cada obra puntualizó la respuesta:

“La Iglesia de Atlántida fue mi facultad de arquitectura”

La obra de Eladio Dieste, desde sus primeras obras hasta la últimas, es un proceso de transformación, consecuente de sus carencias como arquitecto nunca se enfrentaba a programas que él no podía definir en su totalidad y tampoco tuvo problemas en contactar con ciertos arquitectos para definir completamente sus obras. Eladio Dieste, formado académicamente como Ingeniero civil, a lo largo de su trayectoria se adaptó a las necesidades.

Dieste destacó como Constructor y como diseñador en su trayectoria, proponiendo avances en la construcción de sus edificios y a su vez

¹⁴ Grompone, “Eladio Dieste, Maestro de La ´ Ingenier la.”

¹⁵ Ibid.

diseñando maquinaria específica para llevar a cabo sus obras desde encofrado móviles hasta pistones hidráulicos.

En la actualidad, se considera a Eladio un maestro de la arquitectura. Independiente de lo que piense él sobre esta afirmación, si que podemos constatar que Eladio contenía facetas muy características de su campo y un gran interés por la comprensión física-matemática de los elementos de su entorno.

4.0 Fábrica FAGAR

4.1 El Proyecto



La Fábrica FAGAR (San Juan Refrescos S.A.), situada en la localidad de Los Cerros de San Juan (Colonia, Uruguay), es un complejo industrial basado en la distribución de refrescos y producción de agua mineral, diseñada por el ingeniero Eladio Dieste entre 1990 y 1996.

La primera etapa, entre 1990 y 1992, se construyeron dos naves longitudinales de 12,75 m por 50,6 m de largo, más 12,5 m de voladizo a cada lado, caracterizadas por las cubiertas resueltas bajo el sistema de cerámica armada, con un entrepiso y una escalera exterior como acceso a las oficinas superiores. A su vez, tangente a las naves, se eleva una torre de 25 m de altura como tanque de agua de 60.000 litros, el cual contiene tanto agua tratada como natural.

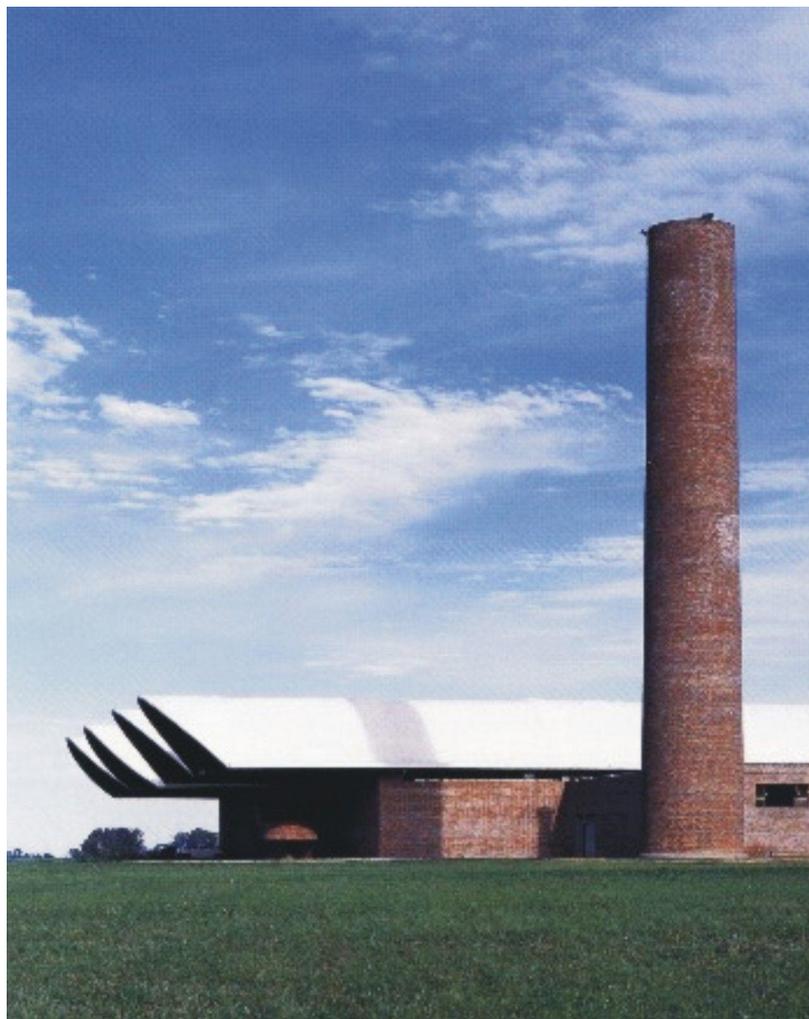
La segunda etapa, entre 1994 y 1996, se construyen dos naves análogas a las anteriores colocada al este de las mismas.

La materialidad de la cubierta está compuesta por ladrillos cerámicos (25x25x7,5 cm) unidos por mortero de arena y cemento portland, más una capa de compresión. En el interior los espacios de laboratorio y maquinaria de embotellado están rematados por baldosas de gres e iluminados por carpinterías de hierro pintado y de acero inoxidable.¹⁶

¹⁶ "Nómada - FAGAR - San Juan Refrescos S.A.," accessed May 9, 2021, <https://nomada.uy/guide/view/attractions/4203>.

4.2 El Entorno

La obra es consciente de su implicación espacial y se inserta en el terreno como un juego de volúmenes donde las 4 naves horizontales se contraponen contra una torre muy vertical que actúa como faro en medio del prado donde se sitúa.



La estética del edificio es más propia de un estilo moderno tardío de 1970, pero donde se expone la dimensión del conjunto, al igual que el resto de sus obras, es en la posibilidad de resolución de un programa diverso con la misma tipología constructiva.¹⁷

¹⁷ Ibid.

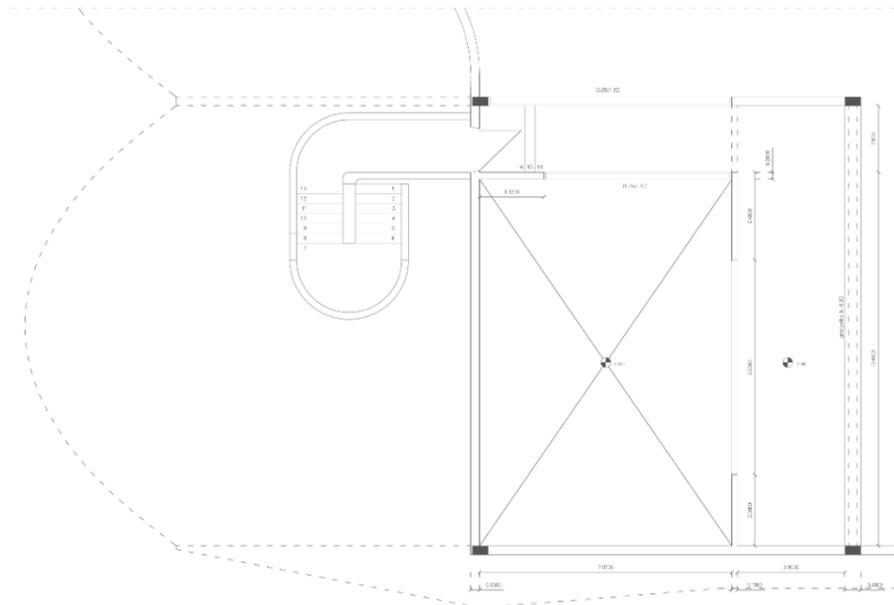
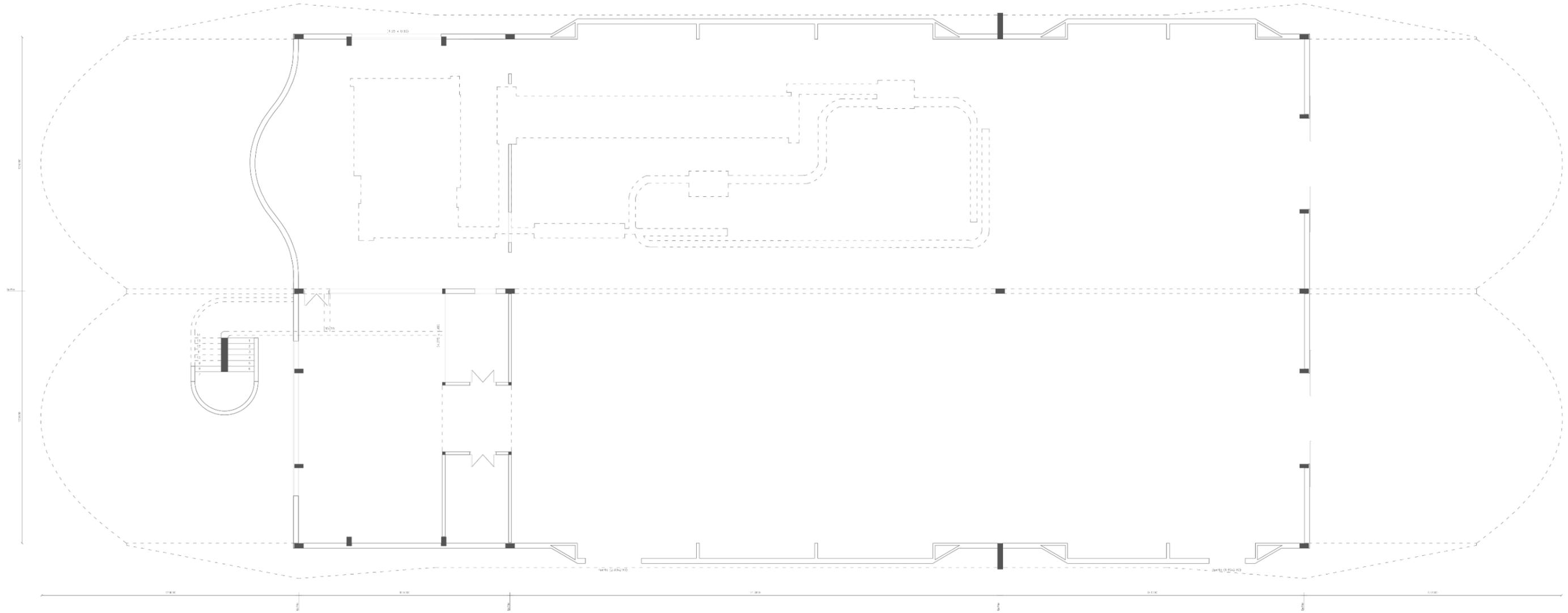
4.3 Función y Geometría

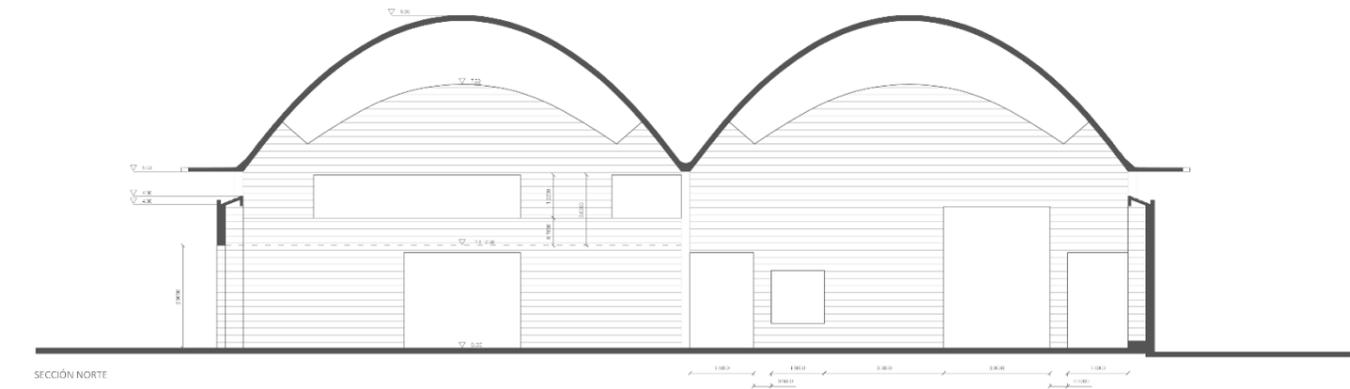
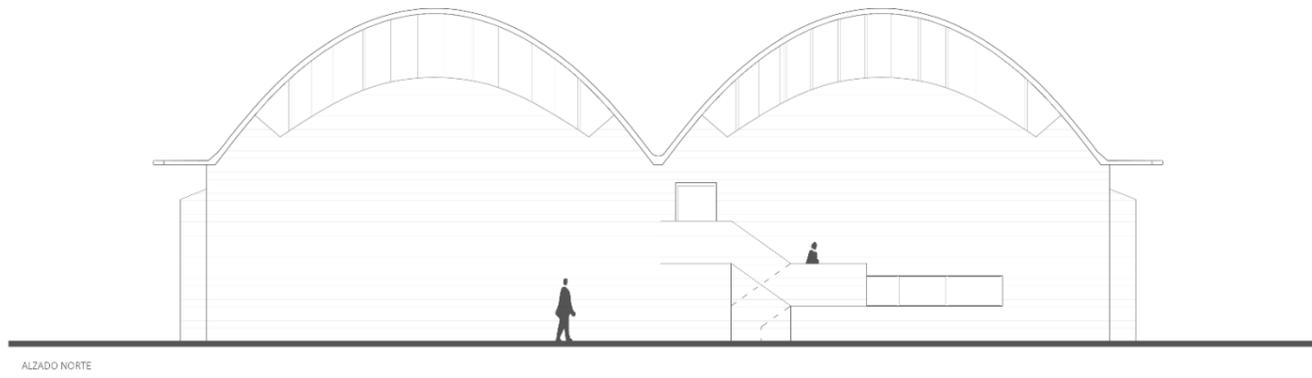
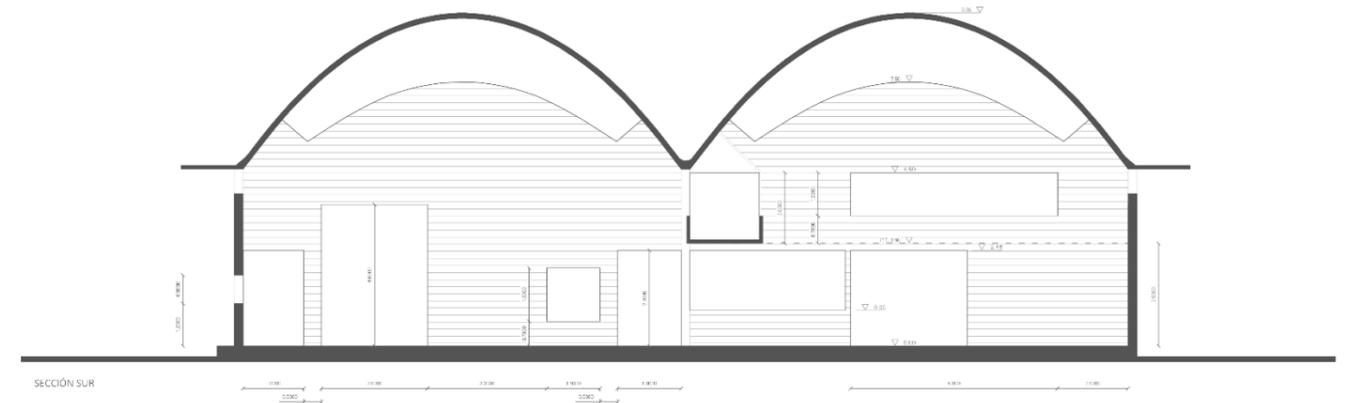
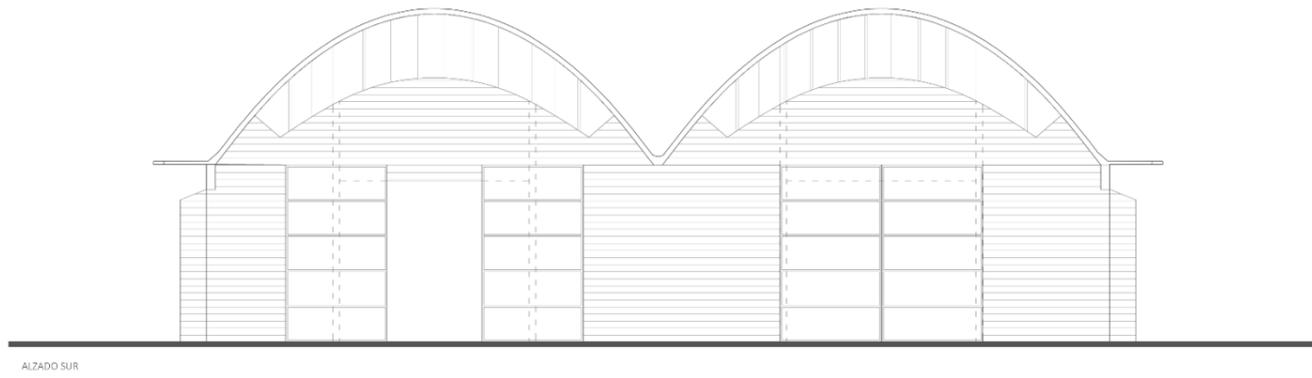
La parte más significativa de la obra, las cubiertas, está constituida por pares de bóvedas de cerámica armada de 8 cm de espesor que apean sobre 4 pilares de hormigón a cada lado de la bóveda y vuelan 12,5m a cada lado. A su vez para resistir los esfuerzos horizontales de la cubierta se atirantan las bóvedas en sus uniones menos en un eje de pilares donde el canto de pilar varía para la absorción de los esfuerzos horizontales. Esto puede deberse a la imposibilidad de colocar un tirante por la maquinaria de gran envergadura que debe situarse en ese punto concreto.

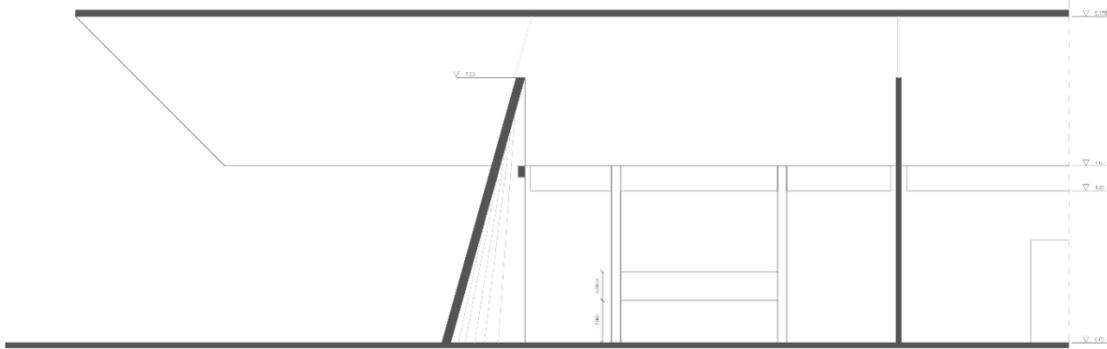
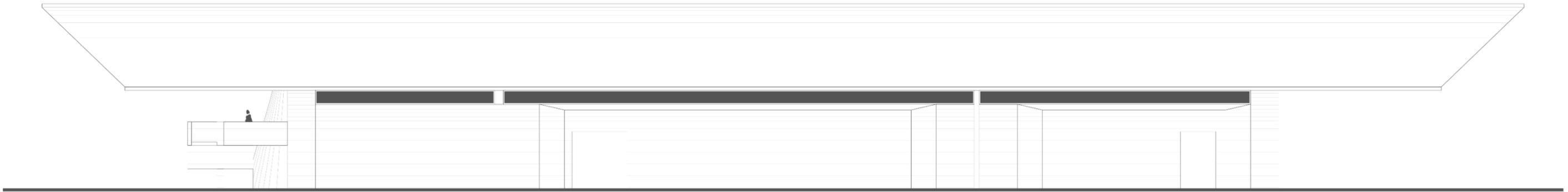
Además, en los laterales exteriores para la absorción de la perturbación de borde¹⁸ se coloca una viga plana de ámbito variable a lo largo de todo el perímetro longitudinal del edificio.

El perímetro de la nave está cubierto por un cerramiento de fábrica de ladrillo tradicional donde se colocan tanto pilares para el arriostramiento como contrafuertes para la absorción de las acciones del viento.

¹⁸ Engel, H. (2001). Sistemas de estructuras= Sistemas estruturais. Barcelona: Gustavo Gili.







4.4 Análisis Gráfico

El material gráfico expuesto anteriormente, reproducen los planos originales (Anexo A) proporcionado por el Centro de Documentación e Información del Instituto de Historia de la Arquitectura de la Universidad de la República de Uruguay.¹⁹ Como a través de la plataforma *NÓMADA*²⁰, de la misma universidad, la cual se encarga de recopilar y publicar obras de arquitectos e ingenieros de toda Latinoamérica.

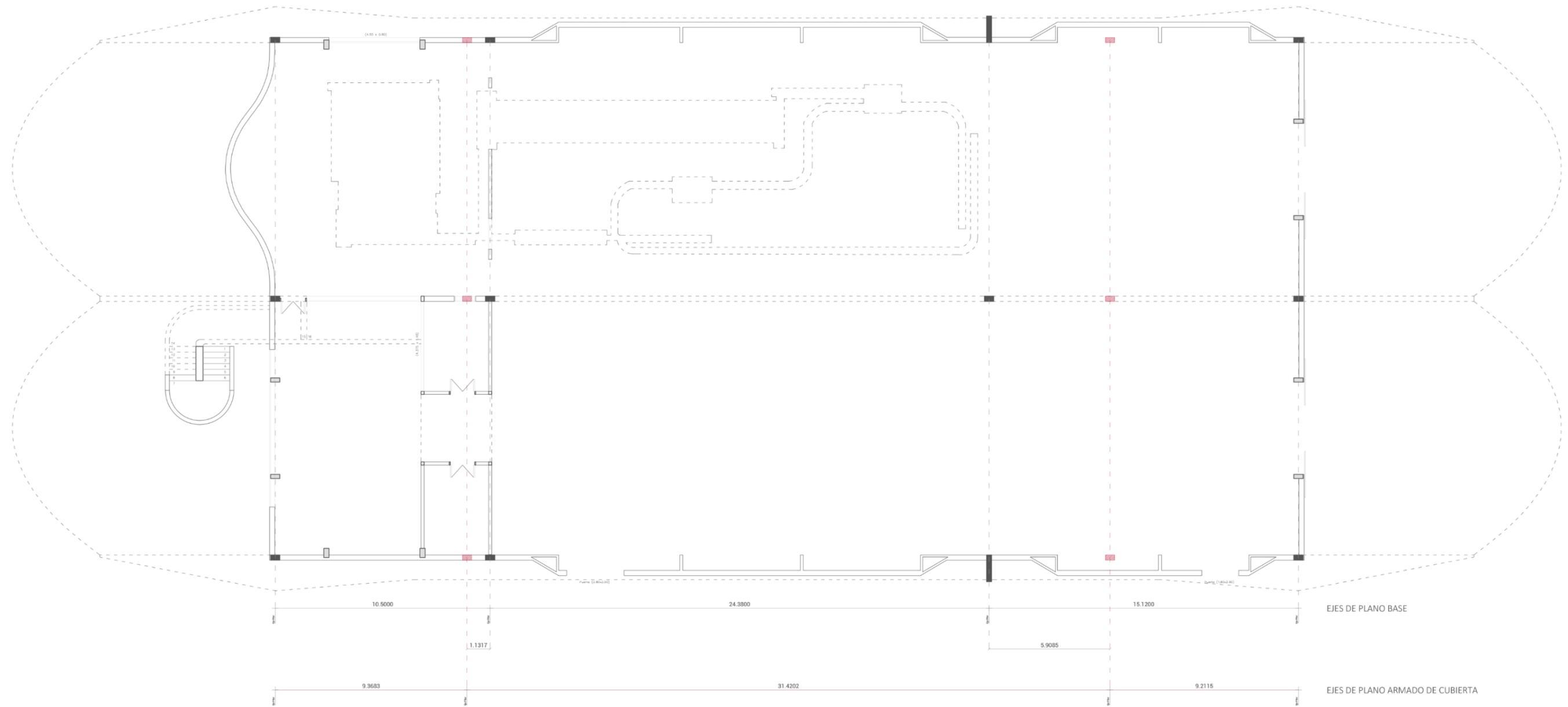
En los planos originales (anexo A) se puede ver incongruencias en los documentos gráficos de armado de la cubierta (Pág A.2) y el de la planta general (Pág A.1). En ambos documentos las medidas de la cubierta son las mismas, sin embargo, la distancia entre los pilares es distinta.

En la página siguiente se muestra un plano de comparación entre las dos disposiciones de pilares dispuestos.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, más adelante se tomará en consideración la posibilidad de analizar 2 modelos distintos dado que no se puede saber a ciencia cierta la disposición real de los pilares.

¹⁹ Centro de Documentación e Información del Instituto de Historia de la Arquitectura. FADU, Udelar.
CDI, IHA.2020 (CDI, IHA.DIPA.M2. T28-b)

²⁰ "Nómada - FAGAR - San Juan Refrescos S.A."



5.0 Modelo

5.1 Descripción y Simplificación

Se procede a continuación a analizar el comportamiento estructural de la fábrica FAGAR con ayuda de los programas informáticos AutoCad y Angle.

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, la fábrica se compone en su totalidad de 4 naves, análogas dos a dos, por lo que el modelo informático se simplificará únicamente a un conjunto formados por dos de ellas.

El modelo de la estructura se realiza simplificando sus elementos en barras (representadas como líneas) y superficies (representadas como 3D cara). Con el programa Angle se asignan a estos elementos las secciones, espesores y materiales que le corresponden para posteriormente sobre ellos colocar las cargas que sustentan.

De esta manera se consigue una simplificación de la estructura original muy aproximada que permite introducirla al programa Angle para analizar y comprender su funcionamiento.

5.2 Modelización de Elementos Estructurales

5.2.1 Pilares

Los pilares que sostienen la bóveda, como se puede ver en el anexo A (Pág V), se podrían diferenciar por 3 características: canto constante o variable, uso o no de tirante y posición lateral o central.

