



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la obra arquitectónica de Ildefonso
Sánchez del Río

An analysis of the architectural work of the Spanish
architect Ildefonso Sánchez del Río

Autor/es

Angel Luis Calvo García-Pellicer

Director/es

Elías Cueto Prendes

SINOPSIS

El hormigón armado o reforzado está plenamente asumido como uno de los materiales básicos en cualquier edificación moderna debido a sus excelentes propiedades constructivas y economía, y su conocimiento técnico está ahora ampliamente desarrollado y universalmente repartido. No obstante, durante buena parte del siglo pasado, en plena gestación y asentamiento en Europa del nuevo material, vive en España un excelente ingeniero civil que, apoyándose más en su poder creativo y su intuición técnica que en una rígida base matemática, se aventuró en la proyección y construcción de estructuras diáfanas de grandes luces de hormigón armado, llegando a ser una de las figuras más representativas mundialmente. El presente proyecto se desarrolla como homenaje a aquel ingeniero que armó el hormigón con su inusual ingenio: Ildefonso Sánchez del Río Pisón.

Reinforced concrete is widely assumed as one of the basic materials in any modern edification due to its excellent constructive properties and economy, and the technical knowledge of this material is now deeply developed and universally spreaded. However, during most of the twentieth century, in full gestation and settlement of this new material in Europe, an excellent civil engineer lives in Spain who, leaning more on his creative power and his technical intuition than on a rigid mathematical basis, ventured into the projection and construction of diaphanous reinforced concrete structures of large spans, becoming one of the most representative figures worldwide. This proyect is carried out as a tribute to that engineer that reinforced concrete with his unusual wit: Ildefonso Sánchez del Río Pisón.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	MODELADO Y ANÁLISIS RESISTENTE DEL PALACIO DE LOS DEPORTES DE OVIEDO	4
2.1	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	4
2.2	CARÁCTER, ALCANCE Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO	8
2.3	CONSIDERACIONES E HIPÓTESIS COMUNES A TODOS LOS MODELOS	9
2.4	MODELO A: ARCO-ONDA SIN NERVIOS DE RIGIDEZ.....	11
2.4.1	<i>Consideraciones, hipótesis y condiciones de contorno del modelo A</i>	11
2.4.2	<i>Evaluación de los resultados del modelo A</i>	12
2.5	MODELO B: ARCO-ONDA CON NERVIOS DE RIGIDEZ	14