Los pilares 1-2-4 se sitúan en el perímetro, cerrando la nave, donde apean tanto la bóveda como el saliente de la viga plana. Son de dimensión constante (45 x 25 cm) y utilizan un torón como tirante pretensado para absorber los esfuerzos horizontales. (Imagen 6)

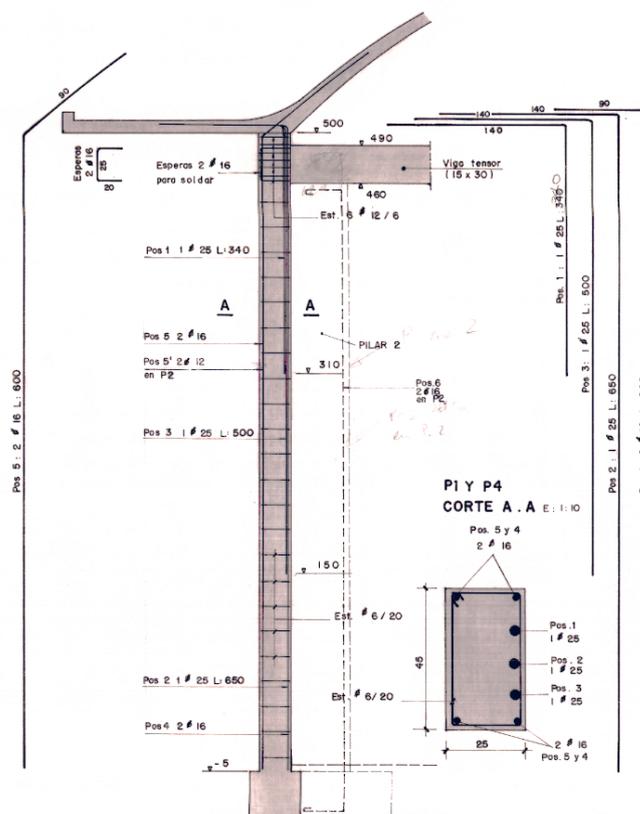


Imagen 6: Pilar 1-2-4 Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)²¹

²¹ Centro de Documentación e Información del Instituto de Historia de la Arquitectura. FADU, Udelar.
CDI, IHA.2020 (CDI, IHA.DIPA.M2. T28-b)

Finalmente, los pilares 3 tienen como característica fundamental la desaparición del tirante y a su vez para contrarrestar dicha perdida, un canto variable en dirección transversal a la nave que abarca desde la cabeza del pilar (35 x 45 cm) a la cimentación (150 x 45 cm). (Imagen 8)

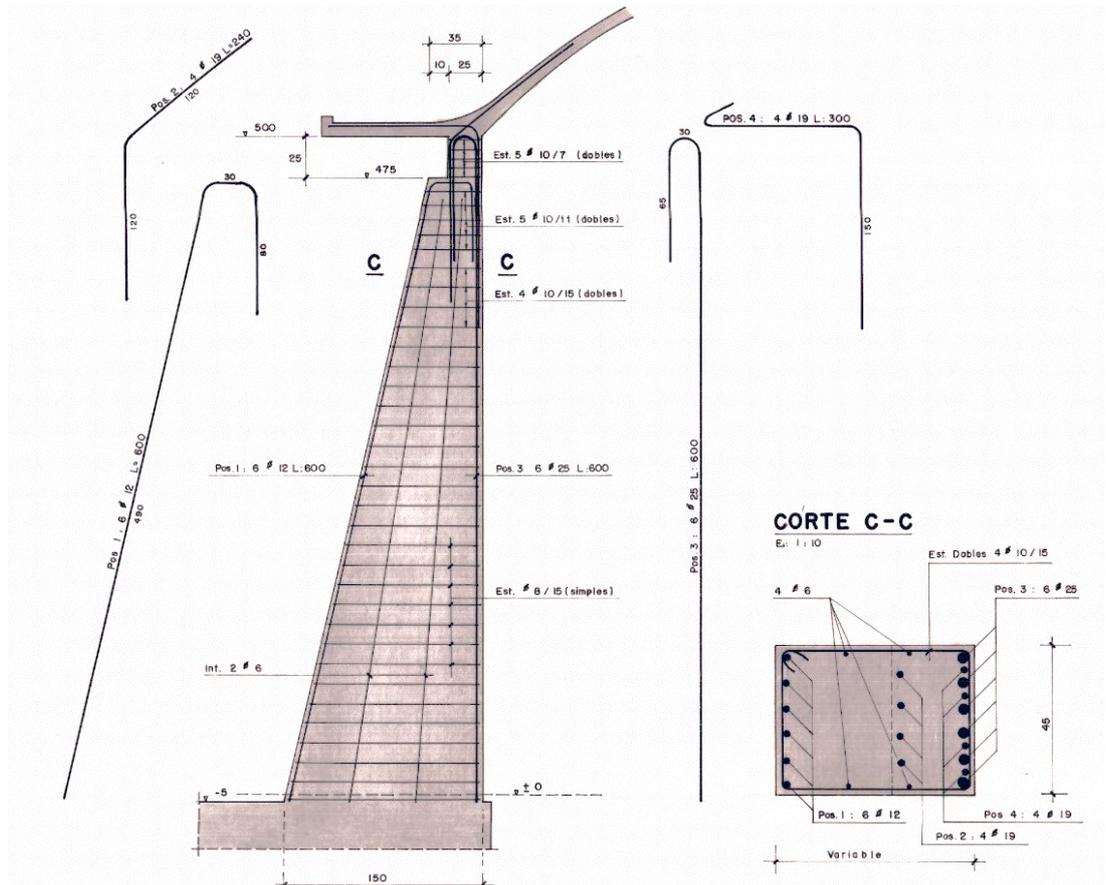
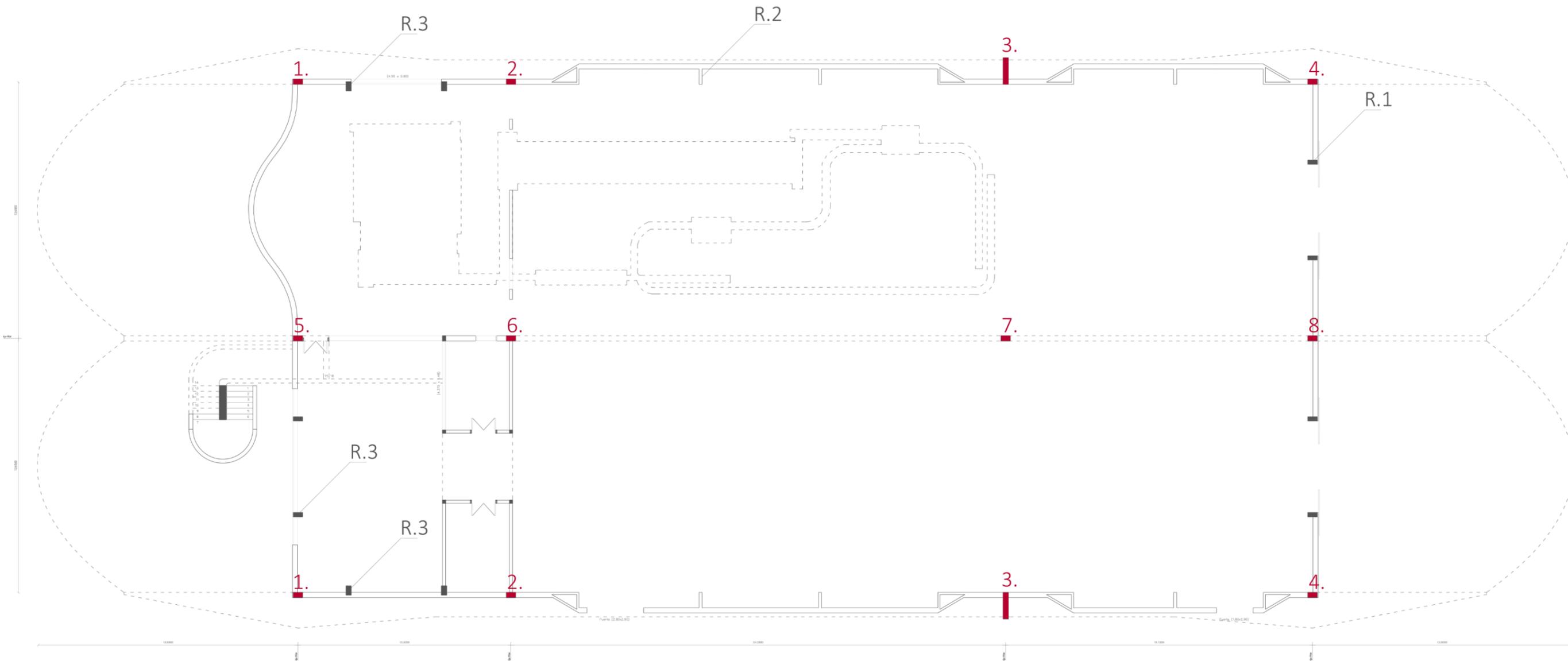


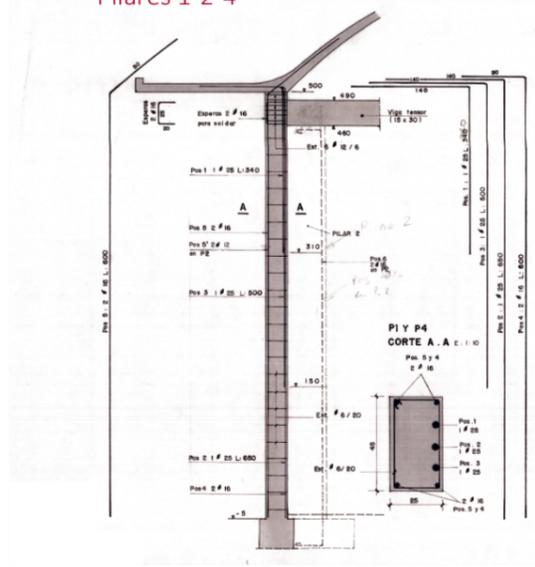
Imagen 8: Pilar 3 Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez²³)

Por último comentar que el retranqueo de 10 cm que sufre la cabeza del pilar en la unión con la bóveda permite disminuir la resistencia a flexión y posibilita los giros, igualando la rigidez a la del resto de pilares.

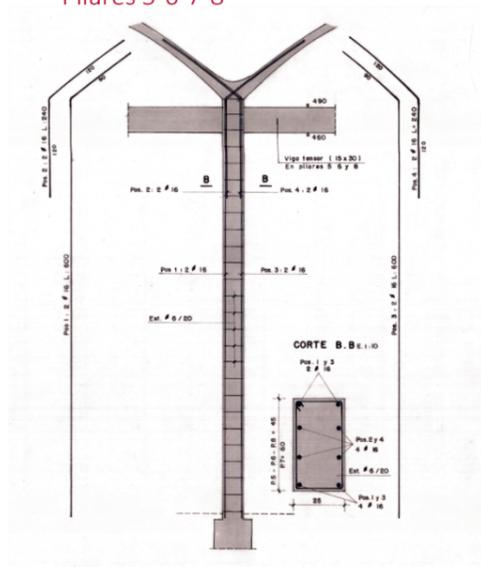
²³ Centro de Documentación e Información del Instituto de Historia de la Arquitectura. FADU, Udelar. CDI, IHA.2020 (CDI, IHA.DIPA.M2. T28-b)



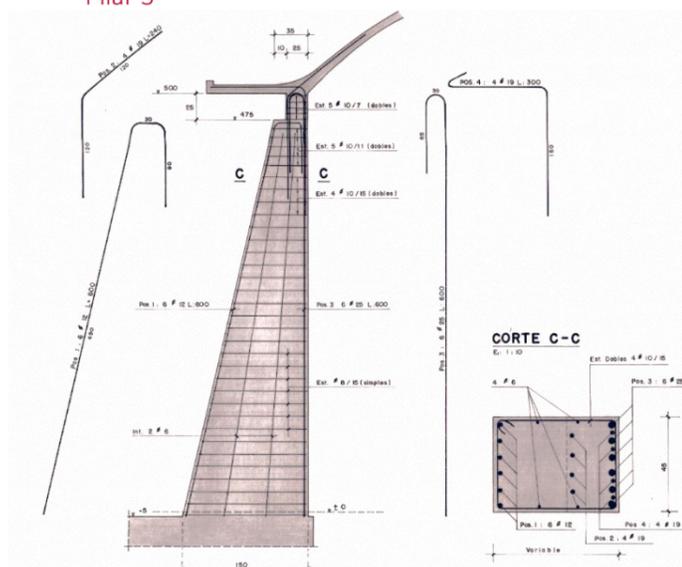
Pilares 1-2-4



Pilares 5-6-7-8



Pilar 3



LEYENDA :

- Refuerzo Estructural de primer orden (Sujeción de la bóveda)
- R.1 Refuerzo Estructural de hormigón contra viento y anclaje de puertas correderas
- R.2 Refuerzo de fábrica contra viento
- R.3 Refuerzo Estructural de hormigón contra viento y anclaje de ventanas

Tras las consideraciones comentadas anteriormente, se procede a realizar un modelo tridimensional en AutoCAD sobre los planos de la fábrica. Las propiedades de cada material se insertan a partir de una expansión del programa Angle sobre la ventana de AutoCAD. (Imagen 9)

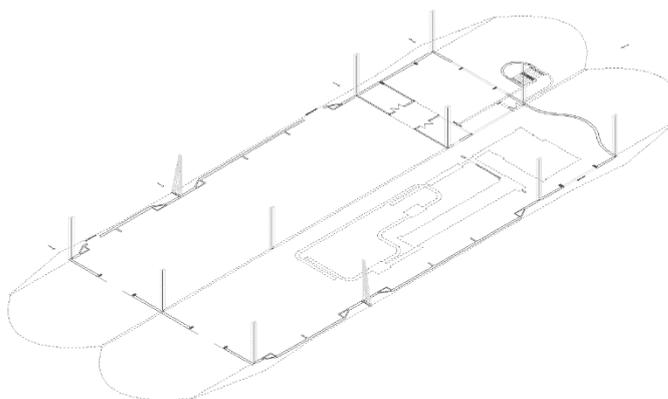


Imagen 9: Axonometría proceso de modelado

5.2.2 Vigas y Tirantes.

Las vigas de borde de la fábrica FAGAR nacen de la unión entre la bóveda y los pilares hacia el exterior con un ámbito variable (1,5 m en la unión con los pilares extremos y 1,0 m entre pilares). A su vez en el vuelo de las bóvedas la viga de borde disminuye su ámbito hasta los 10 cm al final de la unión. Controlan la deformabilidad del borde libre de la lámina (imagen 10)

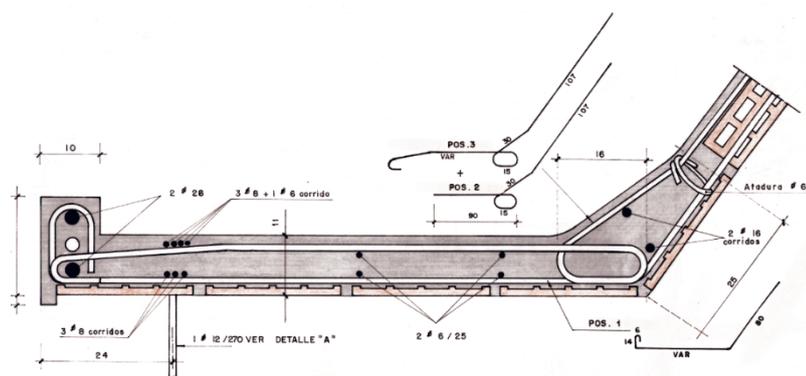


Imagen 10: Viga de Borde, Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)²⁴

²⁴ Centro de Documentación e Información del Instituto de Historia de la Arquitectura. FADU, Udelar.
 CDI, IHA.2020 (CDI, IHA.DIPA.M2. T28-b)

Por otro, lado los tirantes están formados por un torón situado siguiendo la gráfica de momentos debidos al peso propio del elemento de hormigón, con un recubrimiento de hormigón (15 x 30 cm) y enlazan 3 de los 4 pórticos, cubriendo una longitud de 12,5 m de luz entre pilares. (imagen 11)

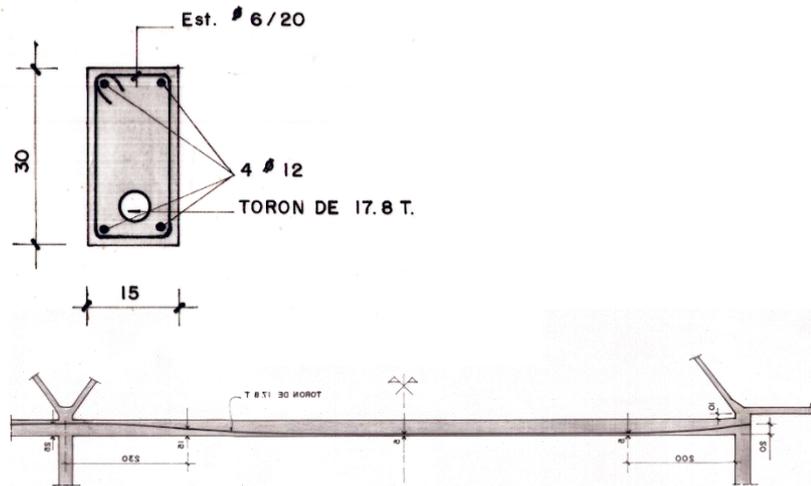


Imagen 11: Viga Tensor, Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez²⁵)

Por último, la viga central que se sitúa en la limahoya tiene la función de concentrar las tensiones derivadas de la unión de las dos bóvedas. (imagen 12)

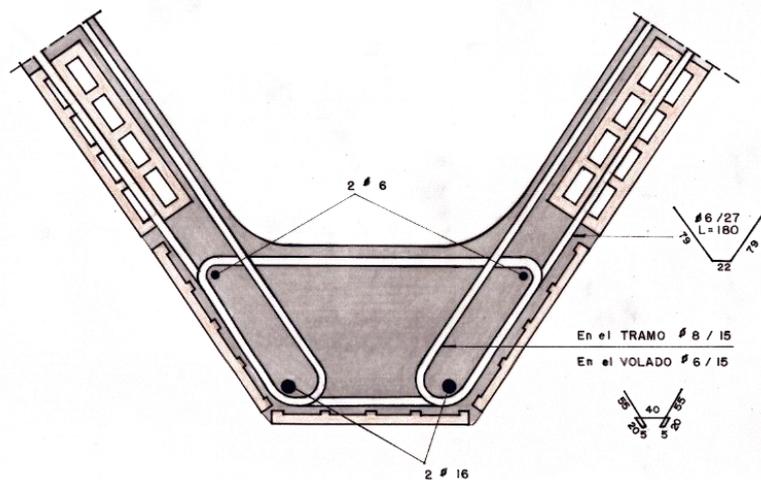
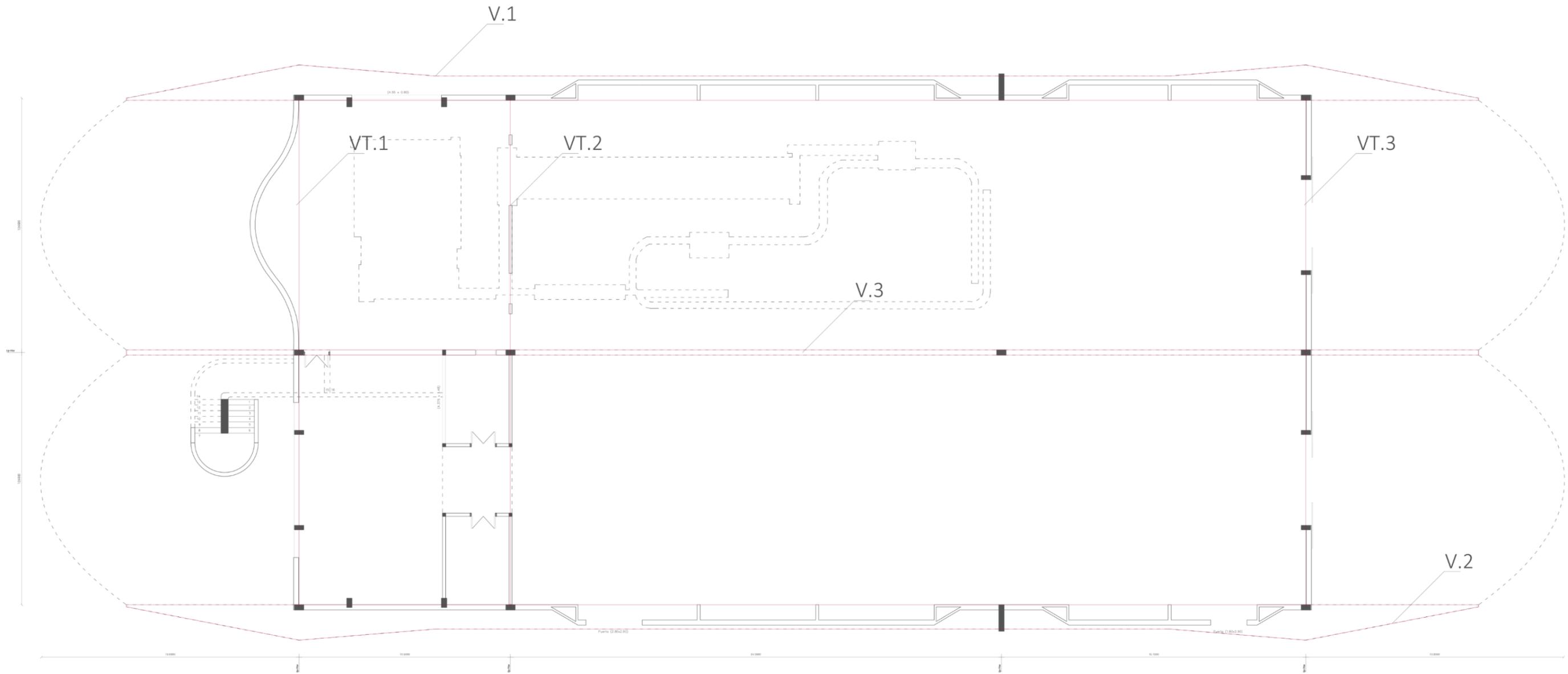


Imagen 12: Viga Central, Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez²⁶)

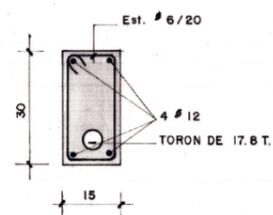
²⁵ Centro de Documentación e Información del Instituto de Historia de la Arquitectura. FADU, Udelar.

CDI, IHA.2020 (CDI, IHA.DIPA.M2. T28-b)

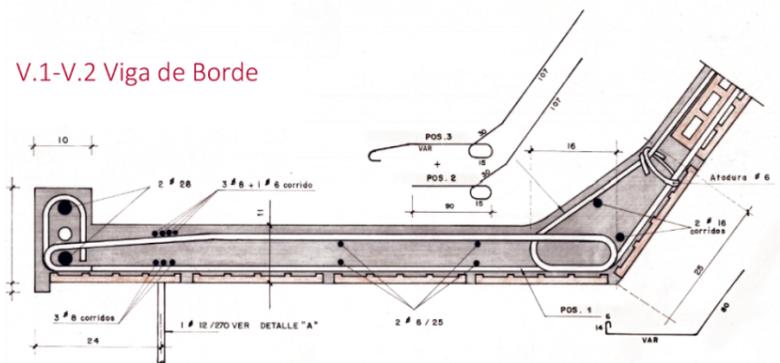
²⁶ Ibid.



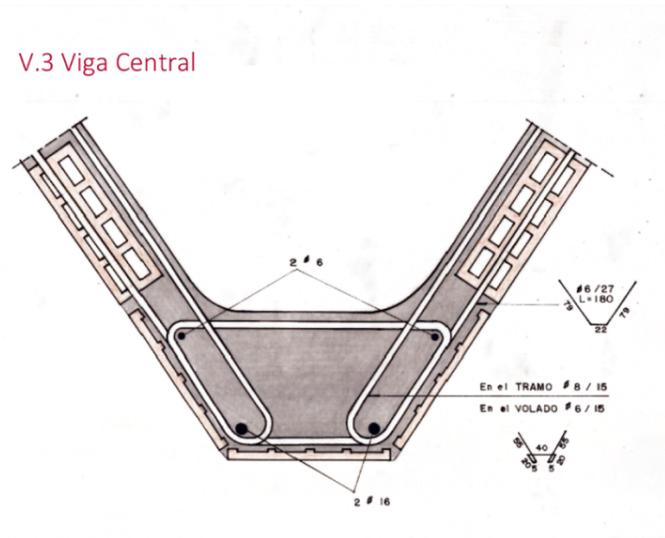
VT Viga Tensor



V.1-V.2 Viga de Borde



V.3 Viga Central



LEYENDA :

- V.1 Viga de Borde Este
- V.2 Viga de Borde Oeste
- V.3 Viga Central
- VT Viga Tensor

A partir del plano resumen mostrado anteriormente se prosigue modelizando los elementos estructurales citados a partir de comandos específicos del programa Angle, mallando todas las superficies para analizar la respuesta del conjunto de las vigas.

A su vez, los tirantes se modelizan como una viga de hormigón armado como se muestra en la imagen 11. (Imagen 13)

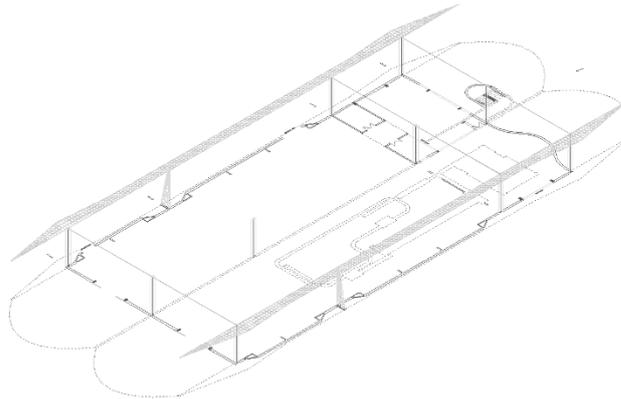


Imagen 13: Axonometría proceso constructivo Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)

5.2.3 La Bóveda

La bóveda está compuesta por piezas cerámicas huecas (25x25x7,5 cm) que conforman la lámina de curvatura simple, unidas con mortero a un armado formado por redondos de acero liso colocado entre juntas para absorber los esfuerzos a flexión de la membrana en sentido longitudinal. A este conglomerado de ladrillo y acero se le suma una pequeña capa de mortero como capa de compresión.

Para su modelización, se ha creado un nuevo material que unifique las propiedades de los elementos que lo conforman; hormigón armado y fábrica de ladrillo.

Propiedades Materiales Angle:	HA-16	HA-25	HA-30	Fábrica-L	Fábrica armada
Módulo E(N/mm ²)	25000	31000	32000	6000	15500
Coefficiente de Poison	0.2	0.2	0.2	0.25	0.225
Módulo G trans. (N/mm ²)	12082	12916	13333	2400	7241
Densidad (Kg/m ³)	2500	2500	2500	1800	2150
Coef. dilatación térmica (m/m°C)	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001

Imagen 14: Promedio de materiales, Fuente: Elaboración propia

Tras recopilar las propiedades de distintos materiales se realiza un promedio entre el hormigón armado HA-16 y la fábrica de ladrillo para, de manera aproximada, proporcionar al nuevo material las características más correctas posibles. (imagen 14)

Para la modelización de la bóveda, previamente se estudia gráficamente las posibilidades geométricas dada la falta de información en los planos originales. Las hipótesis para analizar son la parábola y la catenaria.

En primer lugar, gráficamente a través de la plataforma GeoGebra se analiza la posibilidad de una superficie parabólica, que aun siendo semejante no se adapta completamente. (imagen 15)

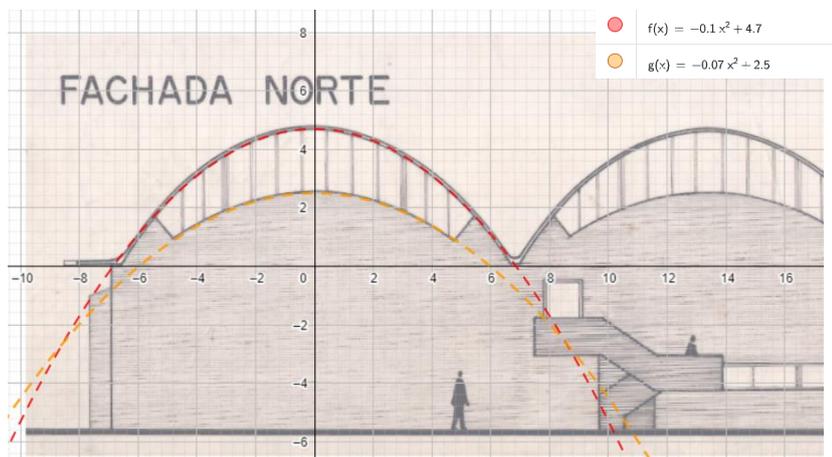


Imagen 15: Ilustración de dos Parábolas sobre la fachada de la fábrica FAGAR (Eladio Dieste y Eugenio Montañez) Programa: GeoGebra.

Seguidamente, se pretende realizar un estudio comparativo de las trayectorias de ambas curvas a lo largo de los 6,5 metros (mitad de la luz de la bóveda). Para la obtención de una equiparación lo más aproximada posible se han estimado una serie de 25 puntos a una distancia de 0,25 m

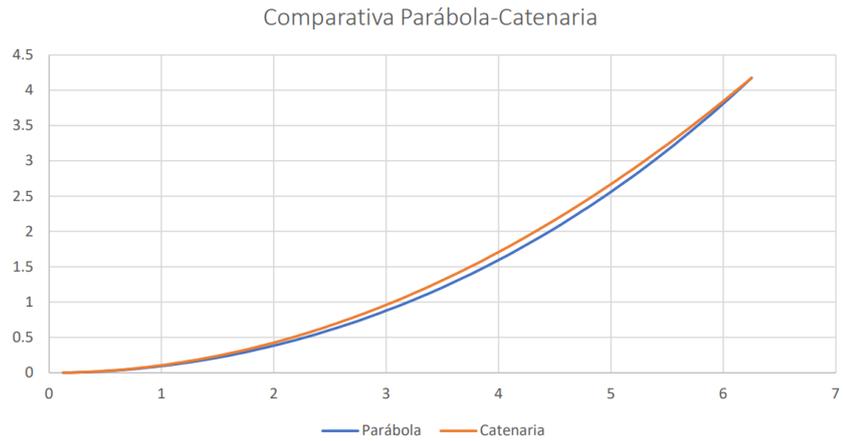


Imagen 17: Comparativa entre curva Catenaria y Parabólica. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, después de todo lo analizado y a través del estudio de obras semejantes de Eladio Dieste se propone la curva catenaria como superficie definitiva dadas la implicaciones de absorción del peso propio que contiene dicha geometría²⁷, la cual se detalla a continuación las medidas concretas (Imagen 18).

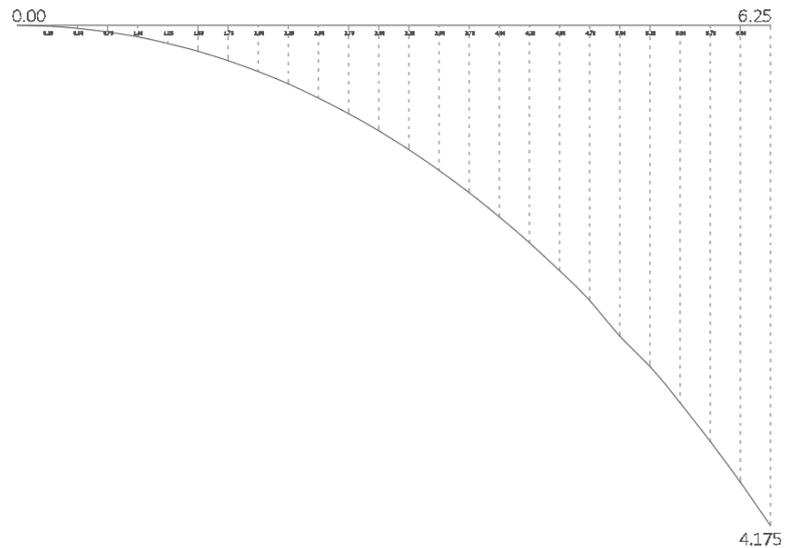


Imagen 18: Detalle de la curva Catenaria. Fuente: Elaboración propia

Como conclusión se modeliza la la bóveda (imagen 19) a través del detalle anteriormente expuesto.

²⁷ Engel, H. (2001). Sistemas de estructuras= Sistemas estruturais. Barcelona: Gustavo Gili.

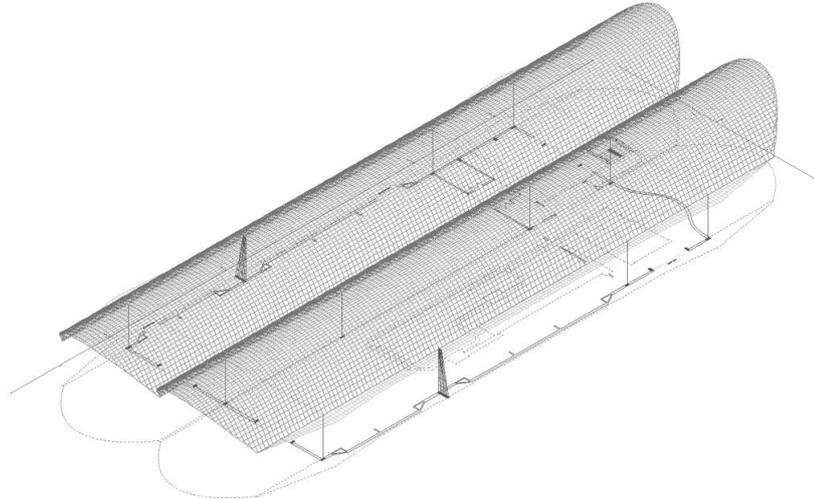


Imagen 19: Axonometría proceso constructivo Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)

5.2.4 Cerramiento

El cerramiento formado por fábrica de ladrillo se compone por una estructura independiente de la principal, arriostrada por pilares de hormigón armado y contrafuertes de fábrica se eleva hasta una altura de 4.3 m, dejando una holgura de 70 cm para la carpintería. De esta manera se independiza de la estructura principal soportando los esfuerzos laterales del viento. (Imagen 20)

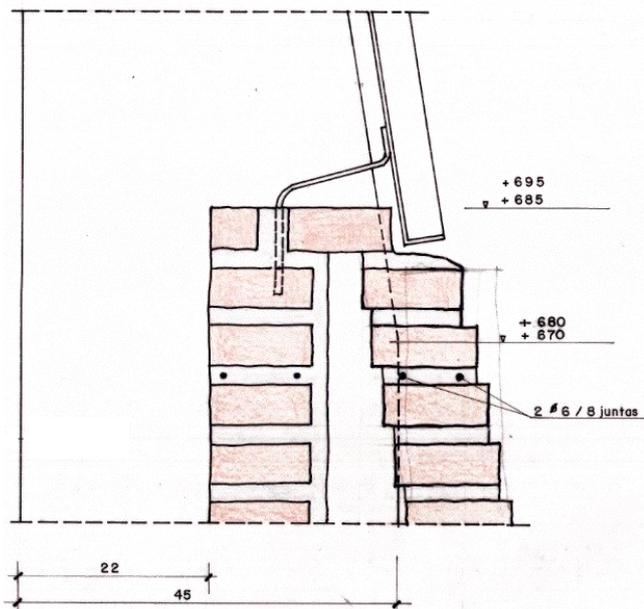


Imagen 20: Detalle de anclaje de Carpintería en el cerramiento, Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)²⁸

²⁸ Centro de Documentación e Información del Instituto de Historia de la Arquitectura. FADU, Udelar.

A su vez, los pilares de hormigón se utilizan como piezas de anclaje de las puerta correderas traseras y de las vidrieras de las fachadas norte y sur.

Para la modelización del cerramiento se ejecutan unas barras de hormigón armado de canto constante (25 x 45 cm) como arriostramiento de la fachada acompañado de un perímetro de fábrica de ladrillo tradicional de 25 cm de espesor. (Imagen 21)

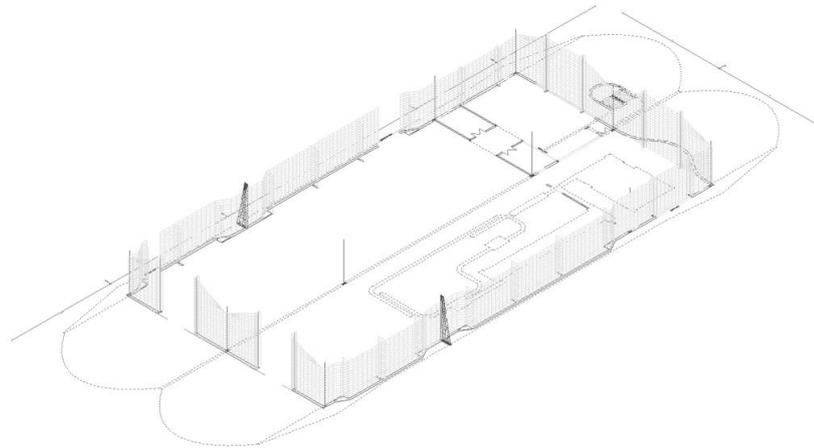


Imagen 21: Axonometría proceso constructivo Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)

5.3 Postesado

El Postesado es la acción por la cual se somete a un material a esfuerzos de compresión por medio de armaduras activas. Es una modalidad de hormigón pretensado donde las armaduras se tensan una vez que el hormigón obtiene una resistencia característica.²⁹

Como se muestra en el Anexo A (Pág III), varios elementos estructurales están postesados a partir de torones metálicos de 17.8 T, por lo que para aproximar más el modelo a la realidad se utilizará un extensión del programa *Angle, Postesat*, para introducir las cargas resultantes del postesado.

5.3.1 Postesado Viga Tensor.

Cada Viga tensor, como se puede ver en la Imagen 11, esta postesado con un torón de 17,8 T (aproximadamente 178 kN), por lo que se procede a modelizar los esfuerzos trazando un cable a lo largo de la viga e introduciendo las cargas pertinentes. (Imagen 22)

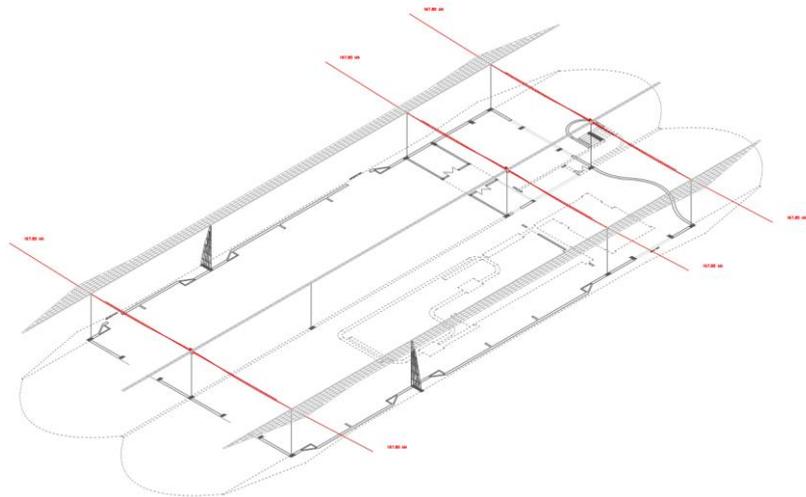


Imagen 22: Axonometría proceso constructivo Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)

²⁹ Francisco Orts Borrás, "Aplicación Del Hormigón Postesado En Edificación," February 9, 2012, <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/14659>.

5.3.2 Postesado Viga de borde.

La viga perimetral de borde está pretensada, como se puede ver en el anexo A y la imagen 10, por un torón de 17,8 T colocado en el borde exterior de la viga. Por ello se modeliza a través de polilíneas en la misma posición. (Imagen 23)

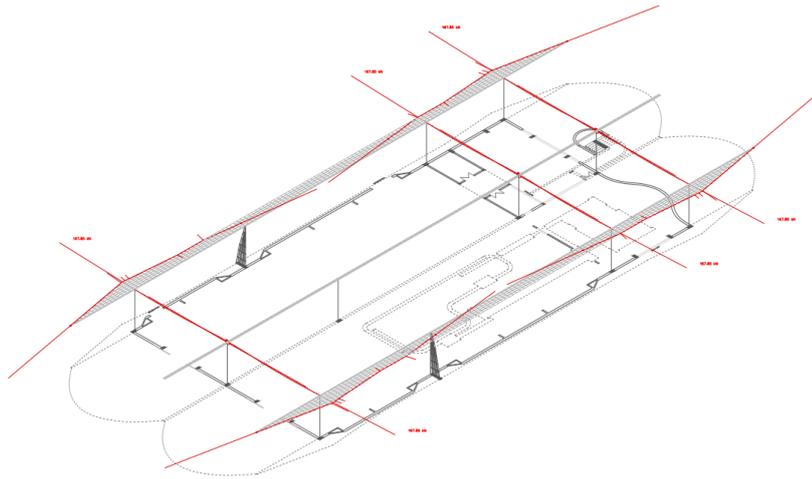


Imagen 23: Axonometría proceso constructivo Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)

5.3.3 Postesado viga Central

Como se puede ver en el Anexo A, la viga central a la vez que el intrados de las vigas planas están armadas con 4 torones de 17,8 T cada uno y con longitudes distintas. Por tanto su modelización se realizará a través de polilíneas rectas con sus respectivas longitudes. (Imagen 24)

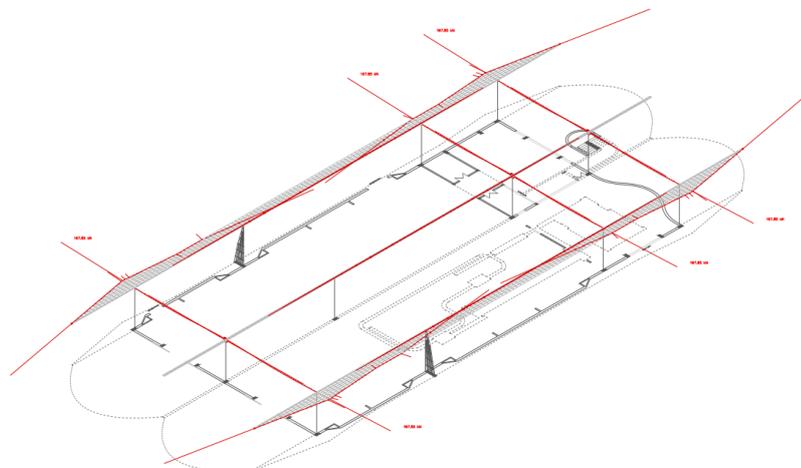


Imagen 24: Axonometría proceso constructivo Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)

5.3.4 Postesado Bóveda

El postesado longitudinal de la bóveda está compuesto por 6 torones de 17,8 T cada uno situados en los extremos de la cumbre de la cubierta. Mientras el postesado transversal se basa en 6 filas de torones de 17,8 T a cada lado, situando 2 en los voladizos y 4 en la parte central de la bóveda.

La modelización se realiza mediante polilínea para el armado longitudinal y *spline* para el transversal. (Imagen 25)

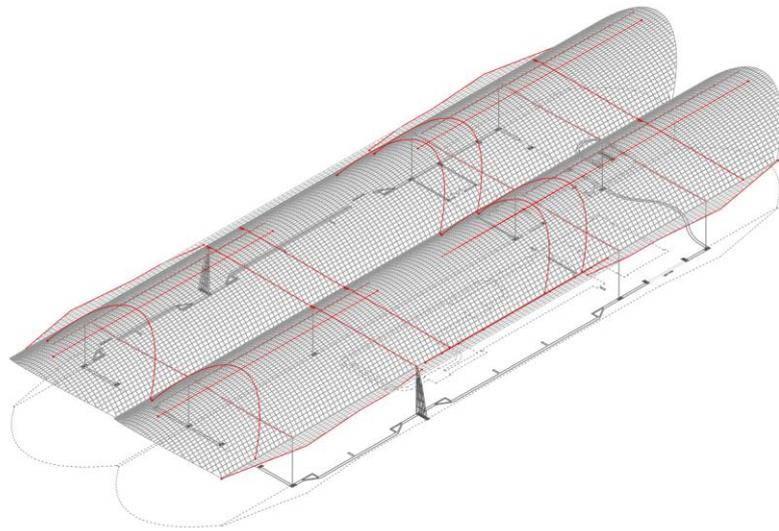


Imagen 25: Axonometría proceso constructivo Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)

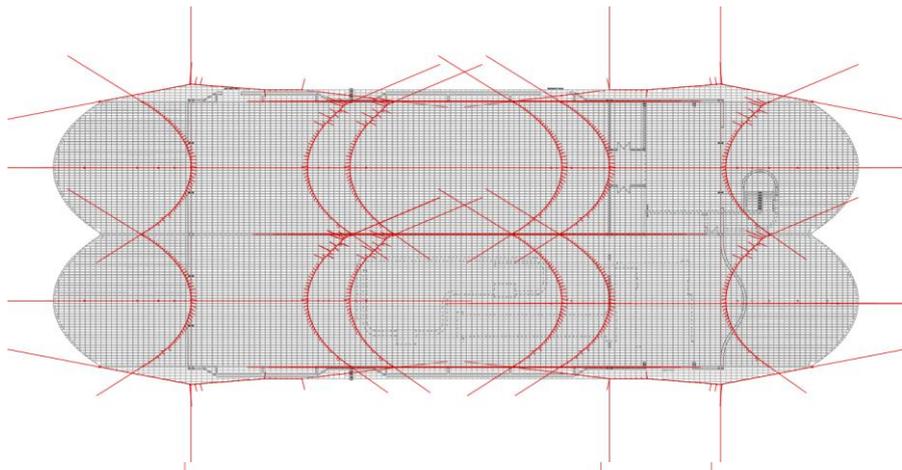


Imagen 26: Representación de las acciones derivadas al postesado en planta, Fábrica FAGAR (Eladio dieste y Eugenio Montañez)

5.4 Asignación y evaluación de cargas

Tras finalizar ambos modelos se prosigue a evaluar las cargas a las que está sometido el edificio. Esta evaluación se realiza según lo establecido en el Documento Básico SE-AE del CTE (Seguridad estructural y acciones en la edificación), con el que se aproximan los valores reales.

Las cargas a evaluar se dividen entre permanentes y variables, con sus valores en kN/m^2 , por lo que se introducirán como cargas superficiales sobre los elementos finitos de la cubierta.

5.4.1 Cargas permanentes.

Como carga permanente se considera el peso propio de la cubierta el cual se asigna automáticamente por el programa Architrave.

5.4.2 Cargas variables

En cuanto a la **Sobrecarga de uso**, según la tabla 3.1 del DB SE-AE se toma como valor 1 kN/m^2 en un área tributaria no menor a 10 m^2 en 3 puntos de la cumbrera dado que no se prevé ningún uso por ser una cubierta inaccesible con subcategoría G1⁽⁷⁾.

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⁾⁽⁵⁾	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Fuente: Documento Básico, Seguridad estructural, Acciones en la edificación, CTE.

⁽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 $3,0 \text{ kN/m}^2$ para el cálculo de elementos secundarios, como nervios o viguetas, doblemente apoyados, de $2,0 \text{ kN/m}^2$ para el de losas, forjados reticulados o nervios de forjados continuos, y de $1,0 \text{ kN/m}^2$ 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_k 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/m^2 .

⁽⁶⁾ Se puede adoptar un área tributaria inferior a la total de la cubierta, no menor que 10 m^2 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.

La **sobrecarga de Viento** se establece según la norma como acciones perpendiculares a la superficie de elementos finitos de la cubierta con valor: $Q_e = q_b * c_e * c_p$

Para el valor de la **Presión Dinámica (q_b)** de forma simplificada se adopta el valor $q_b = 0,50 \text{ kN/m}^2$ según el DB SE-AE.

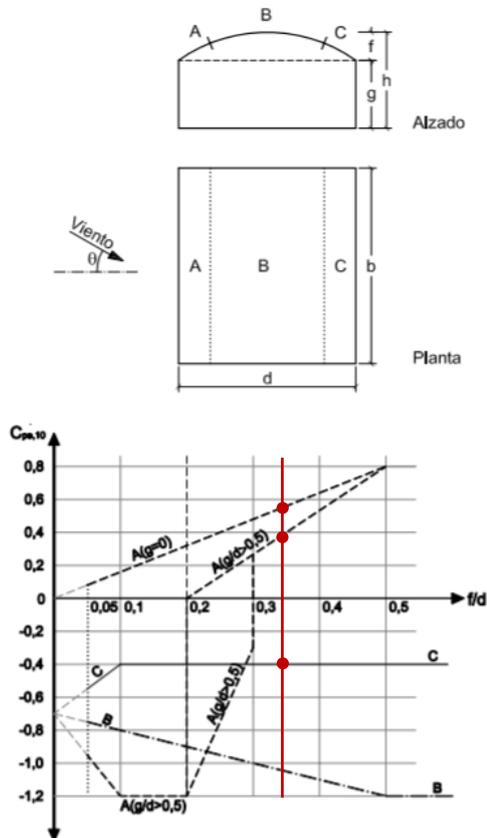
Para la obtención de los valores del **Coefficiente de Exposición (c_e)** se utiliza la tabla 3.4 del DB SE-AE y dado que la cubierta abarca desde los 5,5 m hasta los 9,5 m de altura se establece el valor más desfavorable correspondiente a un grado de aspereza del entorno II. Por lo cual $c_e = 2.7$

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

Fuente: Documento Básico, Seguridad estructural, Acciones en la edificación, CTE.

Para obtener el valor del Coeficiente de Presión (C_p) se utiliza la tabla D.12 de cubiertas cilíndricas, la cual subdivide la cubierta en distintas franjas con valores concretos, por lo que se reinterpreta el gráfico adjunto a la tabla en la cubierta a analizar.

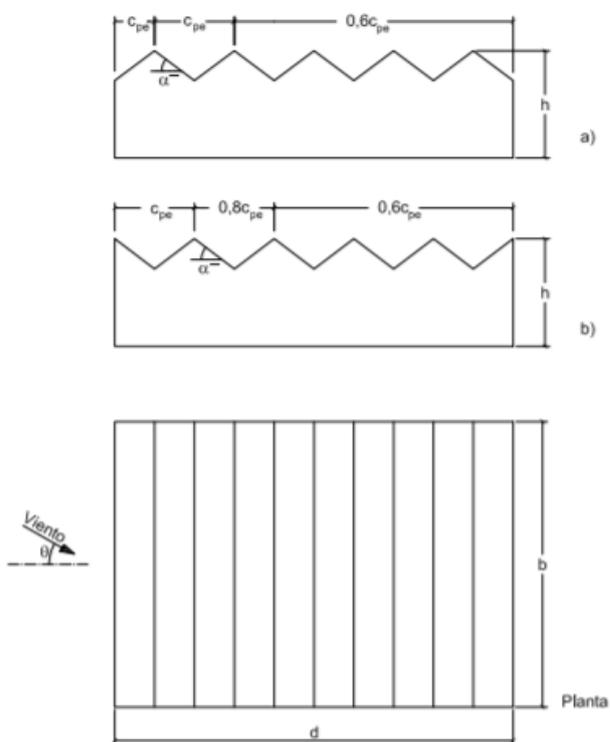


Fuente: Documento Básico, Seguridad estructural, Acciones en la edificación, CTE.

Dado un ancho de la nave $d = 12,5$ m, una altura total $h = 9,26$ m y una altura hasta el inicio de la bóveda de $g = 5$ m, se obtienen los siguientes factores y sus correspondientes valores del coeficiente de presión:

$$F = 4,26, f/d = 0,34, g/d = 0,40$$

Por último, siendo el edificio de estudio un conjunto formado por varias naves, se puede presuponer una reducción de la presión ejercida por el viento a través de la tabla D.9 del DB SE-AE.



Fuente: Documento Básico, Seguridad estructural, Acciones en la edificación, CTE.

Para la obtención de los valores en la dirección perpendicular se han comparado los valores de la tabla D.6 de cubiertas a dos aguas, y la tabla D.10 de marquesinas a un agua.

Finalmente se ha elaborado una solución donde se combina la tabla D.10 para los voladizos (dada la mayor restricción que ofrece) y la tabla D.6 (En concreto la zona I) para el resto de la nave.

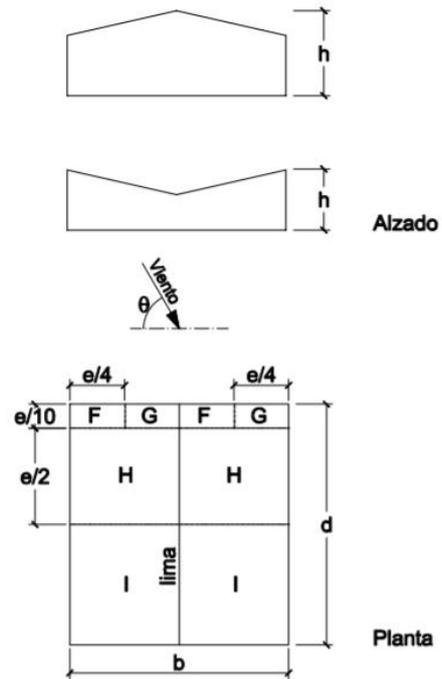


Tabla D. 6 Fuente: Documento Basico, Seguridad estructural, Acciones en la edificación, CTE.

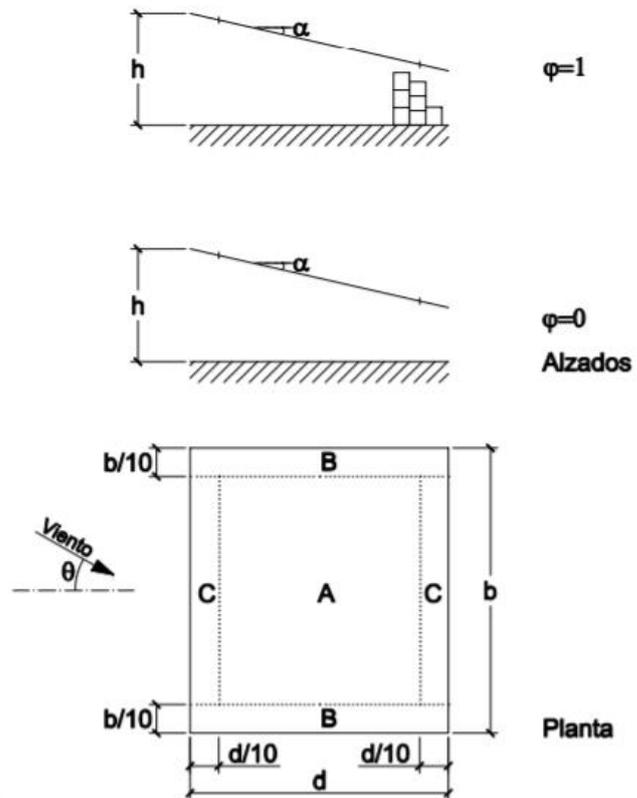


Tabla D. 10 Fuente: Documento Basico, Seguridad estructural, Acciones en la edificación, CTE.

Finalmente, se expone a continuación la representación de cada una de las franjas comentadas anteriormente en la cubierta de estudio como a su vez los valores para cada una de las zonas.

Dado que hay una reducción de la presión del viento en la segunda bóveda se opta por subdividir en 2 las franjas que sufren dicha reducción multiplicando el valor final por un coeficiente reductor.

Hipótesis 4 y 5 (dirección de viento: E-W)



Primera bóveda

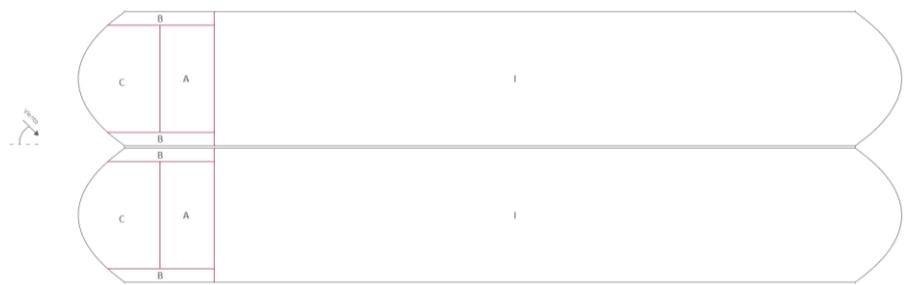
Zonas	Ámbito	Cpe	Ce	Qb	Qe
A	2.50	0.55	2.50	0.50	0.69
B	7.50	-1.10	2.70	0.50	-1.49
C	2.50	-0.40	2.50	0.50	-0.50

Segunda bóveda

Zonas	Ámbito	Cpe	Ce	Qb	Coef.	Qe
A	2.50	0.55	2.50	0.50	1.00	0.69
B1	3.75	-1.10	2.70	0.50	1.00	-1.49
B2	3.75	-1.10	2.70	0.50	0.60	-0.89
C	2.50	-0.40	2.50	0.50	0.60	-0.30

Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 6 y 7 (dirección de viento: N-S)



Ambas Cubiertas

Zonas	Ámbito	Cpe	Ce	Qb	Qe
A	9.90	-1.50	2.70	0.50	-2.03
B	1.25	-1.80	2.70	0.50	-2.43
C	9.90	-2.20	2.70	0.50	-2.97
I	12.50	-0.90	2.70	0.50	-1.22

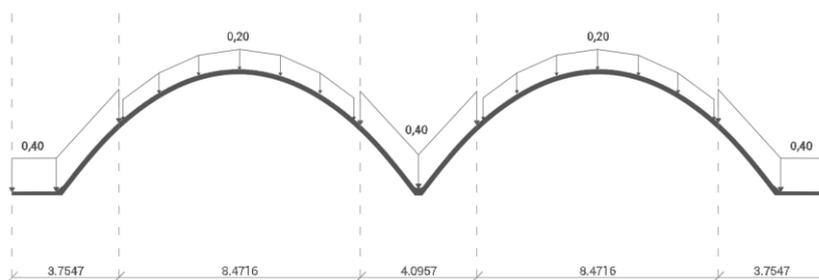
Fuente: Elaboración propia

La sobrecarga de nieve por unidad de superficie en proyección horizontal se puede tomar según el DB SE AE como:

$$Q_n = \mu * S_k$$

Dado que el edificio se sitúa cerca de Montevideo, se coloca como valor característico $S_k = 0,2 \text{ kN/m}^2$. Mientras, el coeficiente de forma será igual a 1 en las partes donde no haya impedimento al deslizamiento y 2 donde haya impedimento, en este caso en la limahoya entre naves y en el perímetro por la viga plana.

A continuación se expone un gráfico con los valores en cada una de las franjas:



Detalle Sobrecarga de nieve en Cubiertas. Fuente: Elaboración propia

5.4.3 Hipótesis de carga

- | | |
|--------------------|----------------------|
| Hipótesis 1: | Carga permanente |
| Hipótesis 2: | Sobrecarga de uso |
| Hipótesis 3: | Sobrecarga de nieve |
| Hipótesis 4,5,6,7: | Sobrecarga de viento |
| Hipótesis 8: | Postesado |

5.4.4 Combinaciones

El cálculo consiste en verificar que la estructura es resistente y segura. Para ello se debe comprobar que no se supera ninguno de los estados límite que llevarían a su colapso mientras esté sometida a las cargas evaluadas en el apartado anterior. Por lo tanto, se plantean diversas combinaciones de estas cargas utilizando las fórmulas que proporciona el DB SE.