2.6	MODELOS C Y D: DOVELA-ONDA SIN Y CON NERVIOS DE RIGIDEZ	15
2.6.1	<i>Consideraciones, hipótesis y condiciones de contorno de los modelos C y D</i>	15
2.6.2	<i>Evaluación de los resultados de los modelos C y D</i>	16
3.	MODELADO Y ANÁLISIS RESISTENTE DEL PARAGUAS OCTOGONAL	18
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	18
3.2	CONSIDERACIONES, HIPÓTESIS Y CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODELO.....	21
3.3	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	24
4.	CONCLUSIÓN	27
5.	BIBLIOGRAFÍA	28
	FUENTES BIBLIOGRÁFICAS DE LAS IMÁGENES.....	29
6.	ANEXOS	30
6.1	RESUMEN BIOGRÁFICO	30
6.2	REVISIÓN DE LA OBRA	32
6.2.1	<i>Inicios del hormigón armado en Europa y España</i>	32
6.2.2	<i>Aspectos generales de la obra de Ildefonso</i>	38
6.2.3	<i>Estructuras y cubiertas nevadas</i>	39
6.2.4	<i>Naves onduladas y bóvedas de grandes luces</i>	48
6.3	PLANOS E IMÁGENES DEL MODELO DEL PALACIO DE LOS DEPORTES	50
6.3.1	<i>Modelo A: Arco-Onda Sin Nervios</i>	51
6.3.2	<i>Modelo B: Arco-Onda Con Nervios</i>	52
6.3.3	<i>Modelo C: Dóvela-Onda Sin Nervios</i>	53
6.3.4	<i>Modelo D: Dóvela-Onda Con Nervios</i>	55
6.4	PLANOS E IMÁGENES DEL MODELO DEL PARAGUAS OCTOGONAL	57
6.5	CURRÍCULUM PROFESIONAL	60
6.6	LISTADO DE PATENTES PROPIAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 VISTA AÉREA DEL PALACIO DE LOS DEPORTES, 1972	4
FIGURA 2 IMAGEN DEL MODELO A DE ARCO-ONDA	4
FIGURA 3 VISTA INTERIOR DEL PALACIO DE LOS DEPORTES (FTJ)	5
FIGURAS 4 (A) Y (B) DOVELA-ONDA DEL PALACIO DE LOS DEPORTES; TIPOS DE SECCIONES DE BOVEDILLAS SEGÚN LA LUZ DEL ARCO	6
FIGURA 5 CONTRAFUERTES, ARTICULACIONES Y VUELOS LATERALES	7
FIGURA 6 DETALLE DE LOS REDONDOS DE LAS ARTICULACIONES	7
FIGURAS 7 (A) Y (B) DOVELA-ONDA Y SECCIÓN DOBLE T EQUIVALENTE; ENSAYO A ESCALA REDUCIDA DEL ARCO DE 100 M DE LUZ	8
FIGURA 8 PLANO DE LA SECCIÓN DE LA DOVELA, COTAS EN M	9
FIGURA 9 IMAGEN DEL MODELO A	11
FIGURAS 10 (A) Y (B) PLANO LATERAL DEL TRAZADO DEL ARCO (ISR INF CONST; VISTA LATERAL DEL ARCO DEL MODELO A	11
FIGURAS 11 (A) Y (B) DEFORMADA Y DESPLAZAMIENTOS EN Z DEL MODELO A	12
FIGURAS 12 (A) Y (B) FENÓMENO DE APERTURA DEL ARCO (MODELO A)	12
FIGURA 13 TENSIONES AXIALES DEL MODELO A	13
FIGURAS 14 (A) Y (B) GEOMETRÍA EXITOSA DEL MODELO B	14
FIGURAS 15 (A) Y (B) ERRORES GEOMÉTRICOS DEL MODELO B AL IMPORTAR EN ABAQUS®	14
FIGURAS 16 (A) Y (B) MODELO C, DOVELA-ONDA SIN NERVIOS; MODELO D, DOVELA-ONDA CON NERVIOS	15
FIGURAS 17 (A) Y (B) DESPLAZAMIENTOS EN Y DE LOS MODELOS C Y D	16