ELU (Estados Límite Últimos): indican el valor límite que constituye riesgo para las personas. Según el DB SE las combinaciones en situaciones persistentes o transitorias son:

$$\sum (\gamma_G \cdot G_k) + (\gamma_P \cdot P) + (\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}) + \sum (\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} + Q_{k,i})$$

ELS (Estados Límite de Servicio): Indican el valor límite que afectan al bienestar de los usuarios y al correcto funcionamiento del edificio. Las combinaciones resultantes son:

$$\sum G_k + Q_{k,1} + P + \sum (\psi_{0,i} + Q_{k,i})$$

Los coeficientes de seguridad se obtienen de las tablas 4.1 y 4.2 del DB SE del CTE:

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	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

Tabla 4.1 Fuente: Documento Básico, Seguridad estructural, Acciones en la edificación, CTE.

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	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.

Tabla 4.2 Fuente: Documento Básico, Seguridad estructural, Acciones en la edificación, CTE.

Combinaciones ELU:

		HIP_01	HIP_02	HIP_03	HIP_04	HIP_05	HIP_06	HIP_07	HIP_08
ELU_01	Gavitorias	1.35	1.5	1.5					1
ELU_02		1.35	1.5	0.75					1
ELU_03		1.35	0	1.5					1
ELU_04	Perm+ UsoPrinc	1.35	1.5	0.75	0.9				1
ELU_05		1.35	1.5	0.75		0.9			1
ELU_06		1.35	1.5	0.75			0.9		1
ELU_07		1.35	1.5	0.75				0.9	1
ELU_08	Perm+ NievePrinc	1.35	0	1.5	0.9				1
ELU_09		1.35	0	1.5		0.9			1
ELU_10		1.35	0	1.5			0.9		1
ELU_11		1.35	0	1.5				0.9	1
ELU_12	Perm+VientoN-S Princ	1.35	0	0.75	1.5				1
ELU_13	Perm+VientoS-N Princ	1.35	0	0.75		1.5			1
ELU_14	Perm+VientoE-W Princ	1.35	0	0.75			1.5		1
ELU_15	Perm+VientoW-E Princ	1.35	0	0.75				1.5	1

Fuente: Elaboración propia.

Combinaciones ELS:

		HIP_01	HIP_02	HIP_03	HIP_04	HIP_05	HIP_06	HIP_07	HIP_08
ELS_1	Característica 1 (uso princ)	1	1	0.2	0.5				1
ELS_2		1	1	0.2		0.5			1
ELS_3		1	1	0.2			0.5		1
ELS_4		1	1	0.2				0.5	1
ELS_5	Característica 2 (nieve princ)	1	0	1	0.5				1
ELS_6		1	0	1		0.5			1
ELS_7		1	0	1			0.5		1
ELS_8		1	0	1				0.5	1
ELS_9	Característica 3 (viento princ)	1	0	0.2	1				1
ELS_10		1	0	0.2		1			1
ELS_11		1	0	0.2			1		1
ELS_12		1	0	0.2				1	1
ELS_13	Frecuente 1 (uso princ)	1	0	0	0	0	0	0	1
ELS_14	Frecuente 2 (nieve princ)	1	0	0.2	0	0	0	0	1
ELS_15	Frecuente 3 (viento princ)	1	0	0	0.5				1
ELS_16		1	0	0		0.5			1
ELS_17		1	0	0			0.5		1
ELS_18		1	0	0				0.5	1
ELS_19	Casi permanente	1	0	0	0	0	0	0	1

Fuente: Elaboración propia.

6.0 Análisis y Resultados.

Una vez asignadas las cargas, los modelos se introduce en el programa *Angle* para calcular los esfuerzos que se generan en cada uno de los elementos que conforman el edificio. Ejecutando el cálculo, se procede a analizar los resultados obtenidos para comprender el funcionamiento de la estructura.

Observando los esfuerzos y deformaciones que se producen en cada elemento, se busca identificar tanto las combinaciones como las partes más significativas a analizar en el comportamiento general de la estructura.

Los gráficos que se muestran a continuación corresponden únicamente al modelo con el sistema de ejes del plano base (Pág 25), mientras el anexo B muestra una comparativa entre los dos modelos.

6.1 Combinaciones Utilizadas.

Previamente al análisis, se comprueba que los datos y coeficientes de las cargas están correctamente introducidos en el programa y se seleccionan las combinaciones más desfavorables.

ELU 01 (Persistente: Gravitatoria Uso): Para comprobar las resistencia de los materiales mediante las tensiones y esfuerzos que se generan. Es una combinación del lado de la seguridad puesto que no tienen coeficientes de combinación.

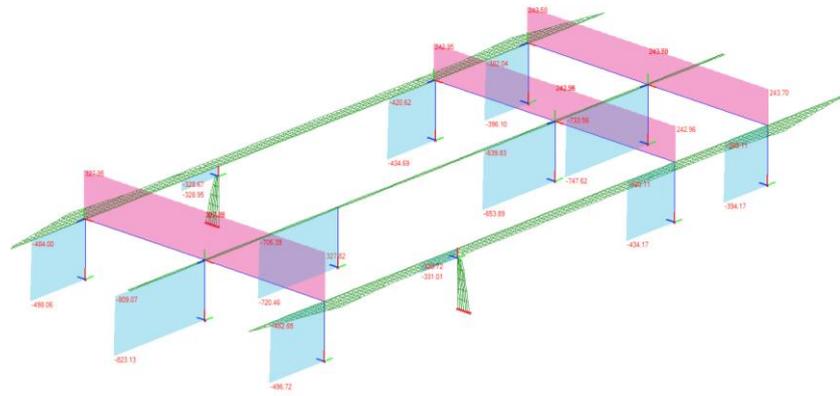
$$1,35*HIP_01 + 1,5*HIP_02 + 1,5*HIP_03 + 1*HIP_08$$

ELS 01 (Característica: Gravitatoria Uso): Para comprobar las deformaciones y desplazamiento de los elementos.

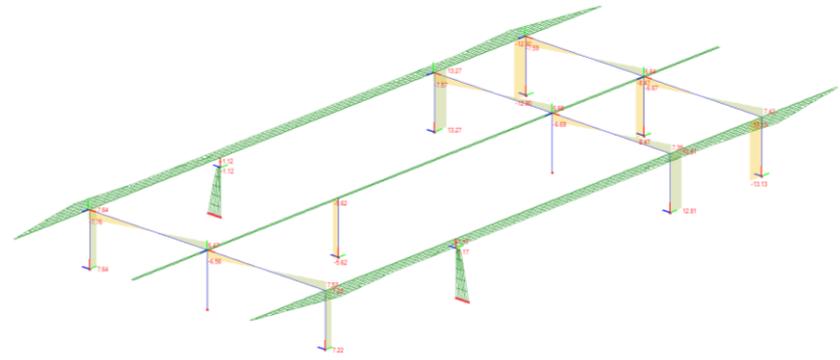
$$1*HIP_01 + 1*HIP_02 + 0,2*HIP_03 + 0,5*HIP_04 + 1*HIP_08$$

6.2 Análisis de Resistencia: ELU_01

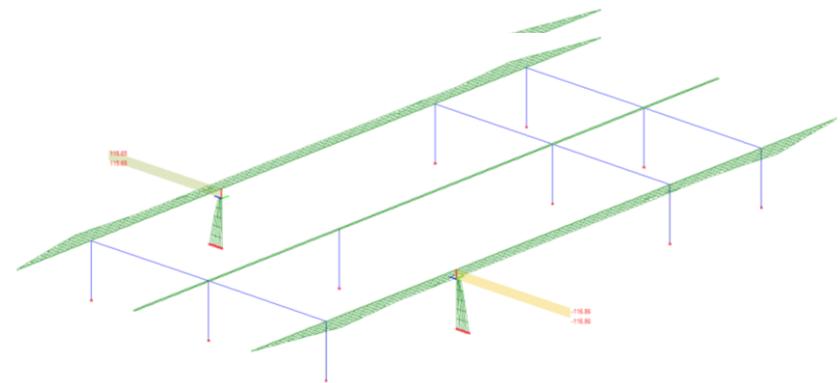
6.2.1 Barras



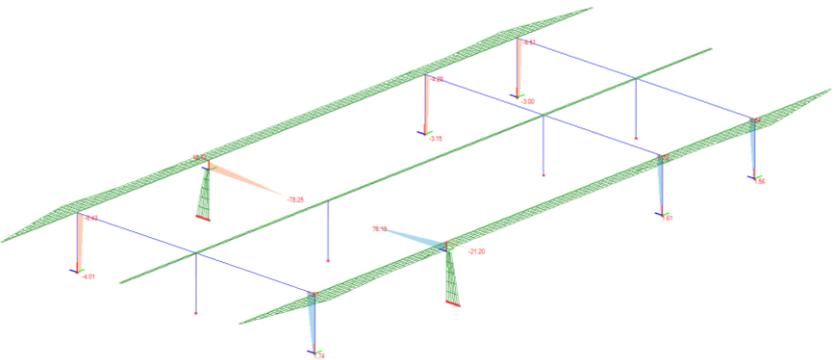
Axil



Cortante eje Y

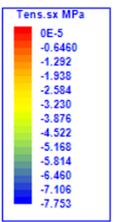
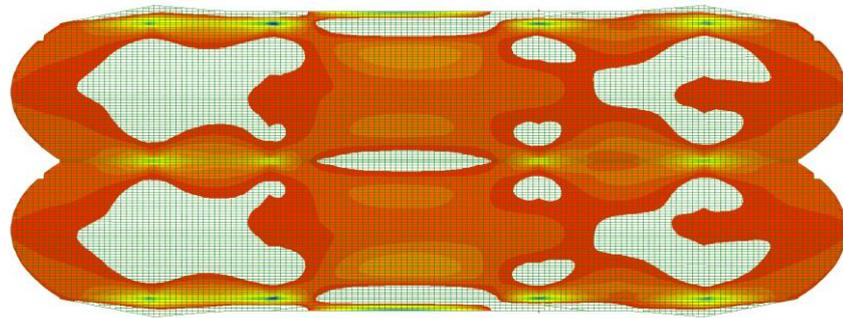


Cortante eje Z

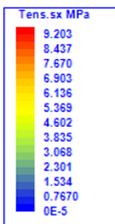
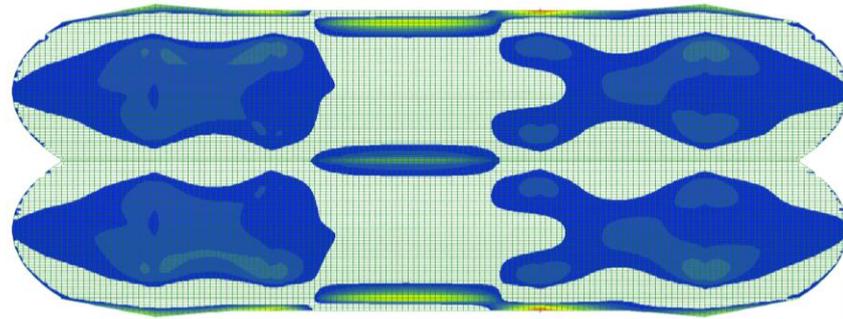


Momento eje Y

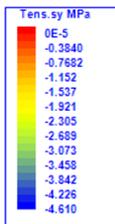
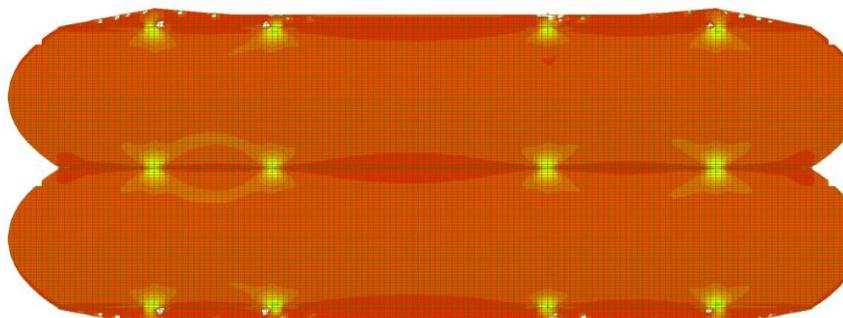
6.2.3 Bóveda



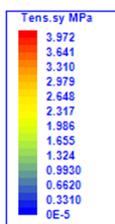
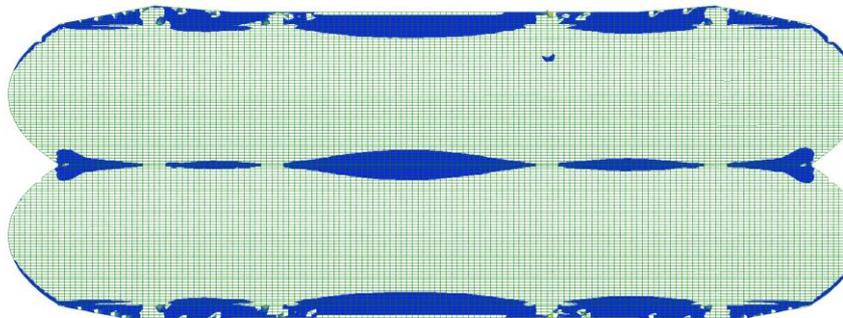
Sx. Compresión



Sx. Tracción



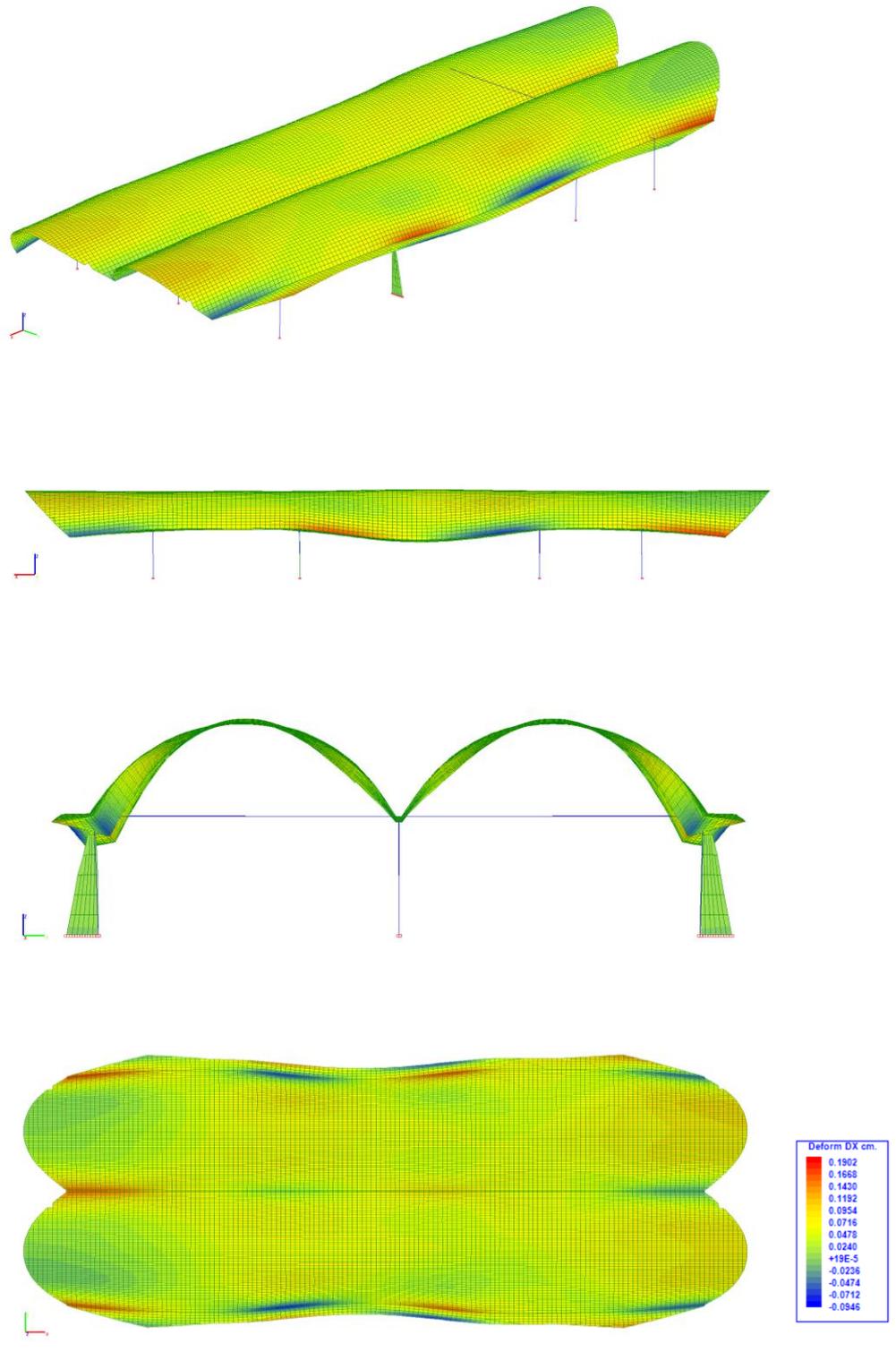
Sy. Compresión



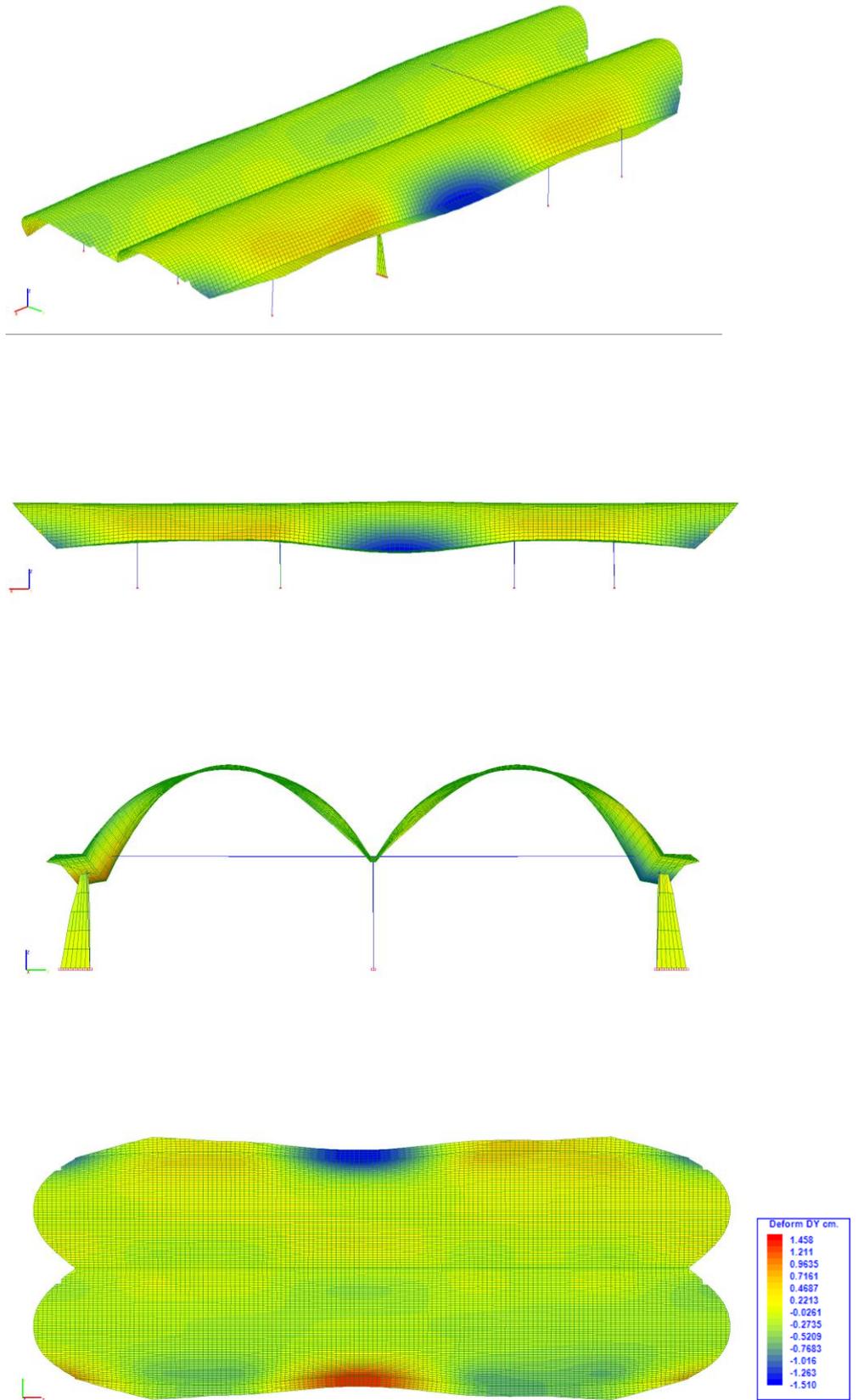
Sy. Tracción

6.3 Análisis de Deformaciones: ELS_01

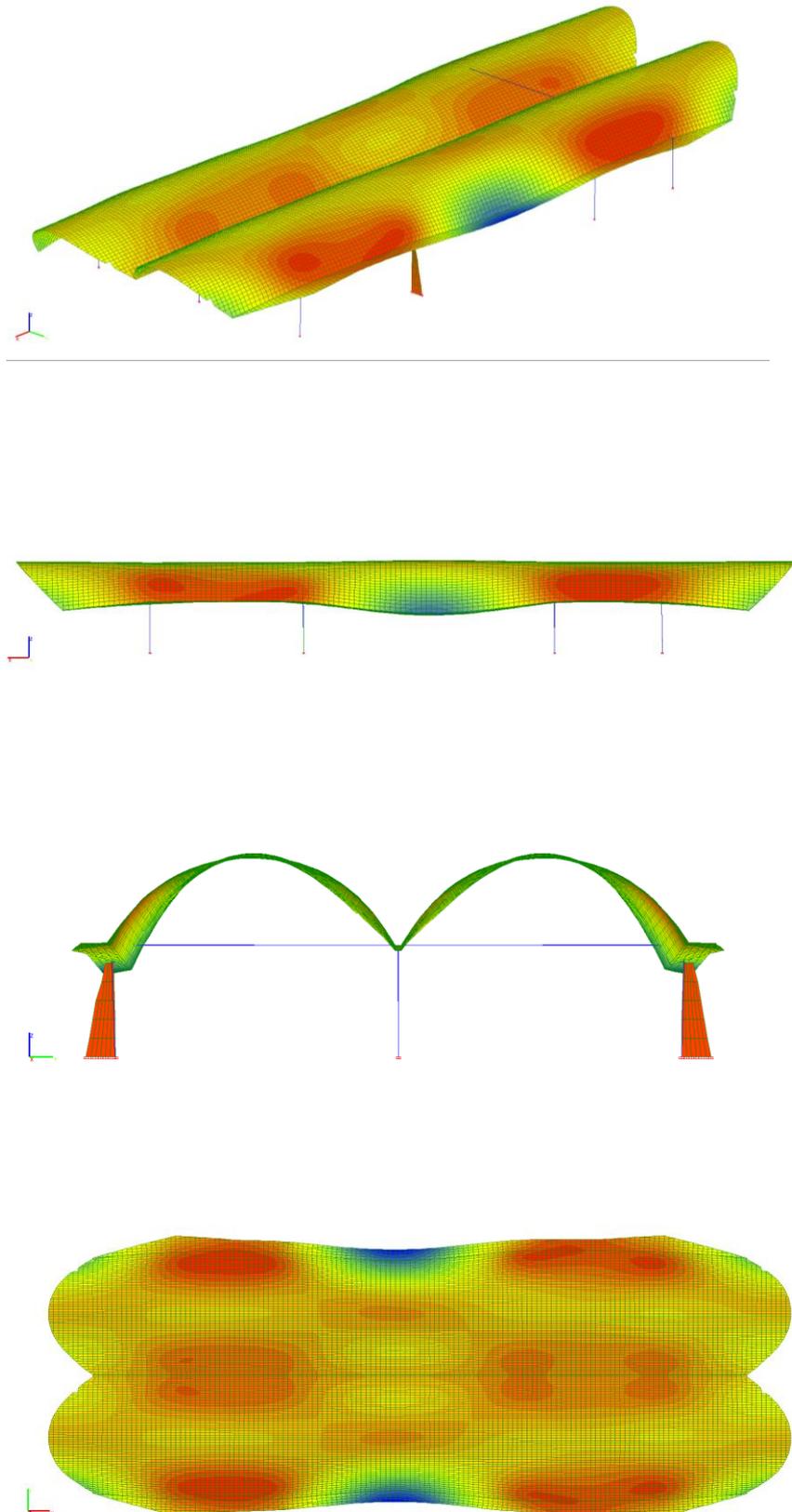
6.3.1 Deformaciones eje X



6.3.2 Deformaciones eje Y



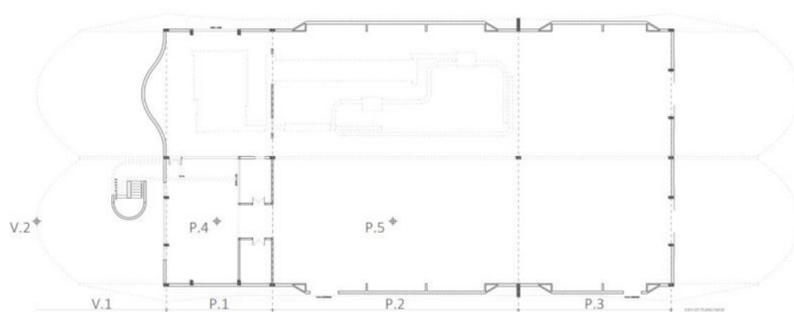
6.3.3 Deformaciones eje Z



6.3.4 Comprobaciones de flechas y desplazamientos horizontales

Para el análisis de las deformaciones se tomará como referencia los valores límite expuestos en el apartado de Flechas y desplazamientos horizontales del documento básico de seguridad estructural del CTE.

Para el cálculo de las flechas se toma como valor más desfavorable $L/500$, con el cual se comparan los valores de deformaciones en el eje Z mostrados en las gráficas anteriores.



Plano Base con la selección de los puntos de comprobación.

Dirección longitudinal (Centro de vano entre pilares)

Modelo 1	V.1	P.1	P.2	P.3
L=	12.5	10.5	24.3	15.5
LUZ admisible	L/500	L/500	L/500	L/500
Dz,adm =	25	21	48.6	31
Dz =	19.2	5.2	22.2	12.2

Dirección transversal (Cubrera)

Modelo 1	V.2	P.4	P.5
L=	12.5	12.5	12.5
LUZ admisible	L/500	L/500	L/500
Dz,adm =	25	25	25
Dz =	2.2	9.9	0.7

Para el cálculo de los desplazamientos horizontales se toma como valor de desplome total $L/500$, donde la altura total de la construcción es 9,26 m. Por lo que con un valor límite de desplazamiento de 18,52 mm, los desplazamientos en el eje X cumplirían con un máximo de 9,6mm, mientras los desplazamientos en el eje Y llegarían a los 59.5 mm en la cubrera sur, por lo que estarían fuera del límite establecido en el CTE.

6.3.5 Análisis de deformaciones de la bóveda.

En este punto se pretende estudiar el comportamiento de la bóveda sin los elementos que le acompañan (la viga perimetral, la viga tensor y el postesado).

Se plantean 3 hipótesis para comprobar el funcionamiento de la bóveda; la estructura completa sin el pretensado, sin la viga tensor y sin la viga perimetral y para analizar los escenarios se facilitan a continuación las deformaciones en el eje Y y Z, y las tensiones principales de tracción y compresión de la bóveda.

6.3.5 Análisis de deformaciones de la bóveda

Diseño y cálculo de la estructura de la fábrica
FAGAR de Eladio Dieste

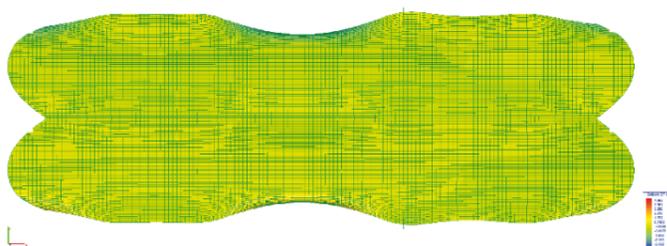
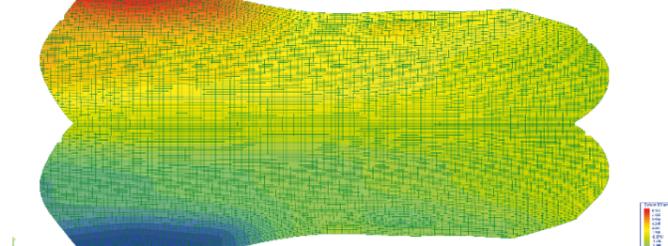
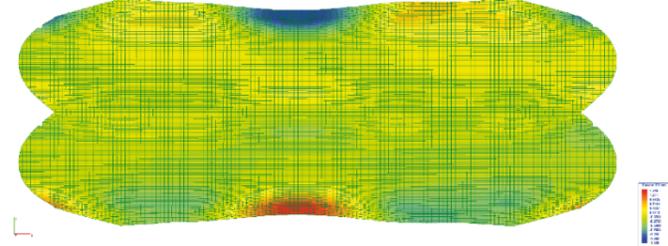
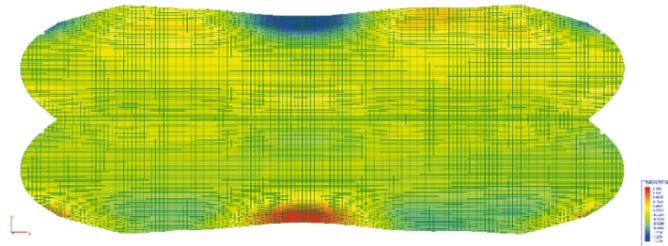
Estructura Original

Estructura sin Postesado

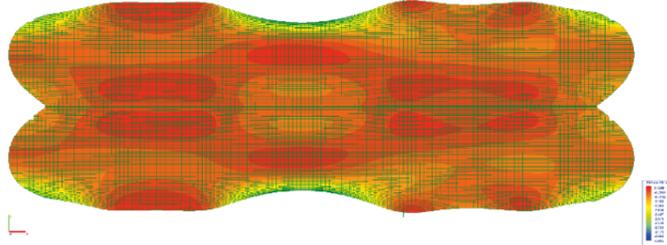
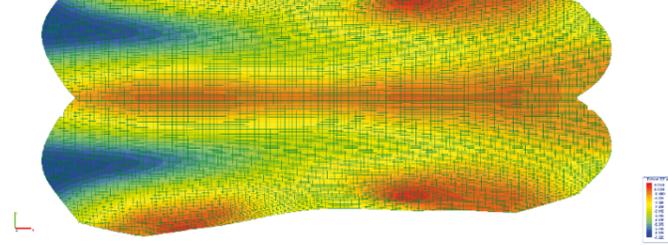
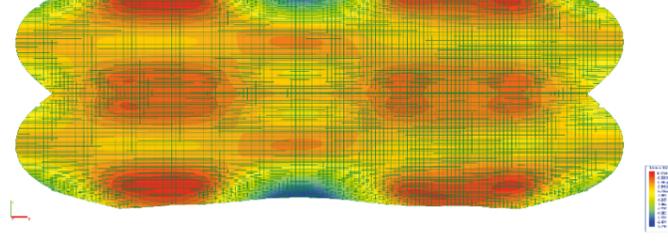
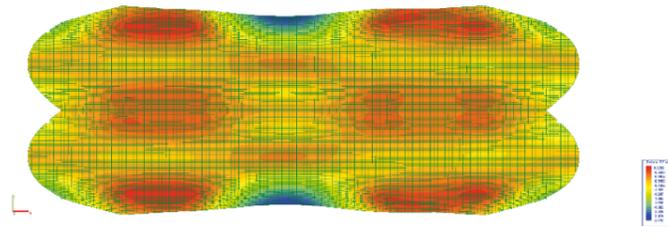
Estructura sin Viga tensor

Estructura sin Viga perimetral

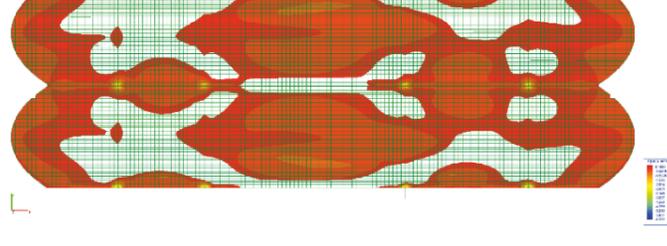
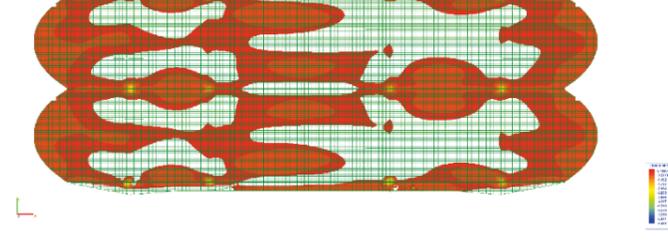
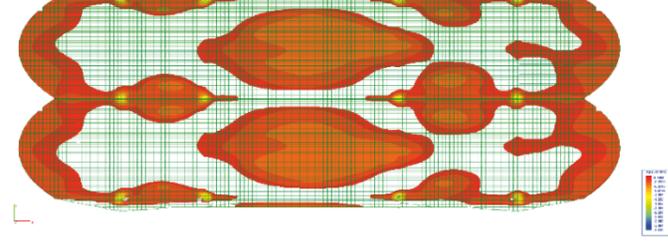
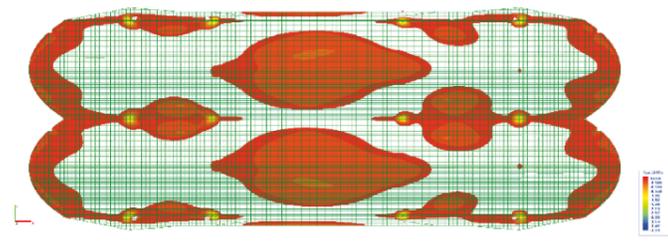
Dy



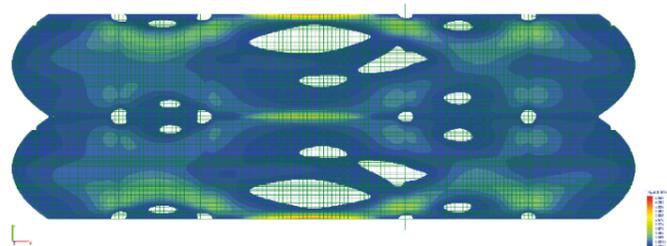
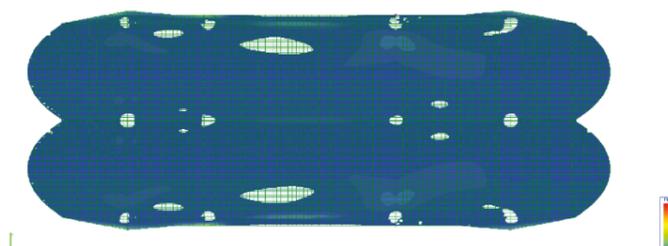
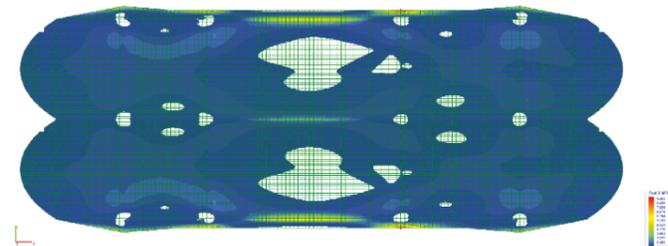
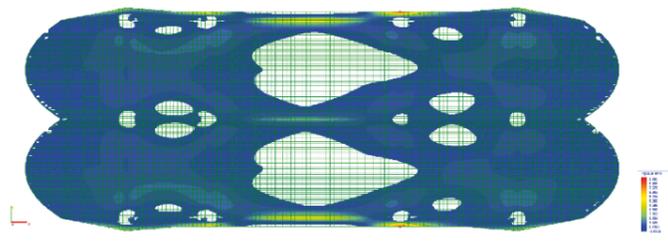
Dz



S.I
Com



S.I
Trac.



Como se puede ver a través de los gráficos, los esfuerzos horizontales causados por la geometría de la bóveda mayoran considerablemente las deformaciones tanto en los extremos laterales como en el vano central de la bóveda tras eliminar las vigas tensor de los ejes de pilares.

Por otro lado, dado que un eje de pilares cuenta con contrafuertes para absorber dichos esfuerzos, la cara sur de la bóveda resiste mayormente las deformaciones mientras la cara norte cede por no poder resistir y deforma toda la lámina.

También, tras suprimir la viga perimetral se puede ver como las deformaciones en todo el perímetro dejan de ondular de manera homogénea y aparecen torceduras en todo el contorno debidas a las perturbaciones de borde.

Por último, comparando las deformaciones del punto 6.3.3 con las deformaciones causadas por suprimir el postesado, se puede ver como desaparecen las franjas longitudinales de deformaciones y parecen isobaras concentradas en los laterales entre las líneas de pilares y en la cumbrera del vano central y los voladizos.

7.0 Conclusiones

A través del estudio de la vida y obra de Eladio Dieste, por medio de una bibliografía competente, y con la obtención de los planos de obra a analizar, gracias a la colaboración del Centro de Documentación e Información del instituto de Historia de la Arquitectura de la Universidad de la República de Uruguay, se ha podido comprender en profundidad la razón por la que Dieste emplea este tipo de estructuras.

Las estructuras de cerámica armada responden a las necesidades de programas industriales dado que las naves longitudinales compuestas por superficies de curvatura simple ofrecen grandes luces y cubren grandes dimensiones mediante un uso acotado de soportes.

Mediante un modelado tridimensional en el programa *AutoCAD* y la información que proporciona el programa de cálculo *Angle*, se puede ver cómo trabaja la estructura y de qué manera, gracias al postesado, deforma mínimamente a pesar de las grandes luces que soporta.

La obra en su conjunto muestra una racionalidad constructiva completa, donde cada elemento compete a una necesidad de esta tipología constructiva; los tirantes de hormigón postesado para absorber los esfuerzos horizontales, las vigas planas perimetrales para contener las perturbaciones de borde, el uso de la catenaria para que la cubierta trabaje únicamente a compresión de su peso propio e incluso los retranqueos del cerramiento para dotar de rigidez frente al viento. Cada elemento tiene su razón de ser como se puede apreciar en el punto 6.3.5.

Por último, aun siendo considerables las deformaciones mostradas en las páginas anteriores (en concreto los desplazamientos del Eje Z), los voladizos ayudan a disminuir las flechas en centro de vano en la luz central de 24,3 m, y teniendo en cuenta que bajo los voladizos no se encuentra ni tabiquería ni carpintería, se puede comprender como una consecuencia a favor del buen comportamiento estructural del interior de la nave.

Por otro lado, se puede ver en las gráficas de la bóveda (punto 6.2.3) como trabaja de la misma manera que una viga sobre 4 pilares, soportando en el vano de mayor luz, tracciones en la cara inferior (los laterales en el caso de la bóveda) y compresiones en la cara superior (la cumbrera en el caso de la bóveda).

Asimismo, se puede observar como las tracciones longitudinales (Tensiones S_x punto 6.2.3) coinciden con la geometría del armado dispuesto en la bóveda (Imagen 26) para dotar de resistencia a tracción a la bóveda. Por lo cual se deduce que la elección de una geometría implica una serie de consecuencias de trabajo como estructura, y su consecuente materialización debe acompañarla.

Para concluir, debe comentarse que gracias a los programas análisis estructural y al estudio de distintos sistemas estructurales relacionados con la fábrica FAGAR se ha podido cumplir con los objetivos de este trabajo.

8.0 Bibliografía

“Iglesia de Atlantida - Ficha, Fotos y Planos - WikiArquitectura.”

Accessed July 8, 2021.

<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/iglesia-de-atlantida/>.

Dieste, Eladio, and Ana M Marín De Palma. “Eladio Dieste, El Arte de Construir En Ladrillo.” *Historia*, 2000, 26–28.

Grompone, Juan. “Eladio Dieste, Maestro de La Ingeniería,” n.d., 1–36.

María, Jose, and Cabeza Lainez. “Las Bóvedas de Cerámica Armada en La Obra de Eladio Dieste . Análisis y Posibilidades de adaptación a Las Condiciones Constructivas Españolas.” *Historia*, 1996, 19–21.

Marín, Ana M^a, and Gonzalo Barluenga Badiola. “Eladio Dieste y la cerámica armada: la forma de lo resistente.” Article. *Arquitecturas del sur* 32, no. 45 (2014): 90–103.

Nómada - FAGAR - San Juan Refrescos S.A.” Accessed May 9, 2021.
<https://nomada.uy/guide/view/attractions/4203>.

Orts Borrás, Francisco. “Aplicación Del Hormigón Postesado En Edificación,” February 9, 2012.
<https://riunet.upv.es:443/handle/10251/14659>.

Salvadori, M, R Heller, and S C Milicay. *Estructuras Para Arquitectos / Structures in Architecture*. Elibro Cátedra. Nobuko Sa, 2005.
<https://books.google.es/books?id=5zFKPQAACAAJ>.

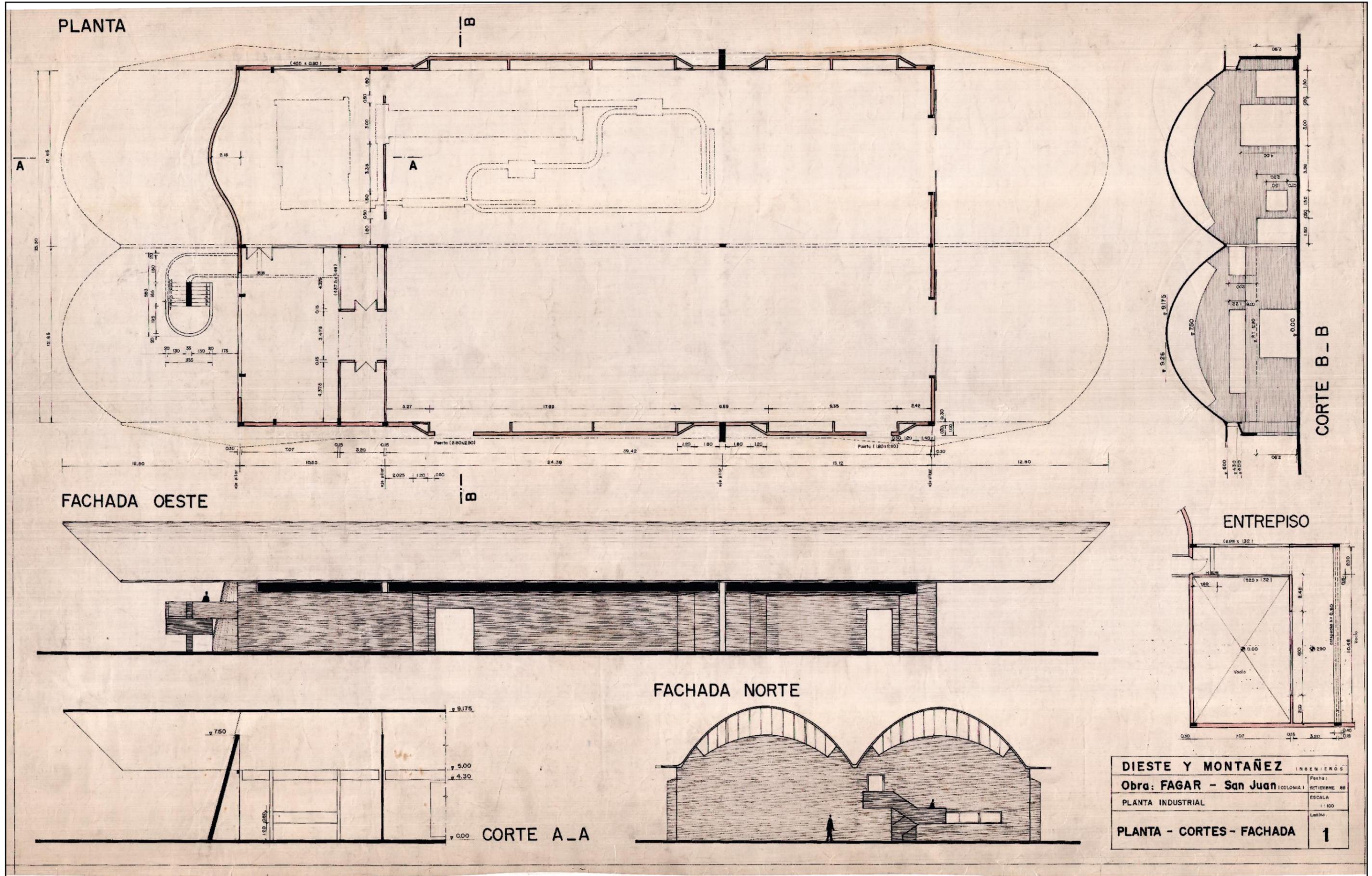
Pedreschi, Remo, and Eladio Dieste. *The engineer's contribution to contemporary architecture: Eladio Dieste*. Thomas Telford, 2000.

Engel, H., Rapson, R., & Zollinger, C. (2001). *Sistemas de estructuras*. Gustavo Gili.

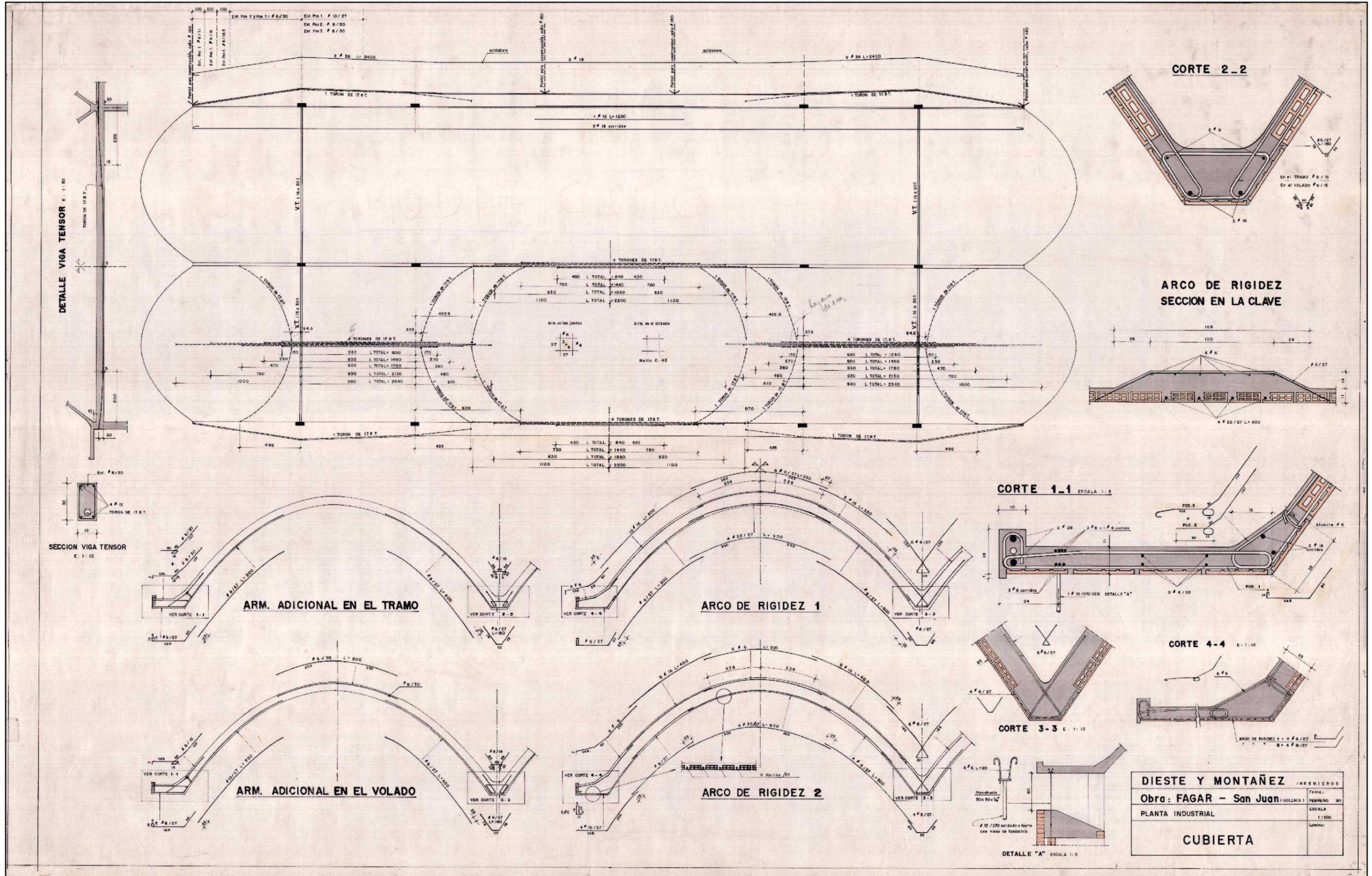
9.0 Anexos

La documentación que se muestra a continuación se compone de dos partes; el anexo A muestra los planos originales de la obra facilitados por el centro de documentación e información del instituto de historia de arquitectura de la universidad de arquitectura de la república de Uruguay.

Por otro lado, el anexo B es una muestra comparativa de todas las gráficas de solicitaciones de los modelos. Los modelos únicamente se diferencian en la posición de los ejes de soportes interiores

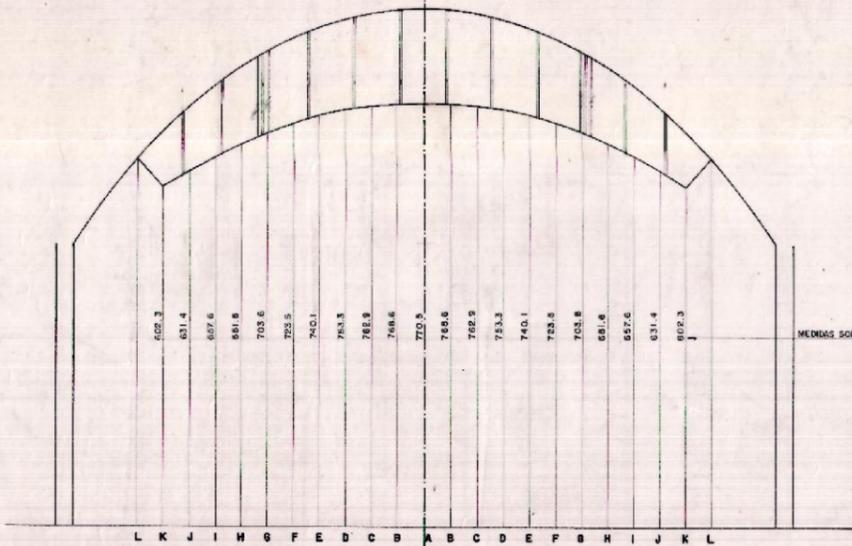


DIESTE Y MONTAÑEZ INGENIEROS	
Obra: FAGAR - San Juan (COLOMIA)	Fecha: SETIEMBRE 89
PLANTA INDUSTRIAL	ESCALA: 1:100
PLANTA - CORTES - FACHADA	Lámina: 1

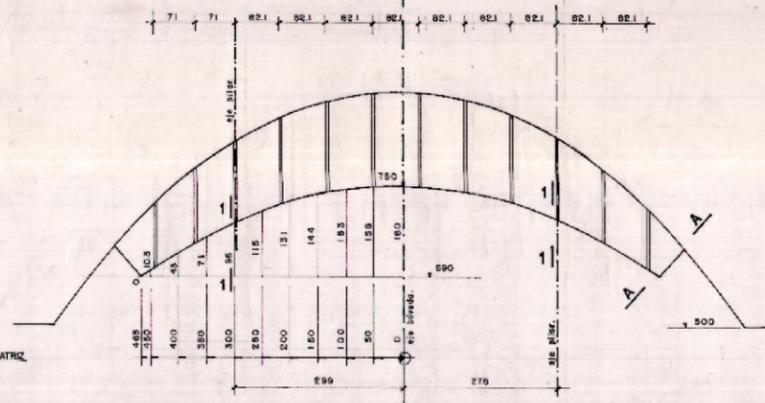


DIESTE Y MONTAÑEZ INGENIEROS	
Obra: FAGAR - San Juan (COLONIA)	Fecha: FEBRERO 30
PLANTA INDUSTRIAL	ESCALA 1:100
CUBIERTA	

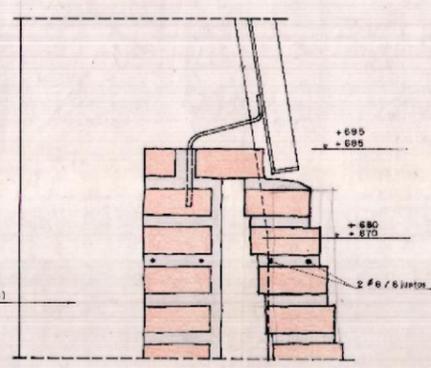
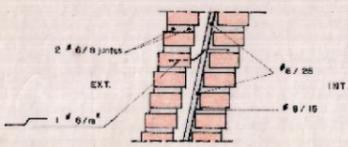
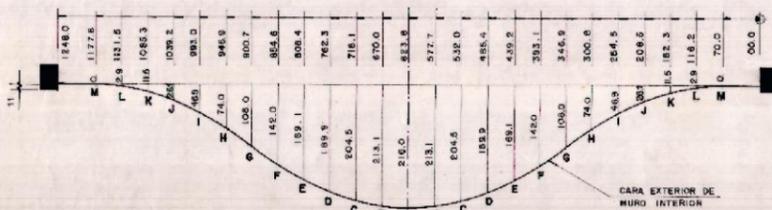
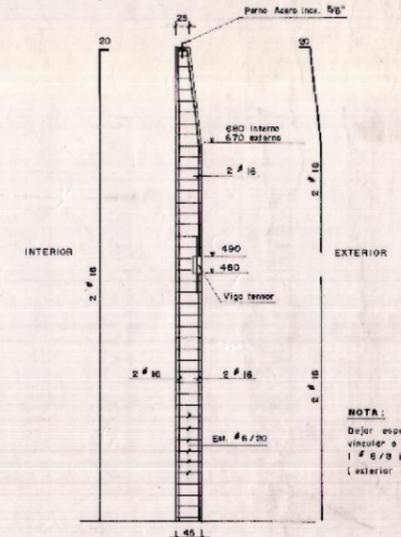
PARED ONDULADA EN FACHADA NORTE E-1:50



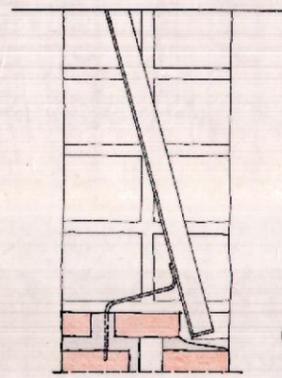
LUCERNARIOS E-1:50



PILAR TESTERO E-1:50
(20x45) (20x45x25)

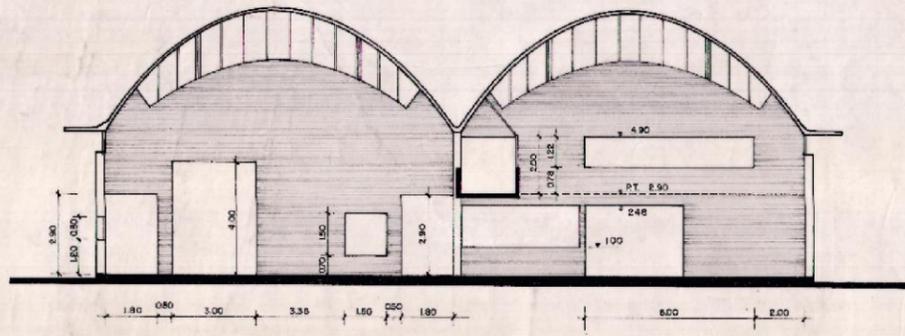
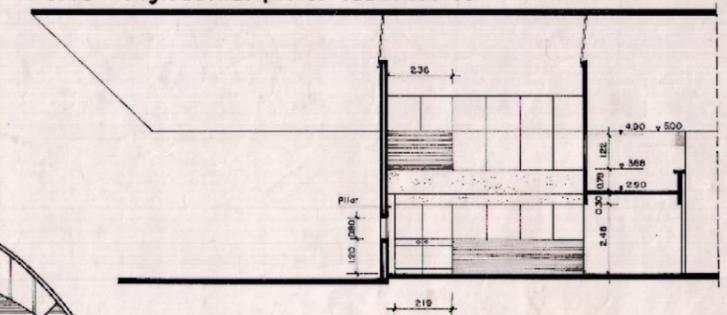