FIGURAS 18 (A) Y (B) TENSIONES MÁXIMAS ABSOLUTAS EN EL MODELO C	17
FIGURAS 19 (A) Y (B) TENSIONES MÁXIMAS ABSOLUTAS EN EL MODELO D	17
FIGURA 20 ILDEFONSO (IZQUIERDA) SOBRE EL PARAGUAS OCTOGONAL DE POLA DE SIERO, 1972	18
FIGURA 21 GEOMETRÍA DEL MODELO DE PARAGUAS OCTOGONAL	18
FIGURA 22 PANORÁMICA DEL MERCADO DE GANADO DE POLA DE SIERO, 1972	19
FIGURA 23 PLANO EN SECCIÓN DEL PARAGUAS OCTOGONAL	19
FIGURA 24 VISTA DE LA CATENARIA DE LOS PARAGUAS CUADRADOS	20
FIGURAS 25 (A) Y (B) ENSAYOS SOBRE EL PROTOTIPO HEXAGONAL (FTJ); PARAGUAS OCTOGONAL EN LA ACTUALIDAD (MC2)	21
FIGURAS 26 (A) Y (B) PLANO DE LA SECCIÓN DE REVOLUCIÓN DEL CAPITEL MÁS LA LÁMINA, COTAS EN MM; PIEZA DE REVOLUCIÓN	22
FIGURA 27 PLANO EN SECCIÓN DE LA APROXIMACIÓN REALIZADA PARA EL CÁLCULO DE LA CARGA CENTRAL, COTAS EN MM	23
FIGURA 28 CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODELO DE PARAGUAS OCTOGONAL	23
FIGURA 29 MALLA DEL MODELO DE PARAGUAS OCTOGONAL	24
FIGURAS 30 (A) Y (B) TENSIONES MÁXIMAS PRINCIPALES EN EL EXTRADÓS E INTRADÓS DEL PARAGUAS OCTOGONAL	24
FIGURA 31 ZONAS DE TENSIÓN EN LA LÁMINA	25
FIGURA 32 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DEL PARAGUAS OCTOGONAL	26
FIGURA 33 RETRATO DE SÁNCHEZ DEL RÍO	30
FIGURAS 34 (A), (B) Y (C) BARCA DE LAMBOT; PUENTE DE CHAZELET (FRANCIA); DEPÓSITO DE PUIGVERD (LLEIDA)	33
FIGURAS 35 (A) Y (B) CARTEL PUBLICITARIO DEL SISTEMA HENNEBIQUE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PISOS; LAVANDERÍA INDUSTRIAL DUMÉRIL, JAÉGLÉ ET COMPAGNE, 1902 (FRANCIA)	34
FIGURAS 36 (A) Y (B) JOSÉ EUGENIO RIBERA; TERCER DEPÓSITO DE MADRID TRAS DEL DESASTRE	36
FIGURAS 37 (A) Y (B) PARAGUAS DE LA CORREDORIA Y PARAGUAS DE LA LECHE EN LA ACTUALIDAD	39
FIGURAS 38 (A) Y (B) PLANOS EN PLANTA Y SECCIÓN DEL PARAGUAS DE LA LECHE	40
FIGURA 39 PARAGUAS EXCÉNTRICO	40
FIGURA 40 PLANOS EN PLANTA Y SECCIÓN DEL PARAGUAS EXCÉNTRICO	41
FIGURA 41 PANORÁMICA DEL MERCADO DE GANADO DE POLA DE SIERO, 1972	41
FIGURA 42 PRUEBAS DE CARGA SOBRE EL PROTOTIPO HEXAGONAL	42
FIGURA 43 PLANO EN SECCIÓN DEL PARAGUAS OCTOGONAL	42
FIGURA 44 ILDEFONSO (IZQUIERDA) SOBRE EL PARAGUAS OCTOGONAL DE POLA DE SIERO, 1972	42
FIGURAS 45 (A) Y (B) IV DEPÓSITO DE OVIEDO EN LA ACTUALIDAD; PLANO EN PLANTA DEL IV DEPÓSITO	43
FIGURAS 46 (A) Y (B) CIMBRA GIRATORIA; PERÍMETRO EXTERIOR DEL IV DEPÓSITO	44
FIGURAS 47 (A) Y (B) PORTADA DE LA REVISTA OVIEDO, 1986; PLANO EN PLANTA DEL IV DEPÓSITO DE MADRID	45
FIGURAS 48 (A) Y (B) ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DEL MERCADO DE POLA; VISTA AÉREA EN LA ACTUALIDAD	45