CORTE 1-1 E-1:10

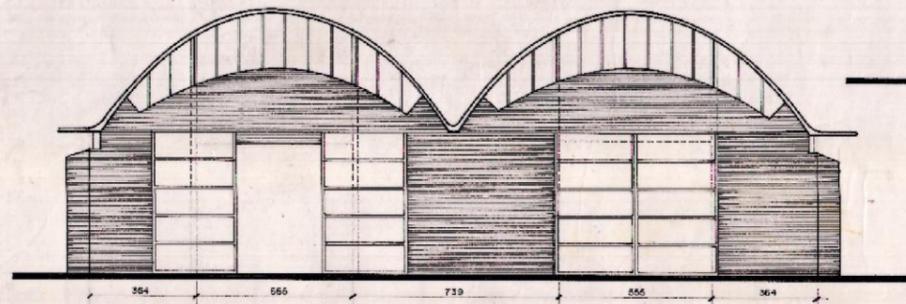


CORTE A-A E-1:10

Corte longitudinal por el laboratorio



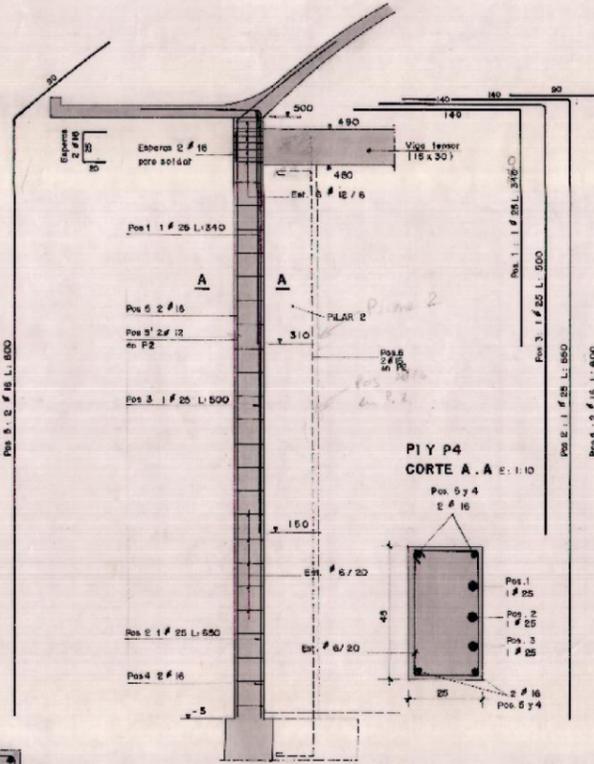
Corte transversal por el laboratorio



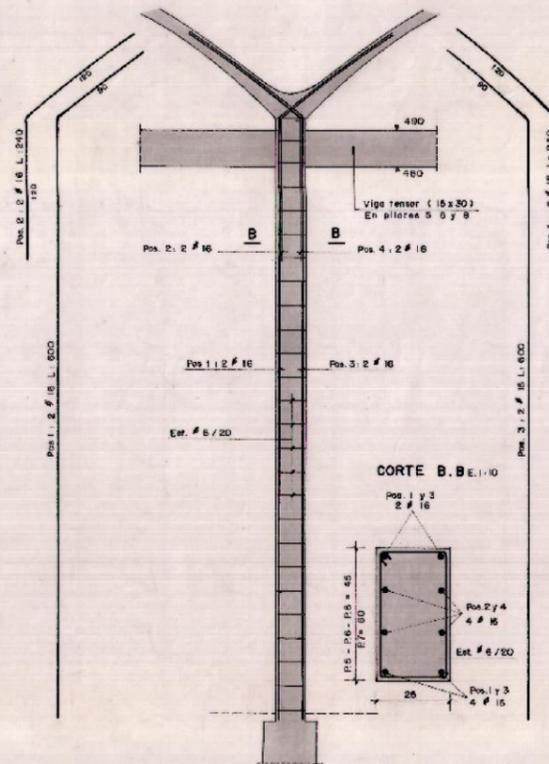
FACHADA SUR E-1:100

D&M DIESTE & MONTAÑEZ S.A. INGENIEROS		
Carlos Roxo 1606/08 Tel. 4146 30 - Fax. 49 8475		
OBRA	FAGAR San Juan (COLONIA)	
PLANO	FACHADAS	
TECNICO	PROPIETARIO	FECHA
		NOV 91

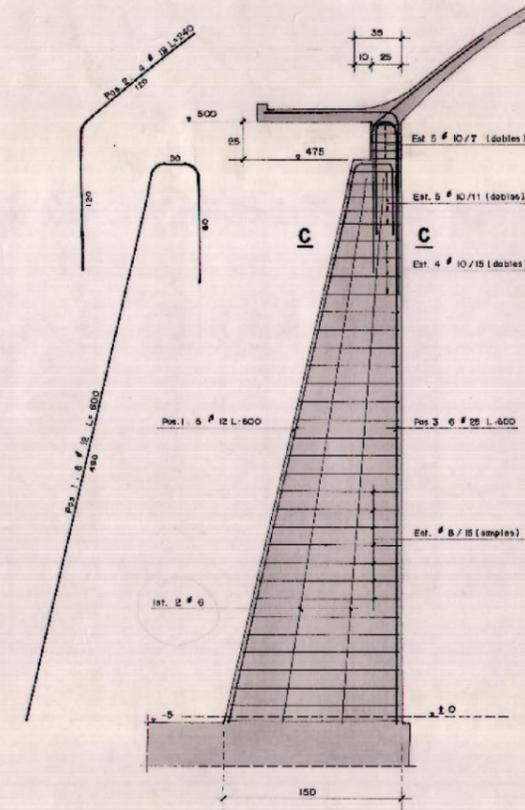
PILARES 1-2-4 ESCALA 1:25



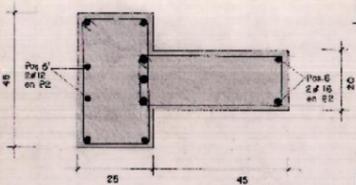
PILARES 5-6-7-8 ESCALA 1:25



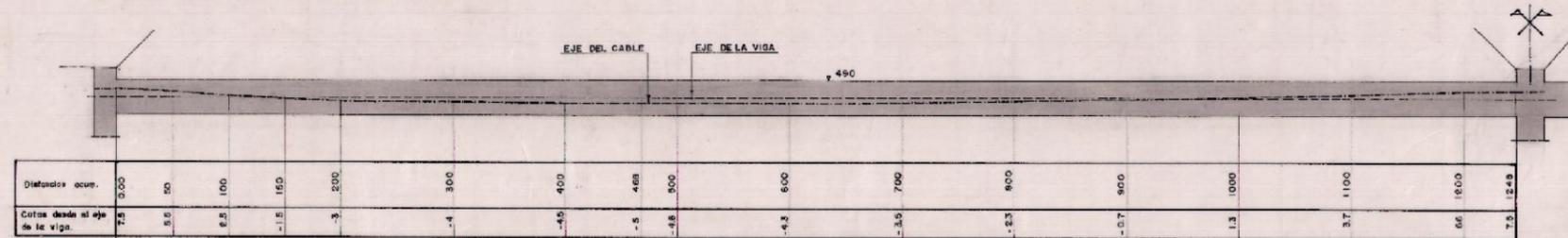
PILAR 3 ESCALA 1:25



P2 CORTE A.A

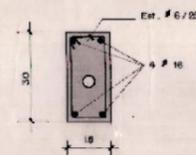


CABLE DE VIGA TENSOR ESCALA 1:25



	P9	P11	P12	P13	P14
BOVEDA	500				
ENTREMISO	270				
FUNDACION	-5				
DADOS	30 x 30 x 40 Hor. Ø 8/15 Vert. Ø 8/15	30 x 30 x 40 Hor. Ø 8/15 Vert. Ø 8/15	30 x 30 x 40 Hor. Ø 8/15 Vert. Ø 8/15	30 x 30 x 40 Hor. Ø 8/15 Vert. Ø 8/15	30 x 30 x 40 Hor. Ø 8/15 Vert. Ø 8/15
PILOTES	1 Ø 20 L=600				

VIGA TENSOR E.1:10



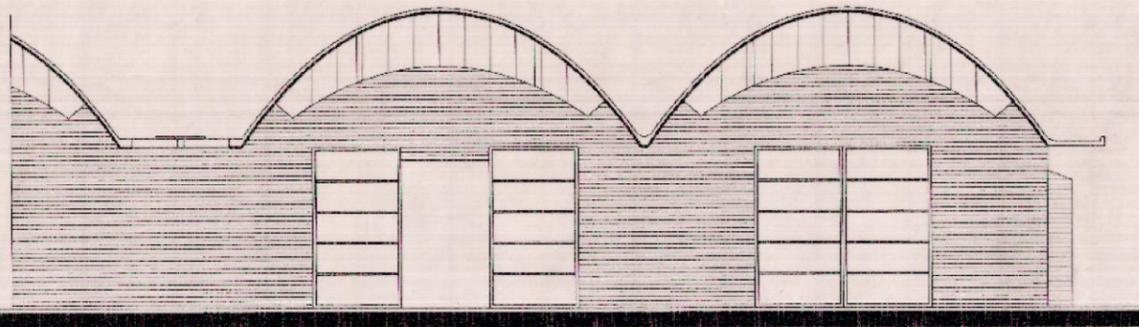
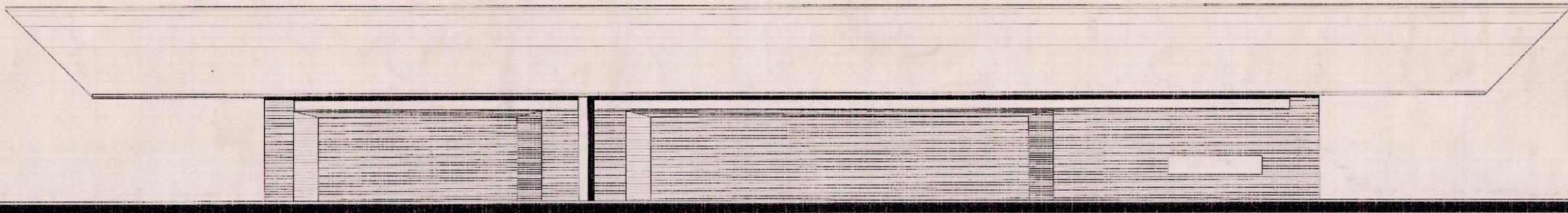
D&M DIESTE & MONTAÑEZ S.A.
 INGENIEROS
 Carlos Rosta 1606/08 Tel. 41 46 30 - Fax 49 8475

OBRA: **FAGAR - San Juan** COLONIA

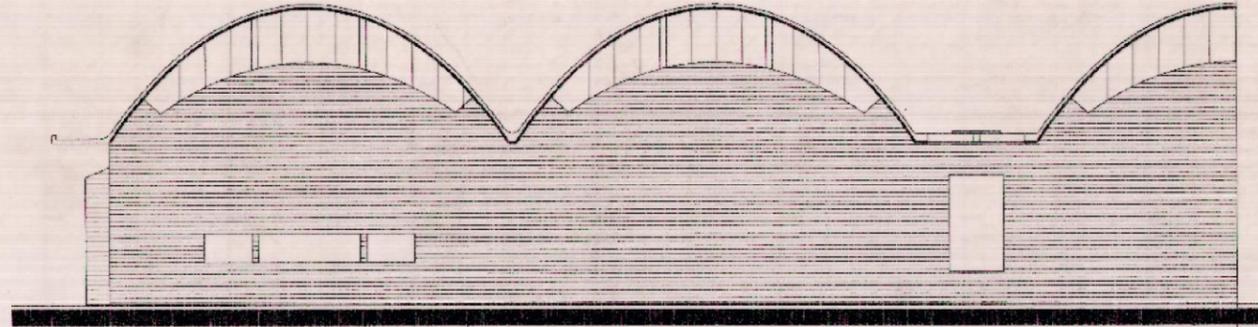
PLANO: **PILARES VIGA TENSOR**

TECNICO: _____ PROPIETARIO: _____ FECHA: **JULIO 91**

FACHADA ESTE ESC 1/100

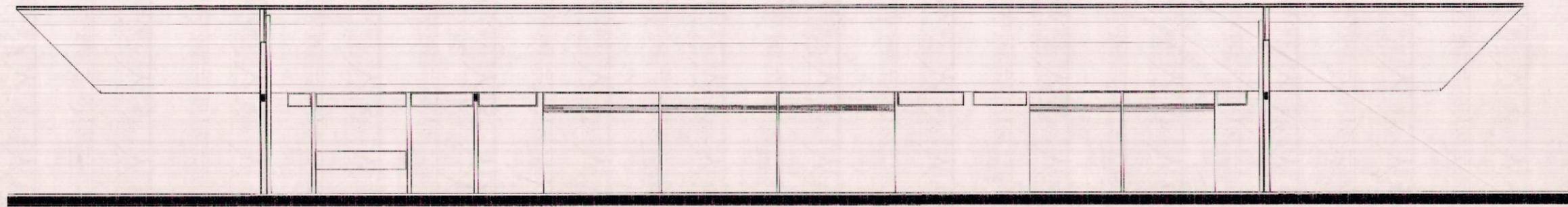


FACHADA SUR ESC 1/100

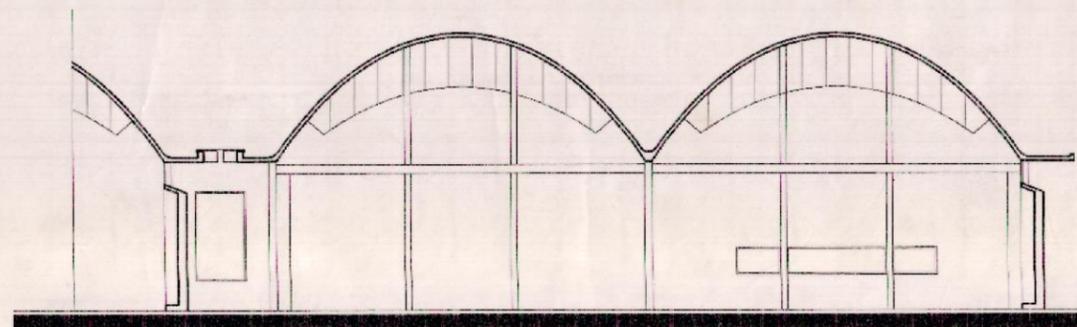


FACHADA NORTE ESC 1/100

D&M DIESTE & MONTAÑEZ S.A.		INGENIEROS	
INGENIEROS C. No. 1006/06 Tel. 411630 - 499900 - 495395 - Fax. 498475			
OBRA:	FAGAR SAN JUAN		ESCALA: 1/100
PLANO:	FACHADAS		LÁMINA: A3
TÉCNICO:	PROPIETARIO:	FECHA:	
ING. GONZALO LATORRETTI	PIERO MORA	MAYO 95	

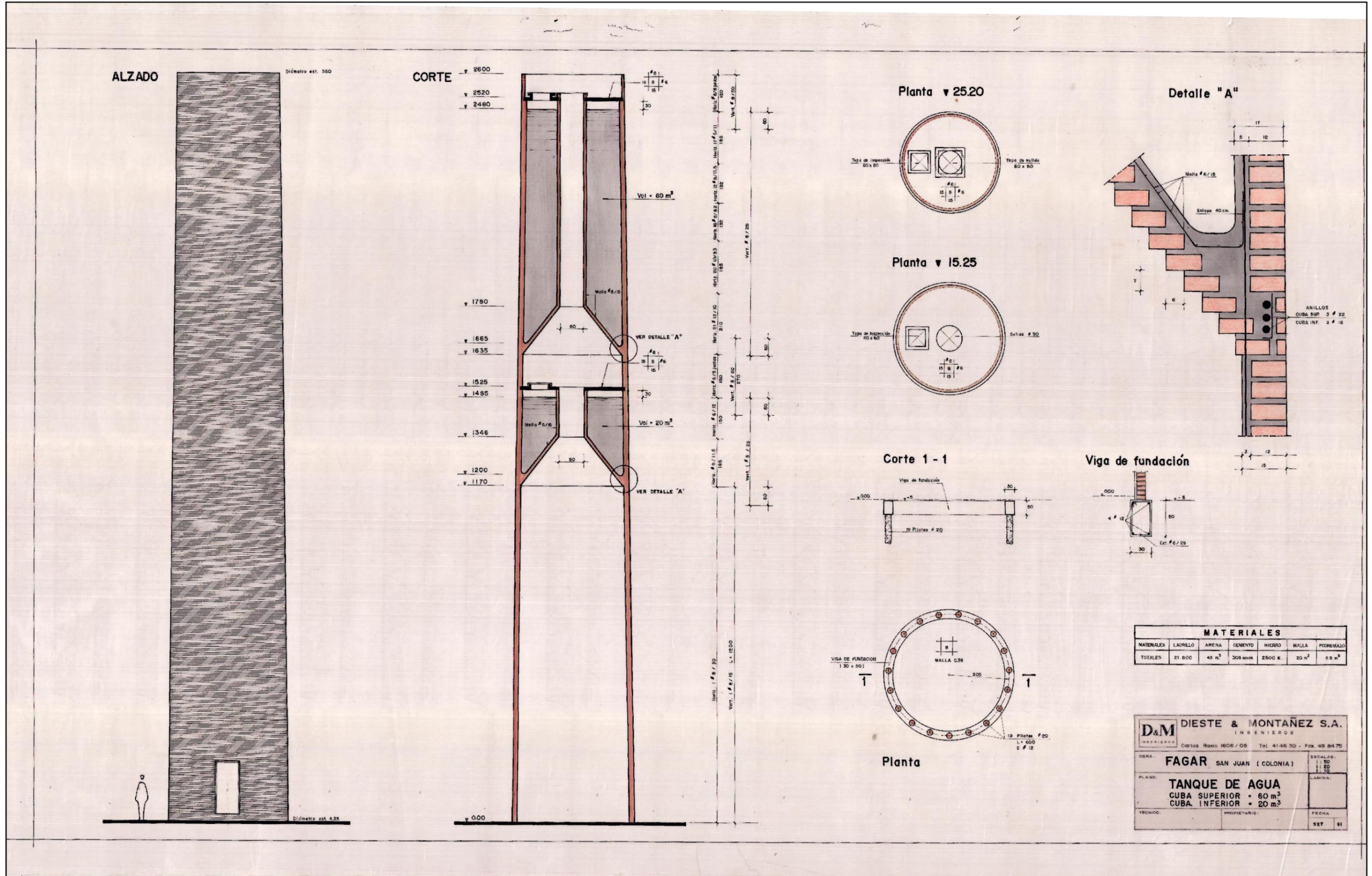


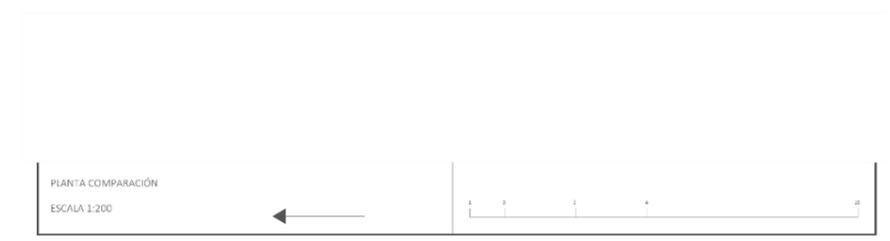
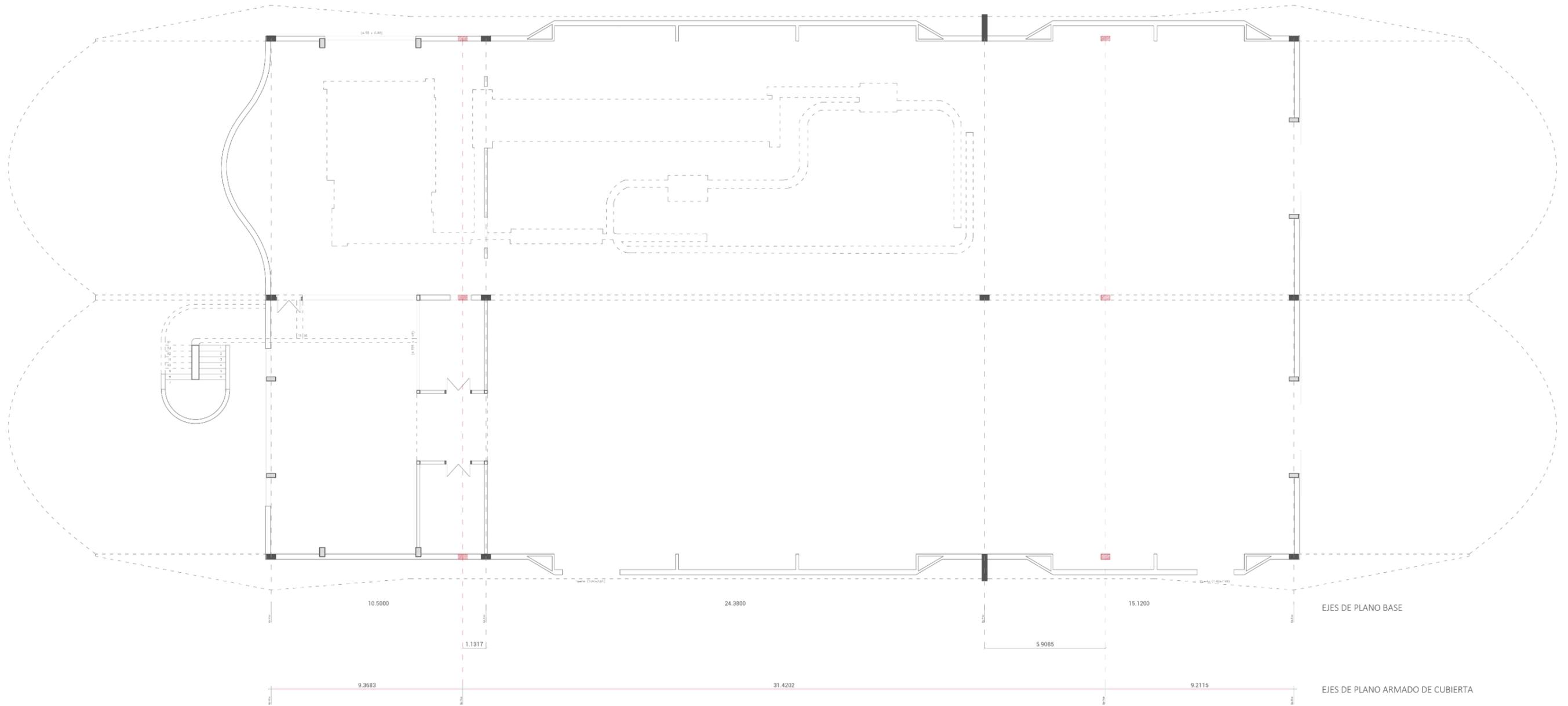
CORTE A-A ESC 1/100



CORTE B-B ESC 1/100

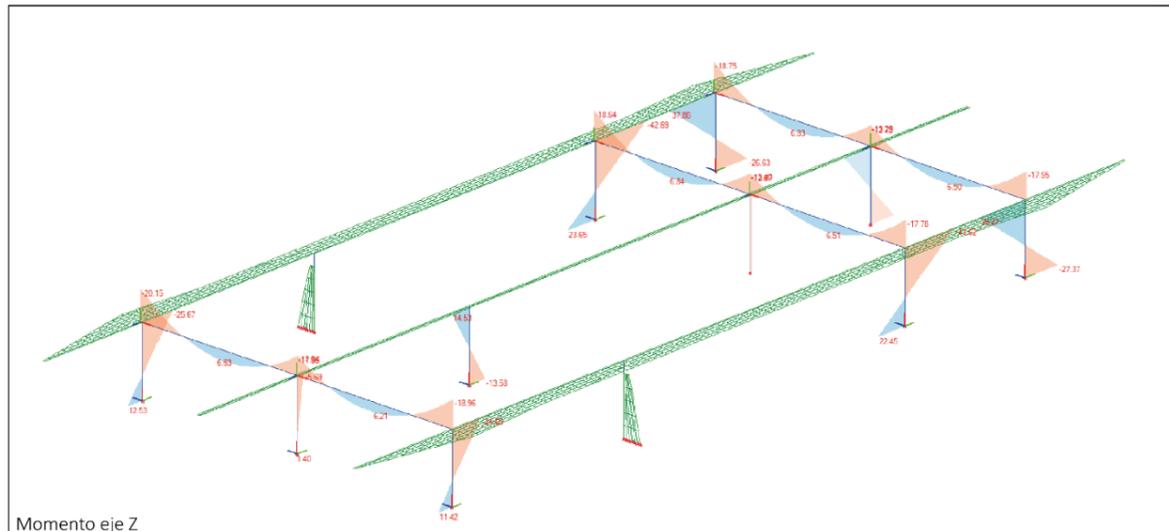
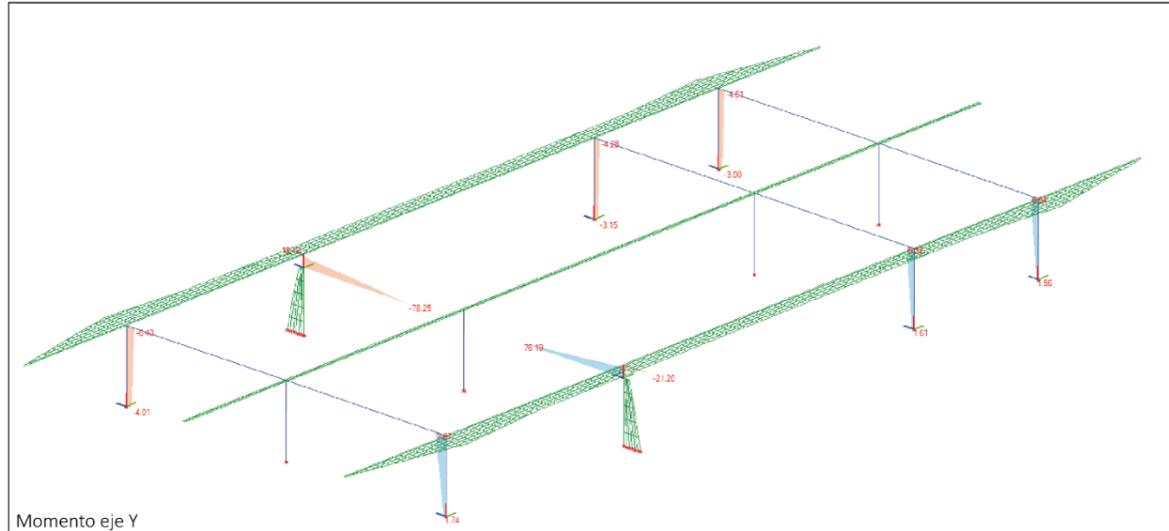
D&M DIESTE & MONTAÑEZ S.A. INGENIEROS		
DISEÑO: C. Roso 1805/08 Tele 414830 - 499980 - 488885 - Fax 428475		
OBJ: FAGAR SAN JUAN	ESCALA: 1/100	
PLANO: CORTES	LAMINA: A2	
TECNICO:	PROPIETARIO:	FECHA: MAYO 95