FIGURA 49 VISTA INTERIOR DEL MERCADO DESDE LA INTERSECCIÓN DE LOS CATETOS	46
FIGURAS 50 (A) Y (B) ARCO DE DOBLE ARISTA Y ESQUEMA DEL MISMO.....	46
FIGURA 51 MARQUESINA DEL MERCADO DE POLA DE SIERO	47
FIGURA 52 (A) Y (B) FABRICACIÓN DE PIEZAS CERÁMICAS EN RÍO-CERÁMICA; FACHADA DE LA FÁBRICA DE ARMAS DE OVIEDO.....	48
FIGURAS 53 (A) Y (B) NAVE MERSA Y SECADEROS DE RÍO-CERÁMICA	49
FIGURAS 54 (A) Y (B) NAVES DE FEFASA Y RÍO-CERÁMICA	49
FIGURA 55 PLANO EN SECCIÓN DE LA DOVELA ONDA.....	50
FIGURA 56 PLANO DE LA SECCIÓN DE LA DOVELA MODELADA, COTAS EN M.....	50
FIGURA 57 PLANOS DE LAS BOVEDILLAS DE LA ZONA CURVA (ARRIBA) Y DE LA ZONA PLANA (ABAJO), COTAS EN MM	50
FIGURA 58 PLANO DEL ARCO ONDA SIN NERVIOS (MODELO A)	51
FIGURAS 59 (A), (B), (C) Y (D) GEOMETRÍA DEL ARCO SIN NERVIOS (MODELO A)	51
FIGURAS 60 (A) Y (B) DETALLES DE LA MALLA DEL ARCO CON NERVIOS (MODELO A)	52
FIGURA 61 PUNTOS PARA EL ANÁLISIS TENSIONAL DEL APARTADO 2.4.2 (MODELO A).....	52
FIGURA 62 PLANO DEL ARCO CON NERVIOS (MODELO B).....	52
FIGURAS 63 (A), (B) Y (C) GEOMETRÍA DEL ARCO CON NERVIOS (MODELO B)	53
FIGURA 64 PLANO DE LA DOVELA SIN NERVIOS (MODELO C), COTAS EN MM	53
FIGURAS 65 (A) Y (B) GEOMETRÍA DE LA DOVELA SIN NERVIOS (MODELO C).....	54
FIGURA 66 DESPLAZAMIENTOS EN Z DEL MODELO C.....	54
FIGURAS 67 (A), (B) Y (C) DETALLES DE LA MALLA DE LA DOVELA SIN NERVIOS (MODELO C)	54
FIGURA 68 PLANO DE LA DOVELA CON NERVIOS (MODELO D), COTAS EN MM	55
FIGURAS 69 (A) Y (B) GEOMETRÍA DE LA DOVELA CON NERVIOS (MODELO D)	55
FIGURA 70 DESPLAZAMIENTOS EN Z DEL MODELO D	55
FIGURAS 71 (A), (B) Y (C) DETALLES DE LA MALLA DE LA DOVELA CON NERVIOS (MODELO D)	56
FIGURA 72 PLANO DEL SECTOR DEL PARAGUAS OCTOGONAL, COTAS EN MM.....	57
FIGURA 73 PLANO DE LA SECCIÓN DE REVOLUCIÓN DEL CAPITEL MÁS LA LÁMINA, COTAS EN MM	57
FIGURAS 74 (A), (B), (C) Y (D) IMÁGENES DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO DE PARAGUAS OCTOGONAL.....	58
FIGURAS 75 (A) Y (B) MODELO DEL SECTOR DEL PARAGUAS OCTOGONAL.....	58
FIGURAS 76 (A), (B), (C) Y (D) DETALLES DE LA MALLA DEL PARAGUAS OCTOGONAL.....	59
FIGURAS 77 (A) Y (B) TENSIONES MÁXIMAS ABSOLUTAS GENERADAS EN EL PARAGUAS, CON MALLA.....	59
FIGURAS 78 (A) Y (B) PUNTOS DE MÁXIMA Y MÍNIMA TENSIÓN, ERROR GEOMÉTRICO.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 PROPIEDADES HORMIGÓN EN MASA DE CEMENTO PORTLAND ESTÁNDAR	9
TABLA 2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MALLAS EMPLEADAS	10
TABLA 3 SELECCIÓN DE VALORES DE LAS TENSIONES EN LOS EJES PRINCIPALES.....	13

1. INTRODUCCIÓN

En la arquitectura contemporánea resulta costoso encontrar una edificación donde la resolución estructural quede exenta de la aplicación de **hormigón armado** como uno de sus materiales fundamentales. Sus excelentes propiedades resistentes, su versatilidad formal y, sobre todo, su disponibilidad y economía, lo han consolidado con el tiempo como el material de construcción por excelencia. Además, el desarrollo en las técnicas de cálculo y las herramientas computacionales en las últimas décadas permiten a los arquitectos e ingenieros actuales engendrar diseños estructurales donde las secciones de hormigón soportan todo tipo de esfuerzos, reforzando localmente los puntos que, con elevada precisión, se sabe que serán más solicitados.

No obstante, los conocimientos actuales cargan a sus espaldas con un recorrido de más de cien años desde la aparición del hormigón armado a finales del siglo XIX con los descubrimientos de *Jean-Louis Lambot* (1849-1867), *François Coignet* (1814-1888) y *Joseph Monier* (1823-1906). Un trayecto que se vio impulsado en el cambio de siglo por las grandes firmas constructoras europeas (*Wayss & Freytag*, *Möller o Hennebique*, entre otras) que supieron vislumbrar las posibilidades técnicas del nuevo material, y apostaron por su investigación empírica para la consiguiente explotación comercial por medio de patentes¹.

La versatilidad formal del hormigón armado; la capacidad de romper las barreras dimensionales creando mayores voladizos y amplios espacios diáfanos; las propiedades ignífugas cada vez más necesarias tanto en edificios públicos densamente transitados como en las numerosas incipientes fábricas; y la economía asociada tanto a su adquisición como a su moldeo y posterior mantenimiento; atrajeron la atención de numerosos técnicos ansiosos de desarrollar **nuevos sistemas edificatorios** que atendieran las exigencias sociales y productivas de la época.

En España, muchas de estas personalidades están recogidas en la que José Ortega Sopotorno y Fernando Sáenz Ridruejo denominaron como la “*Generación del 27 técnica*” (Saenz Ridruejo, 2002), un grupo multidisciplinar de graduados en la Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Madrid entre 1917 y 1931 unidos por su especial vitalidad, carácter empresarial y sus cuantiosas aportaciones al desarrollo tecnológico del momento².

Dentro de este grupo se encuentra el protagonista del presente proyecto: Ildefonso Sánchez del Río (1898-1980), un hombre dotado con un ingenio sobresaliente que contribuyó durante toda su carrera al desarrollo y asentamiento en España de este novedoso material, destacando principalmente por su trabajo en el campo de las **estructuras diáfanas de grandes luces**, tanto nervadas como laminares.

Discípulo del reconocido proyectista pionero en la introducción del hormigón armado en nuestro país de la mano de la firma francesa *Hennebique*, J. Eugenio Ribera (1864-1936), heredó de él su simpatía hacia el mencionado material, así como los valores de racionalidad, economía y constructividad³. Al igual que su maestro, Ildefonso desarrolló una gran afinidad hacia el pensamiento práctico, dejando de lado los complejos y minuciosos cálculos en pos de un método donde lo que prevalece es la experiencia proyectiva y constructiva guiada por la **intuición técnica**, lo que Ildefonso denominaba como “*el ojo clínico del ingeniero*” (Sánchez del Río, 1931).

El principal objetivo del presente trabajo es **ilustrar el ingenio y la potencia creativa** que esconde la obra arquitectónica de Sánchez del Río mediante el análisis explicativo de la misma, justificando las formas, técnicas, materiales y disposición escogidos. Se pretende rendir un homenaje a la capacidad proyectiva de Ildefonso, un hombre que, partiendo de una “pobre” -según él- cualificación matemática y un panorama de conocimiento incierto, consiguió levantar

^{1, 2 y 3} Ver el anexo 6.2.1 “*Inicios del hormigón armado en Europa y España*” para más información al respecto.

estructuras tan impresionantes como el Mercado de Pola de Siero (1931) o el Palacio de los Deportes de Oviedo (1975).