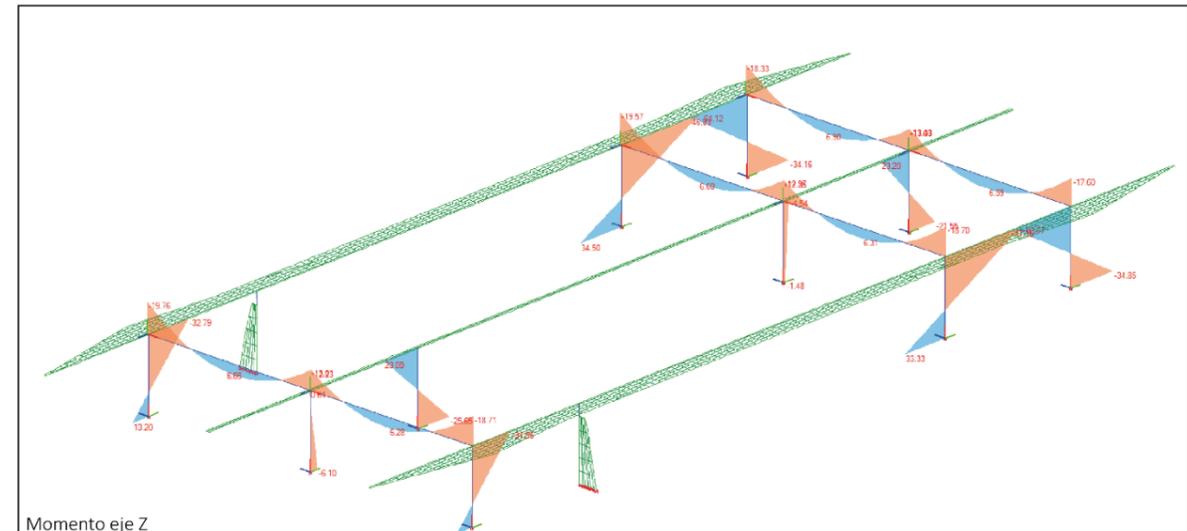
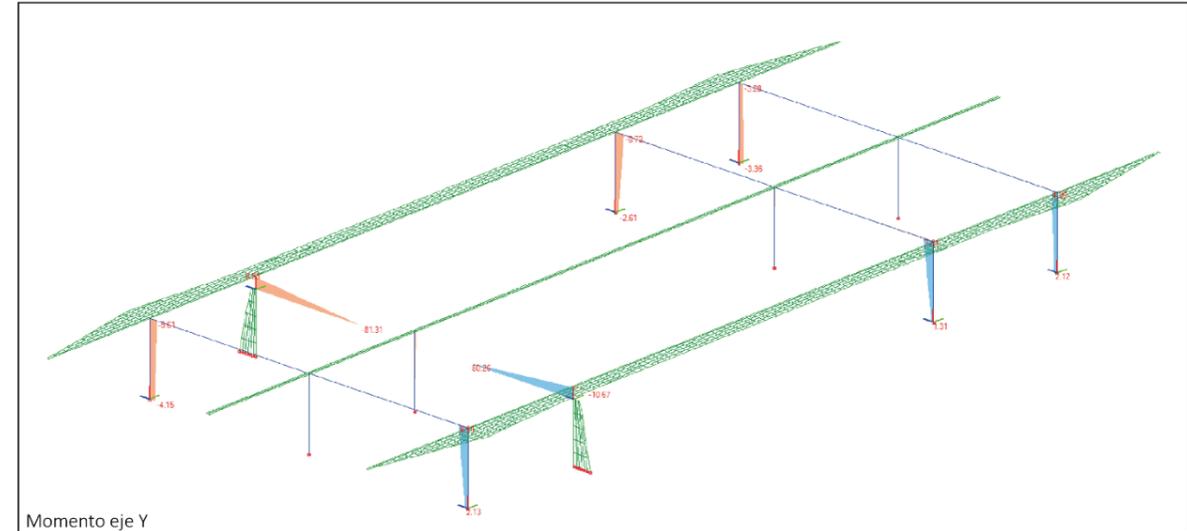


BARRAS

Modelo A Ejes plano base

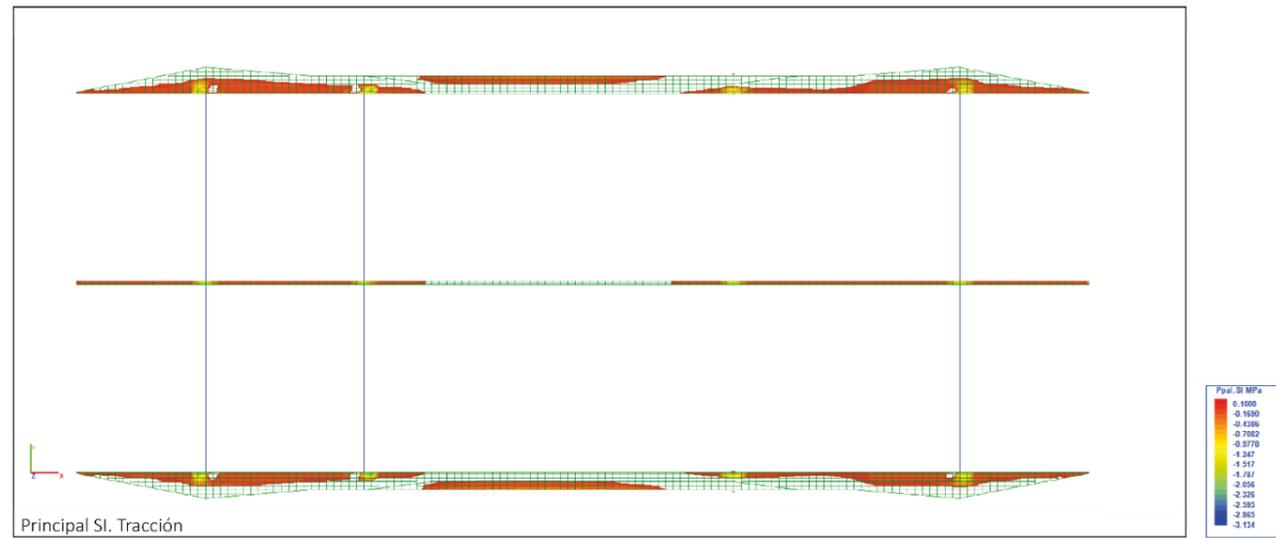
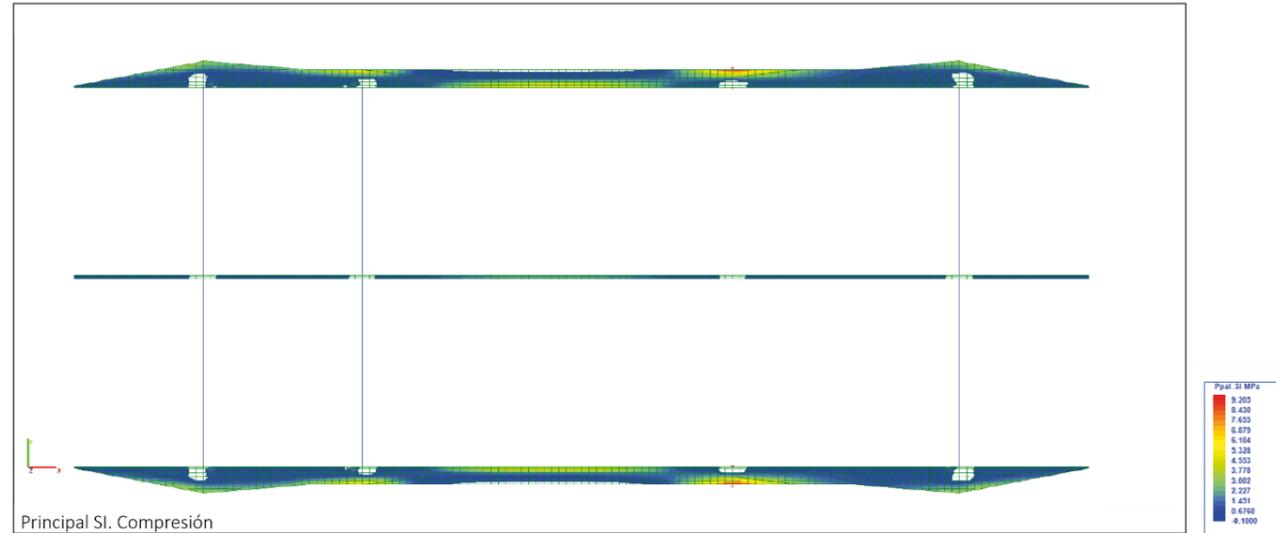


Modelo B Ejes plano armado de cubierta

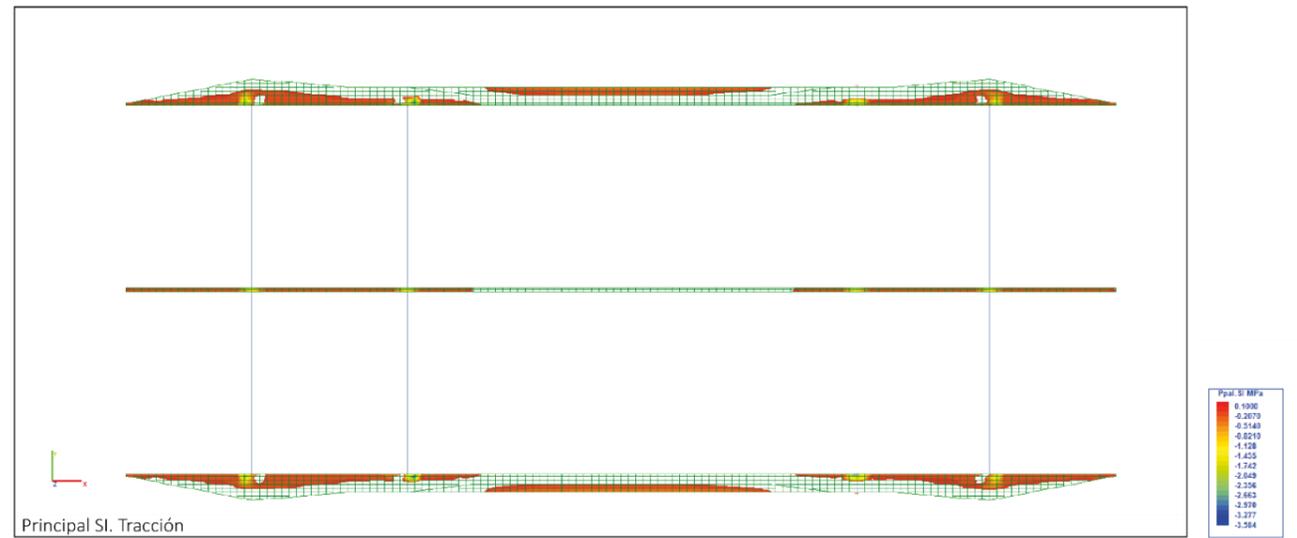
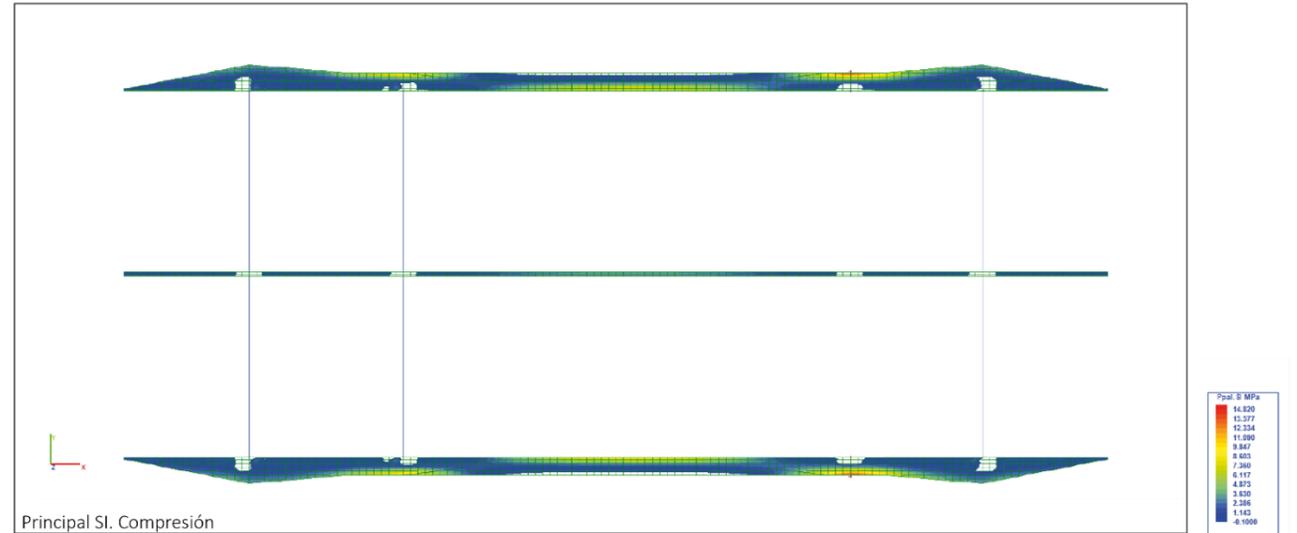


VIGA PERIMETRAL Y CENTRAL

Modelo A Ejes plano base

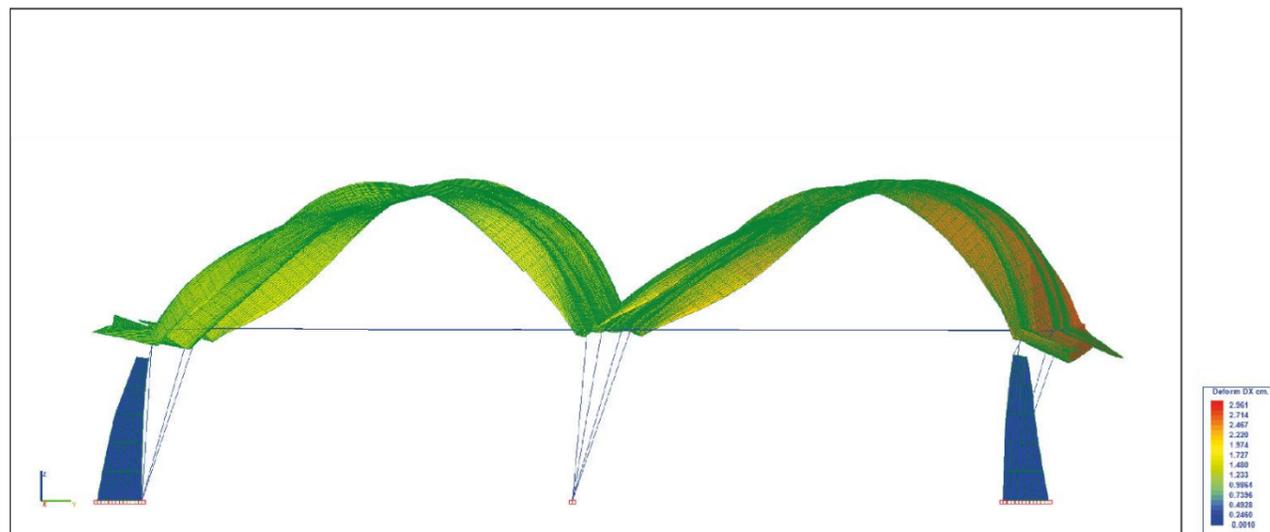
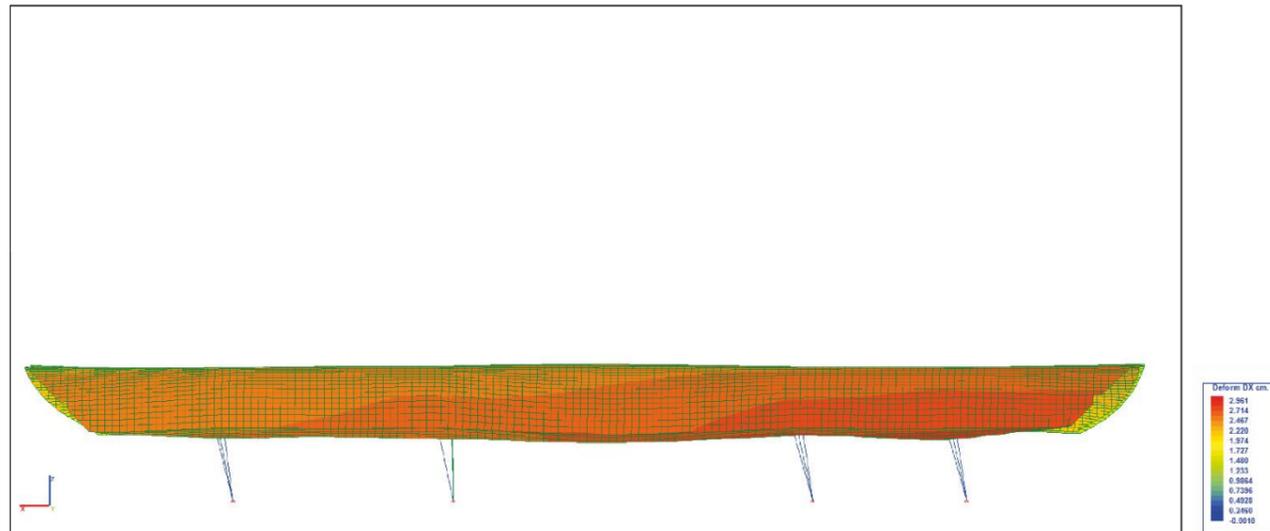
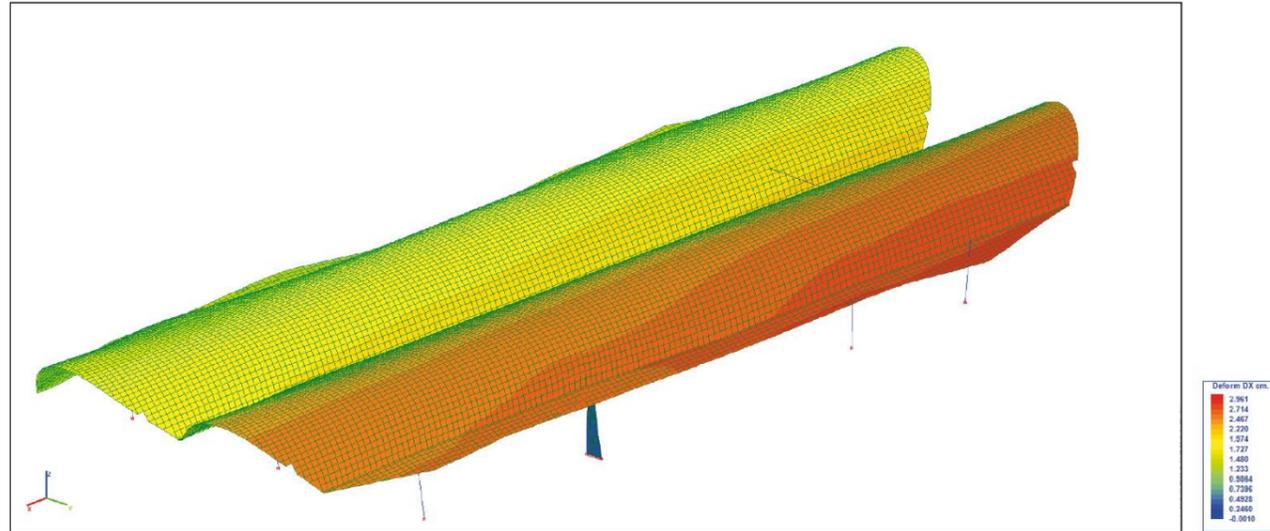


Modelo B Ejes plano armado de cubierta

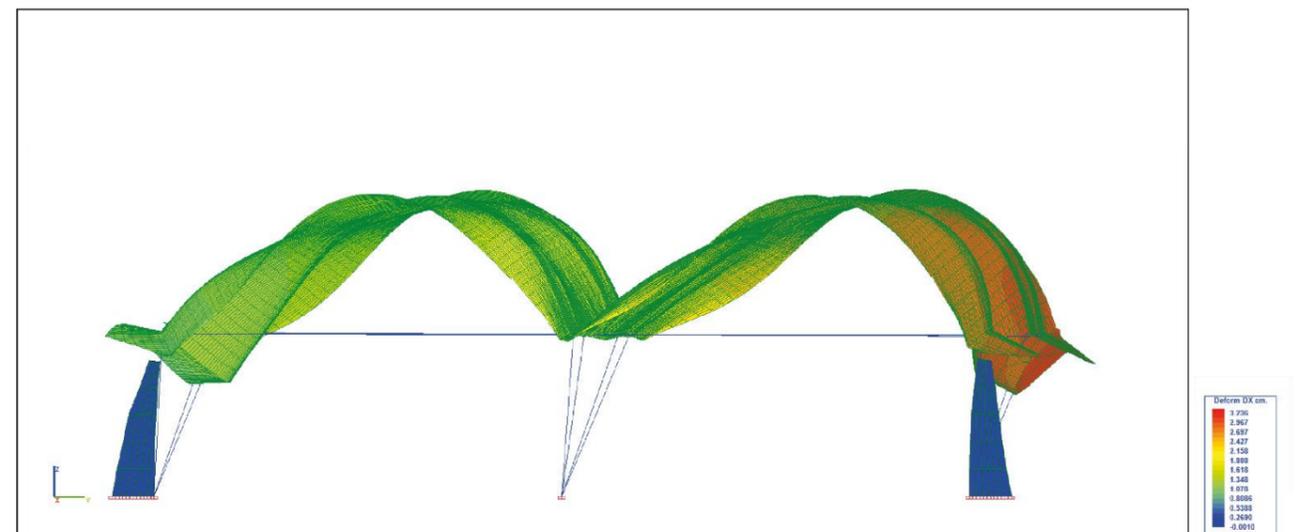
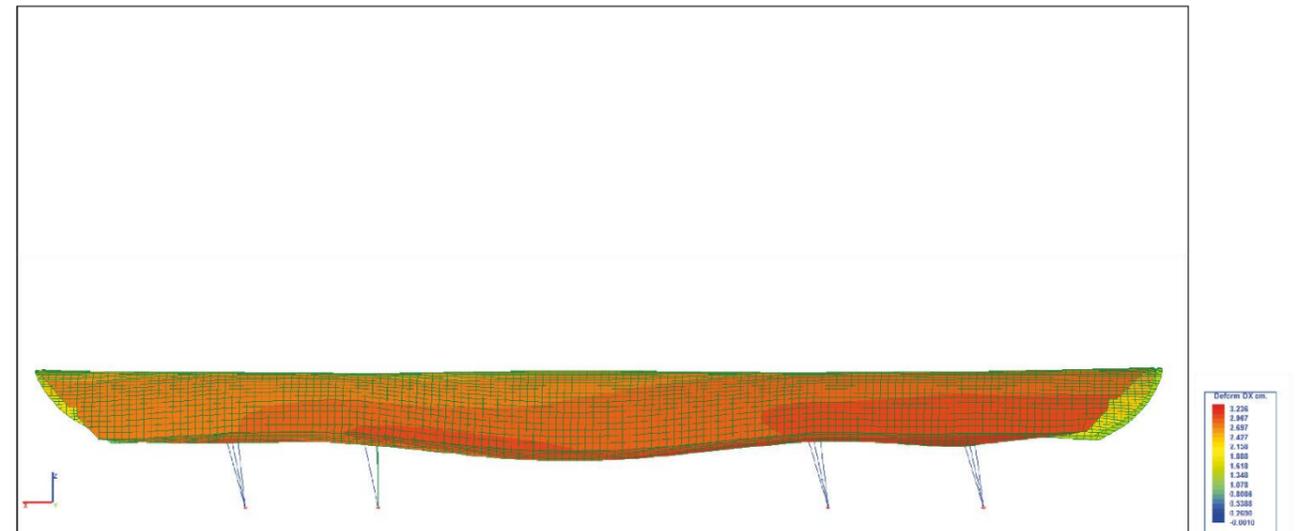
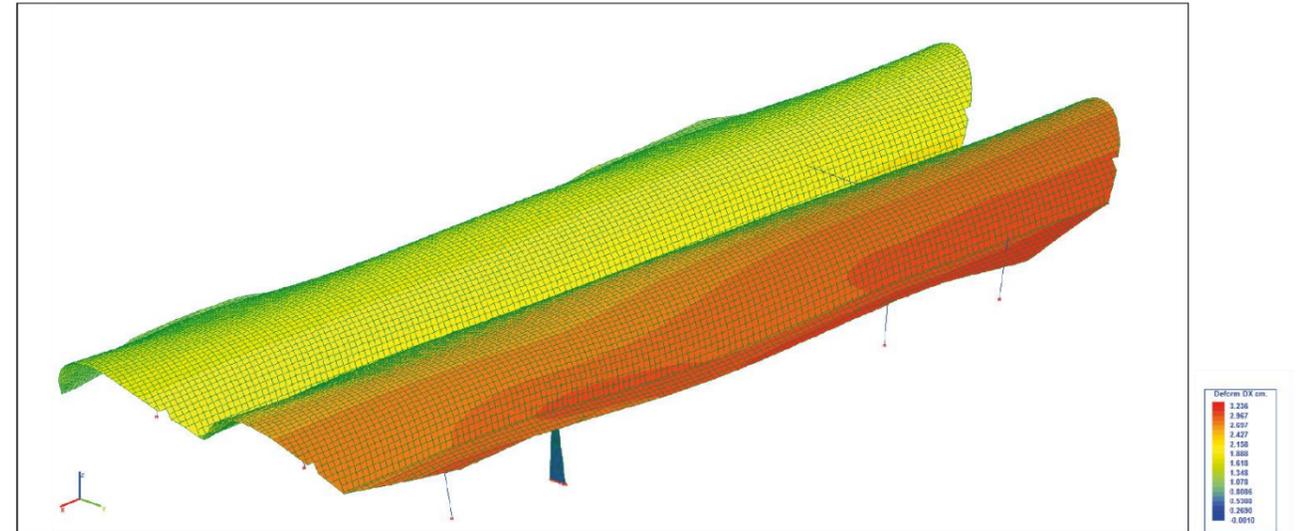