Durante la formación y los inicios de la carrera de Ildefonso, el **conocimiento** acerca del comportamiento mecánico y el cálculo del hormigón armado era fundamentalmente **experimental**, y estaba en cierta medida privatizado por las firmas europeas que costeaban dichas investigaciones. Durante las primeras décadas del siglo XX no existía en España una norma unificada acerca del cálculo y la aplicación del hormigón armado, teniendo cada una de las grandes firmas su propio método constructivo independiente. De hecho, *“la primera Instrucción española de obligado cumplimiento no fue editada hasta 1939 (provisional), (...) editándose de forma definitiva en el año 1944.”* (Pamies Rahan, 2011). No obstante, sí se contaba antes de esa fecha de diversos libros y tratados de gran valor pero no reconocidos con el rango de orden, la mayoría de carácter empírico, exceptuando algunos estudios matemáticos como *“La mecánica del hormigón armado”* (1911) de Juan Manuel Zafra (1869-1923). Es por ello que durante la primera mitad de siglo cobrarán una especial importancia los laboratorios de ensayos y las revistas de divulgación científica⁴.

Por estos motivos Sánchez del Río, al igual que otros muchos intelectuales coetáneos, tuvo que desarrollar sus propios métodos para resolver y levantar sus estructuras de hormigón armado. Desde sus primeras obras, Ildefonso supo entender la crucial misión a cargo del proyectista de dar con la **geometría** estructural idónea que haga trabajar el conjunto de manera más cercana posible a la **compresión** pura, conjugando la elección y disposición de los materiales para evitar los problemas de sobra conocidos ante la tracción del hormigón. Además, numerosos escritos suyos denotan una especial preocupación por las formas estéticas o, como él las llamaba, “arquitectónicas”, sin dejar que nunca éstas restaran racionalidad y economía a sus edificios. Precisamente ahí reside su genialidad, en la capacidad de conjugar en armonía criterios estructurales, estéticos, constructivos y económicos en el mismo proyecto.

A lo largo de todas las obras de Ildefonso se puede identificar un factor común: la búsqueda de **diafanidad** y los espacios huecos. Esta pretensión de desnudez estructural fue compartida por muchos ingenieros y arquitectos europeos y americanos de la época en un movimiento que Pepa Casinello muy acertadamente denominó como *“la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna”* (Casinello, 2011), resultado de la penetración del nuevo paradigma de pensamiento **“less is more”** que, más allá de la arquitectura, inundaba todos los aspectos socioculturales de aquel entonces. Corriente cuyo comienzo coincidió con los primeros años de profesión de Ildefonso, con la construcción de la primera estructura laminar de hormigón armado en Jena (Alemania) en 1925, el *Zeiss Factory*, proyectada por los ingenieros de la firma *Dyckerhoff and Widman* que sin duda fueron los protagonistas de esta nueva corriente.

“Pero la complejidad de los sistemas primitivos de cálculo y la falta de experiencia proyectual y constructiva de aquellos momentos, ponen de manifiesto la enorme dificultad que existía para acceder al incipiente conocimiento técnico de las recién nacidas estructuras laminares, no sólo para Sánchez del Río, sino para la mayoría de ingenieros y arquitectos ávidos de este conocimiento.” (Cassinello, 2012).

Por este motivo la introducción de Ildefonso a la mencionada aventura de las *Thin Concrete Shells* se retrasaría hasta bien entrados los años 40, cuando comenzaría a investigar y desarrollar su original método de las *dovelas-onda*. Hasta entonces, la estructura estándar proyectada por Sánchez del Río estará conformada por un **esqueleto** estructural de hormigón armado que ejerce toda la función resistente y que sostiene las láminas autoportantes que originan la cubierta. Este esqueleto podría componerse de un entramado de pilares, vigas y viguetas o muy frecuentemente de arcos, pudiendo ser estos articulados o rígidos. Sobre este esqueleto se apoyarían o colgarían las delgadas y ligeras láminas de la cubierta, excepcionalmente fabricadas de fibrocemento pero generalmente de hormigón armado. En esta metodología el hecho que cobra más relevancia es la ingeniosa elección de las adecuadas geometrías a aplicar en cada caso para optimizar los procesos de diseño y construcción. Éste es el procedimiento que Sánchez del Río desarrolló y aplicó desde sus primeras obras y durante los 30 años posteriores, y con el que construyó algunas de sus obras más originales como las

⁴ Ver el anexo 6.2.1 *“Inicios del hormigón armado en Europa y España”* para más información al respecto.

numerosas cubiertas en forma de paraguas (1923-1927), el IV Depósito de Aguas de Oviedo (1928) o el mencionado Mercado cubierto de Pola de Siero (1931).