DESPLAZAMIENTOS Dx

Modelo A Ejes plano base

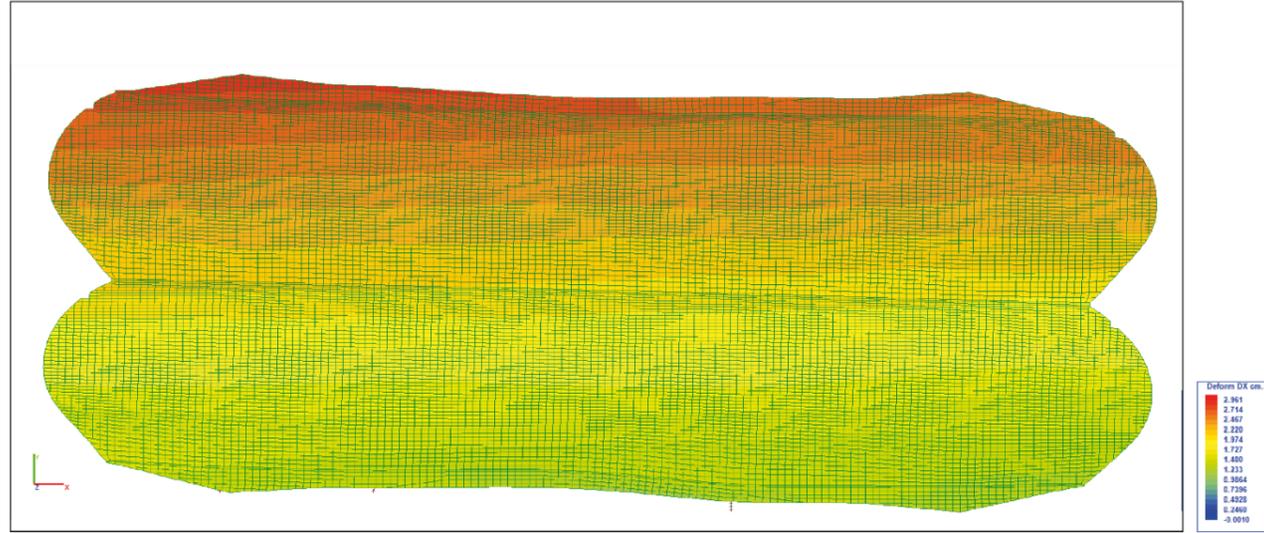


Modelo B Ejes plano armado de cubierta

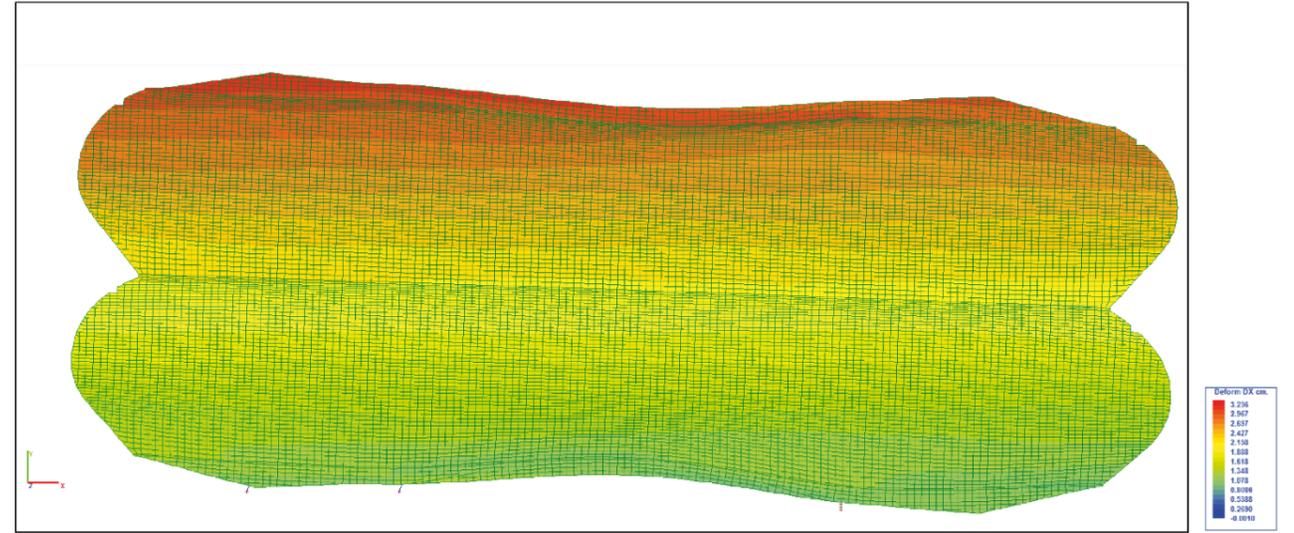


DESPLAZAMIENTOS Dx

Modelo A Ejes plano base

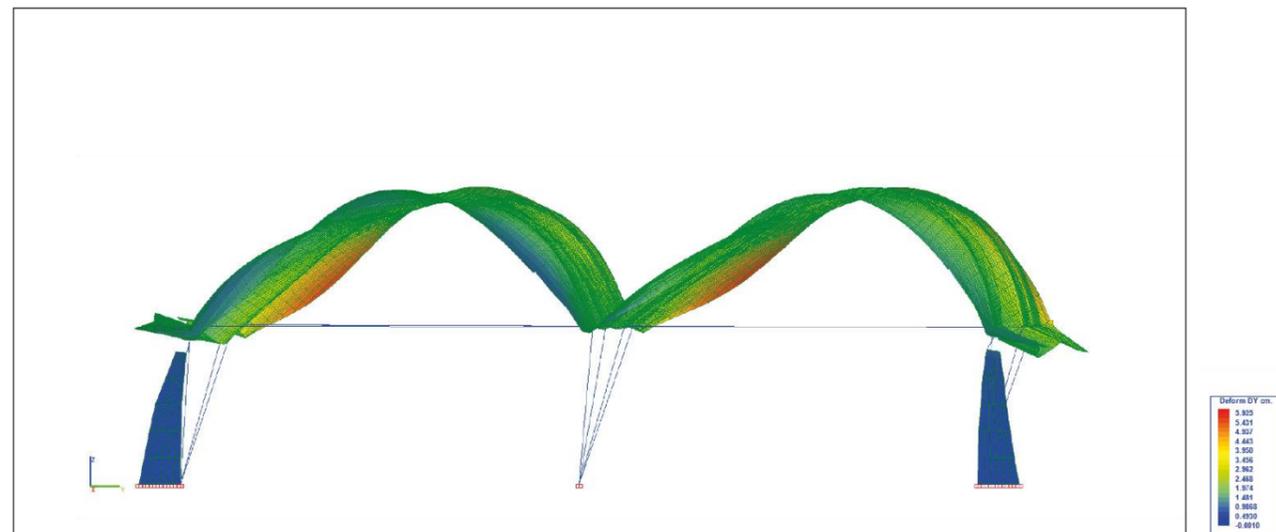
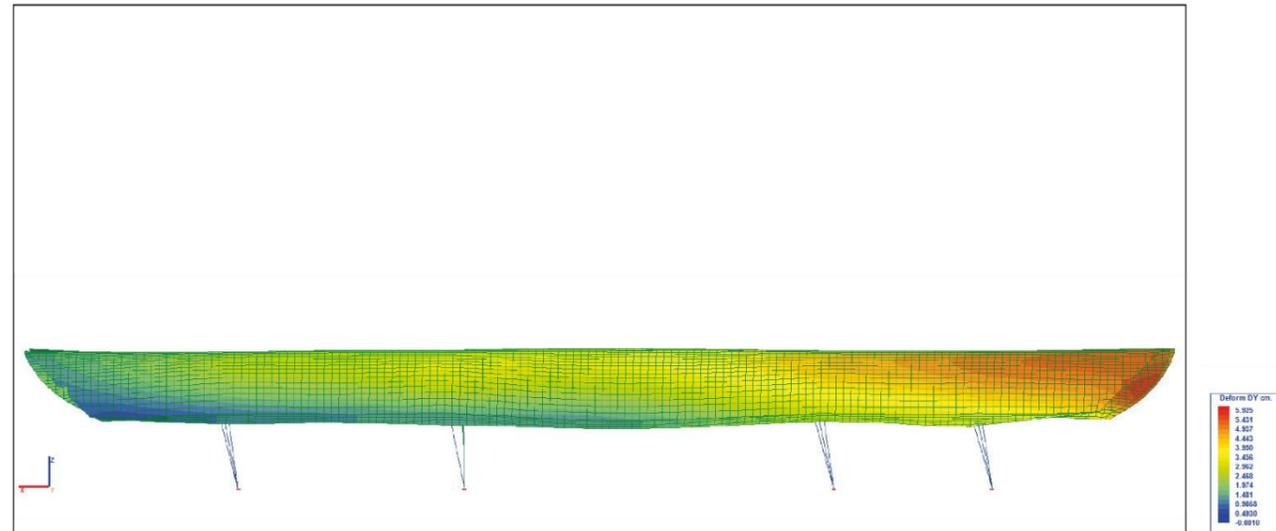
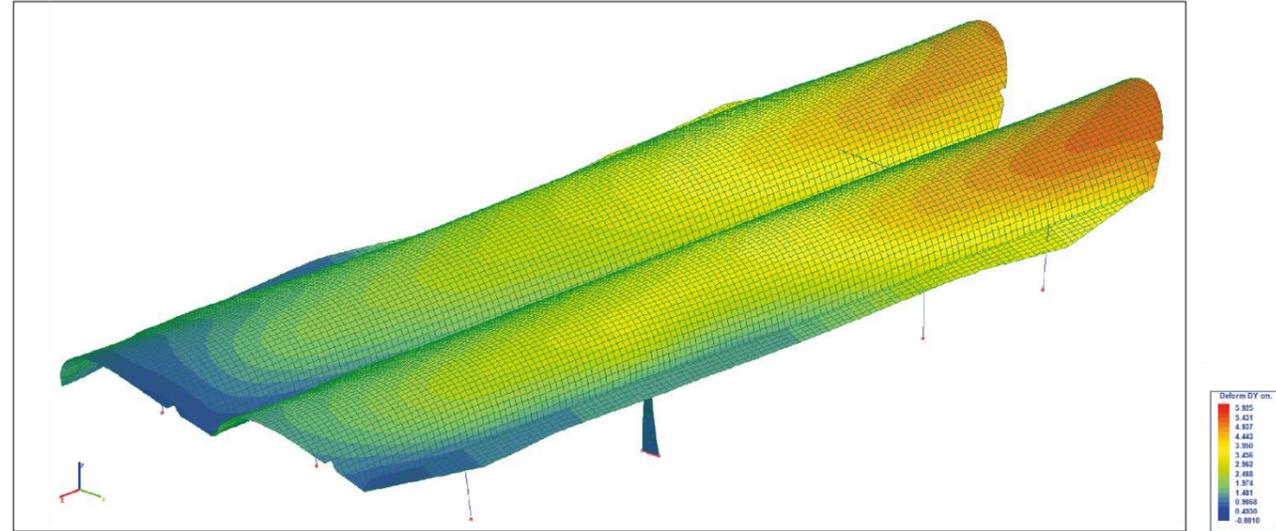


Modelo B Ejes plano armado de cubierta

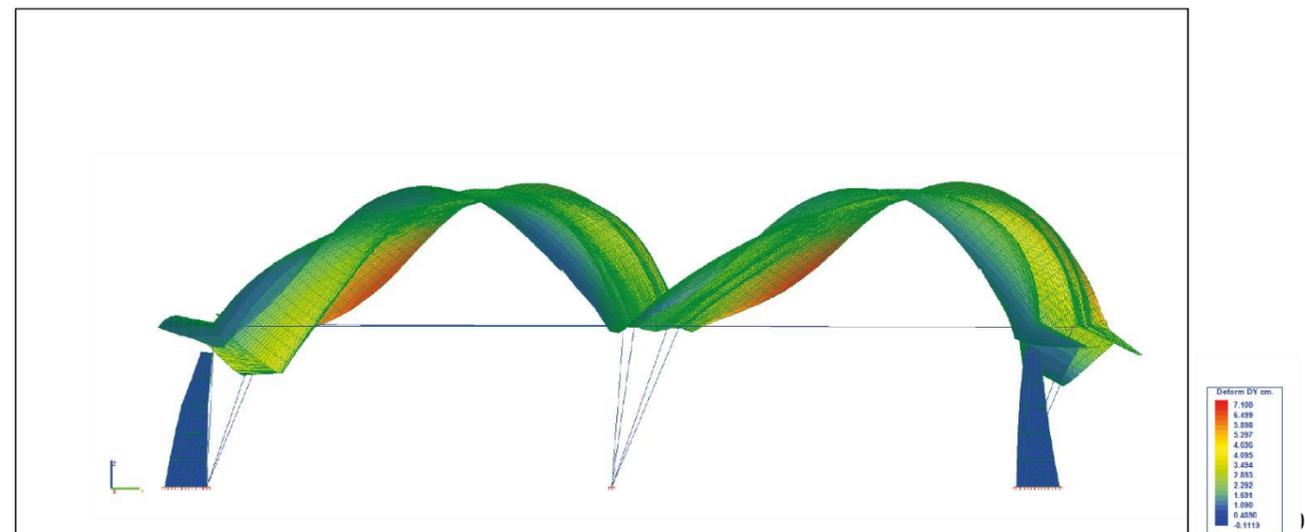
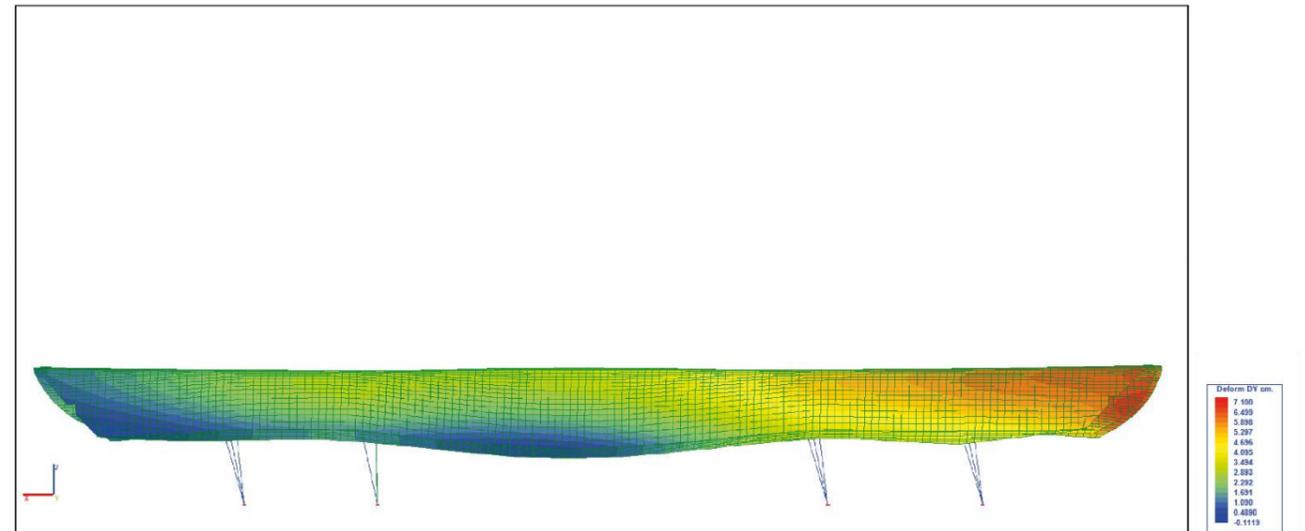
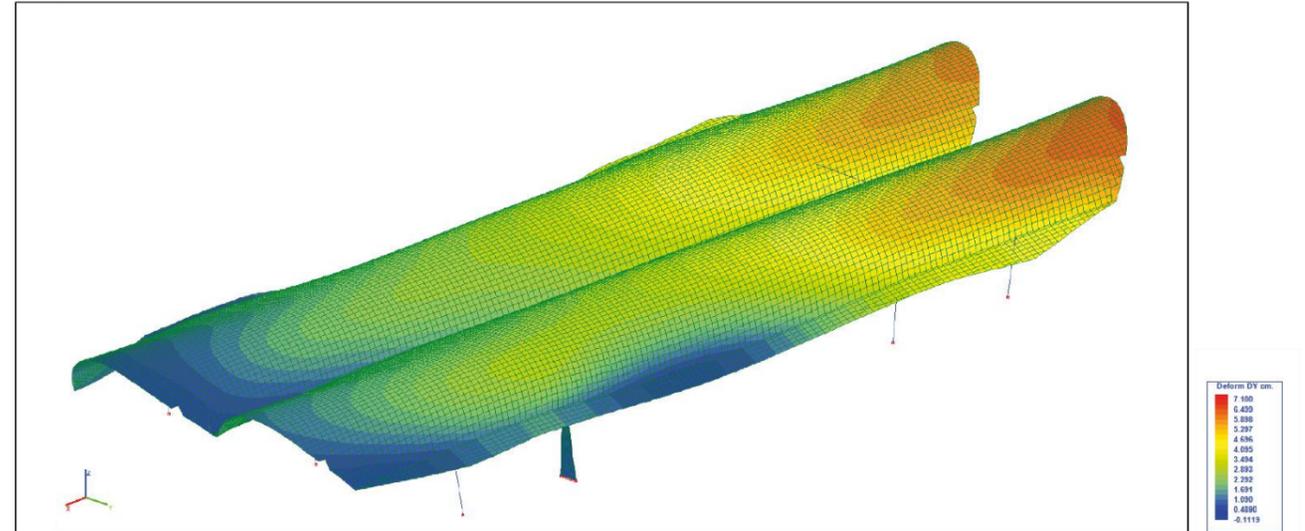


DESPLAZAMIENTOS Dy

Modelo A Ejes plano base

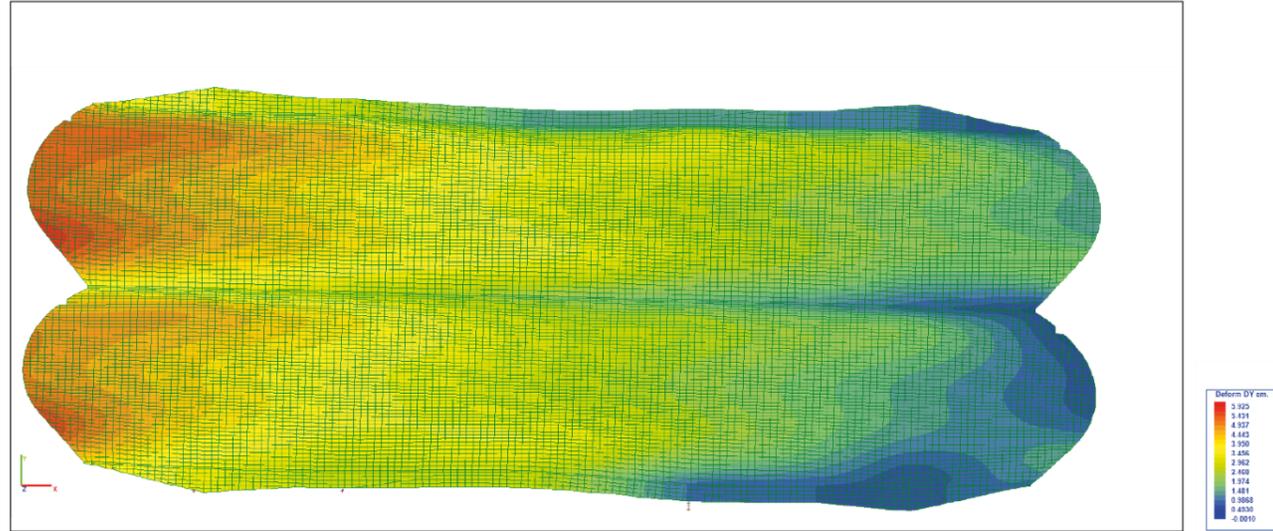


Modelo B Ejes plano armado de cubierta

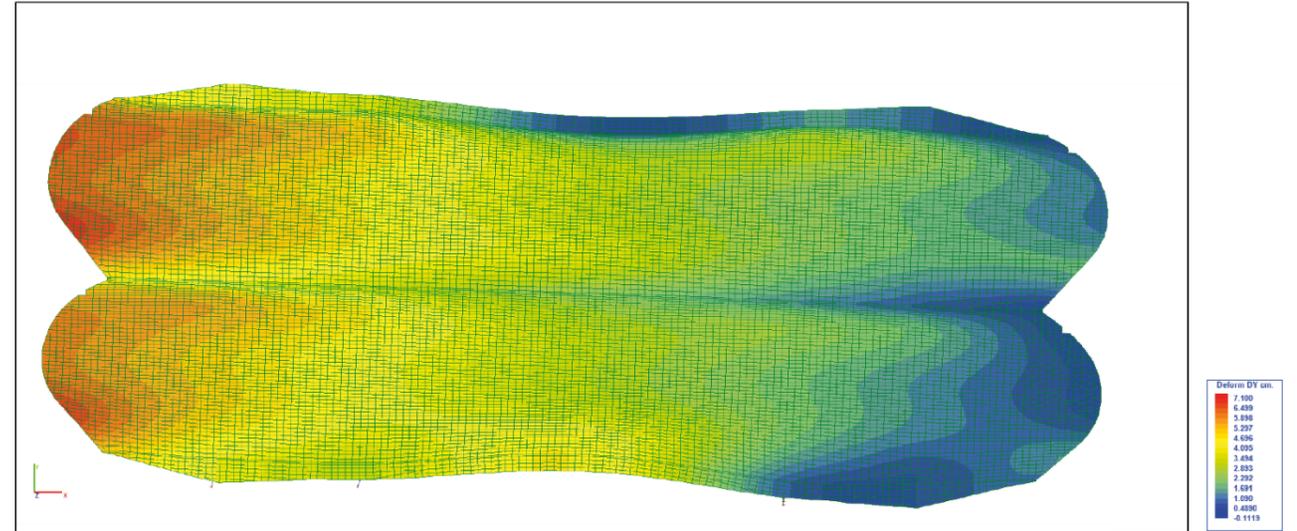


DESPLAZAMIENTOS Dy

Modelo A Ejes plano base

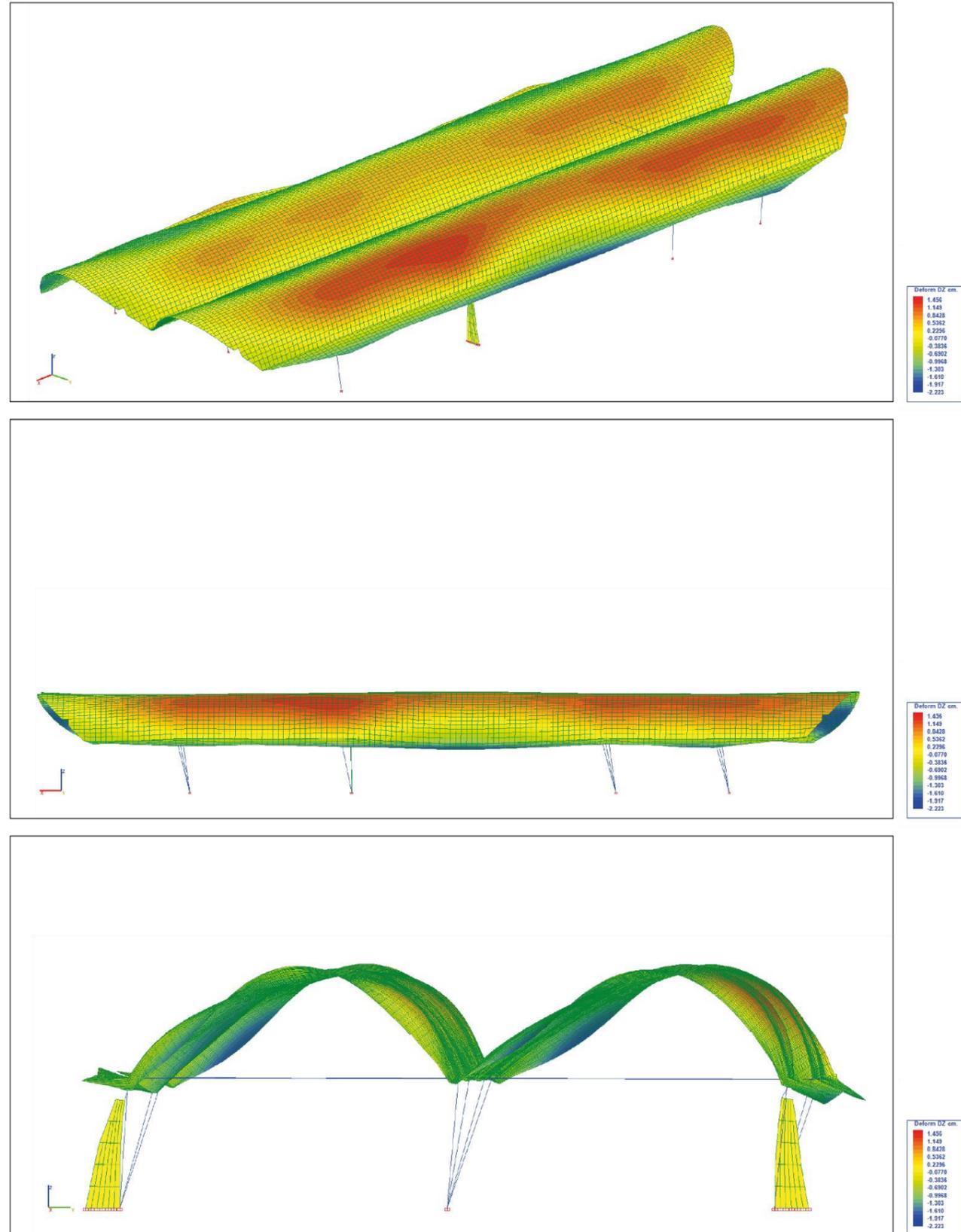


Modelo B Ejes plano armado de cubierta

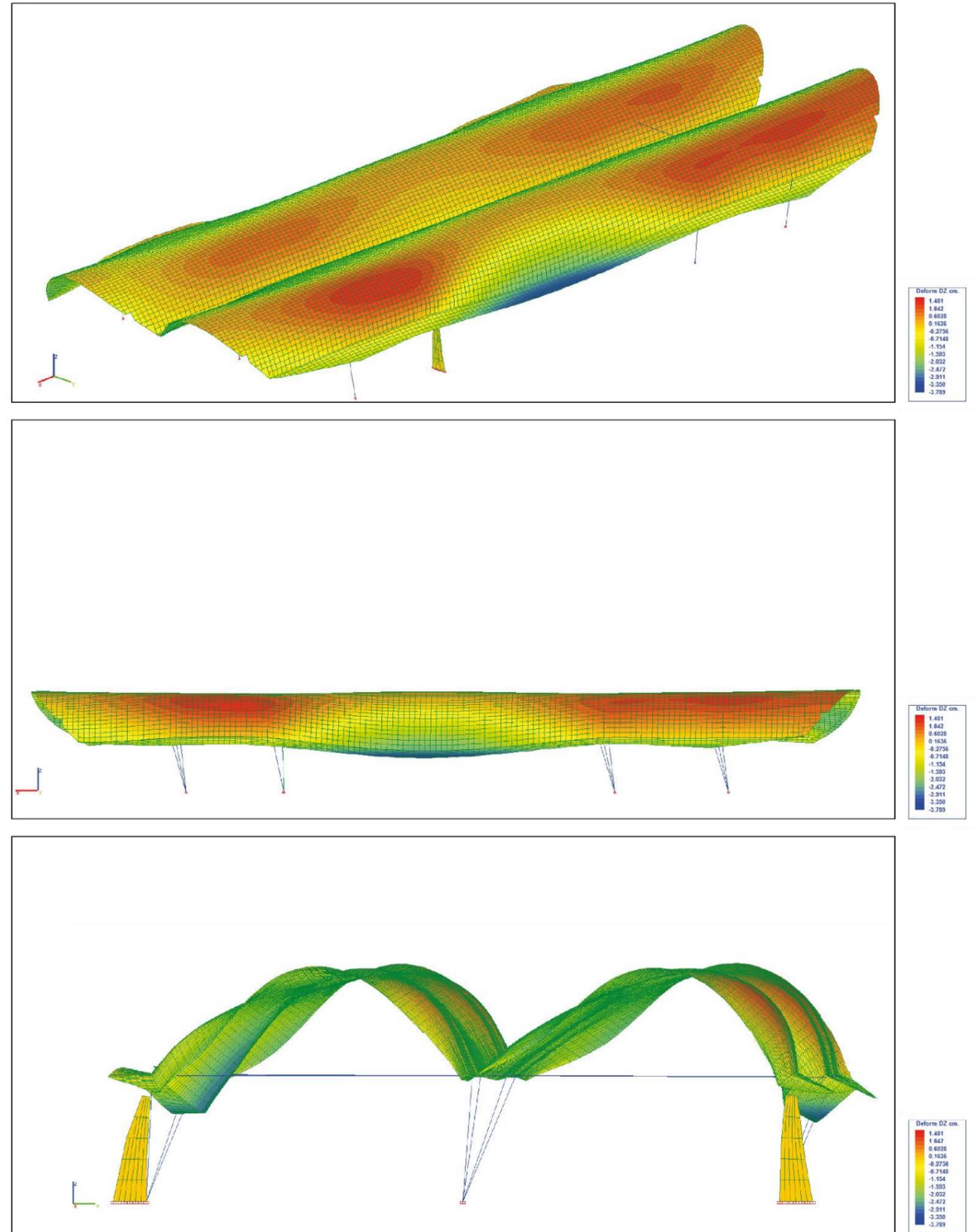


DESPLAZAMIENTOS Dz

Modelo A Ejes plano base

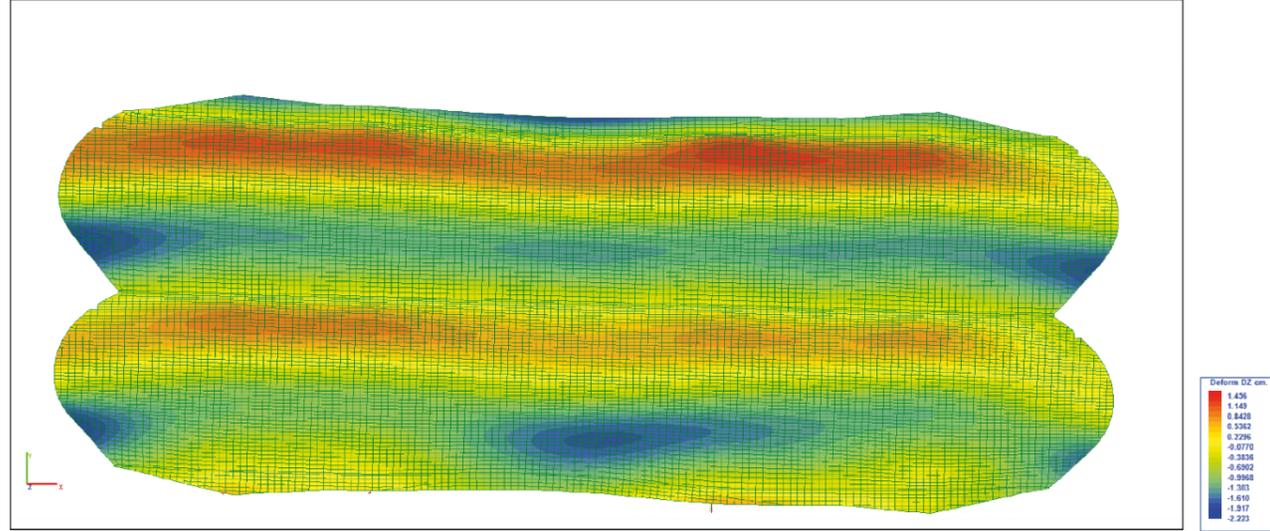


Modelo B Ejes plano armado de cubierta



DESPLAZAMIENTOS Dz

Modelo A Ejes plano base



Modelo B Ejes plano armado de cubierta