A mitad de los años 40, cuando los retos de diafanidad superaban las capacidades de esta técnica de esqueleto con finas cubiertas, Ildefonso comenzó a encaminarse hacia la construcción de bóvedas onduladas de cañón cilíndrico, empleadas anteriormente por sus coetáneos *Luigi Nervi* (1891-1979) y *Eugène Freyssinet* (1879-1962). Esta técnica comprende la construcción de arcos autoportantes de perfil parabólico y sección cilíndrica, sucedidos uno tras otro creando la mencionada bóveda arrugada. De este modo el cálculo de la estructura se simplificaba al de uno solo de los arcos, cumpliendo las exigencias matemáticas del autor. Los *arcos-onda* podían encontrarse arriostrados directamente al suelo o descansando sobre muros de carga, y era común contrarrestar los empujes horizontales de los arcos mediante tirantes o contrafuertes. La construcción de estos arcos es el resultado de más de 20 años de investigación teórica y práctica que llevó a cabo Ildefonso para desarrollar este excepcional procedimiento denominado como el método de las *dovelas-onda*, consistente en la fabricación a pie de obra de módulos individuales (dovelas) de composición mixta de hormigón, acero y cerámica, que se hizaban y ensamblaban sucesivamente formando el perfil del arco. Esta metodología fue empleada por Sánchez del Río en numerosas naves industriales como el hangar-taller para el Instituto Nacional de Técnica Aeronáutica (1946), pero su máxima expresión la encontramos en la que es sin duda su obra más relevante, el Palacio de los Deportes de Oviedo, proyectado en 1966 pero no inaugurado hasta 1975. La carrera profesional de Sánchez del Río se coronará con la proyección y construcción de sus primeras estructuras laminares enteramente de hormigón armado: los Paraguas del Mercado de Ganado de Pola de Siero (1972).

En base a lo expuesto, se ha decidido que el fundamento troncal del presente proyecto resida en la explicación de las metodologías empleadas para diseñar y levantar las estructuras laminares de la etapa final del ejercicio de Ildefonso. En concreto, las edificaciones seleccionadas son el **Palacio de los Deportes de Oviedo** y el **Paraguas Octogonal de Pola de Siero**. En cada una de ellas se ha realizado un detallado análisis descriptivo acerca de los procesos de diseño y construcción desarrollados por el autor, tratando de razonar y justificar las geometrías y los materiales aplicados y su relevancia en la estabilidad estructural. Estos estudios se han completado mediante el **modelado y análisis computacional** resistente de las estructuras en cuestión, cuyo objetivo no es la obtención precisa de deformaciones y tensiones, sino ayudar a esclarecer y comprender el comportamiento estructural de los edificios. En definitiva, el trabajo pretende revelar cómo Sánchez del Río afrontaba la búsqueda de la compresión pura, ilustrando así la genialidad del razonamiento que llevaba a cabo para proyectar y construir estas impresionantes estructuras.

La total comprensión de la relevancia de la obra de Sánchez del Río y de la potencia creativa escondida tras ella requerirá de la lectura de los **anexos** adjuntos. En ellos, además de redactarse un breve resumen biográfico del ingeniero, se compilan y explican detalladamente las particularidades técnicas de sus principales proyectos, así como el marco histórico que los comprende. Como colofón se adjunta una selección cronológica de los proyectos que Ildefonso llevó a cabo a lo largo de su carrera, junto con un listado de las patentes más notables que consiguió a su nombre. También en este último apartado se podrán consultar los planos e imágenes adicionales de los modelos computacionales llevados a cabo.

2. MODELADO Y ANÁLISIS RESISTENTE DEL PALACIO DE LOS DEPORTES DE OVIEDO

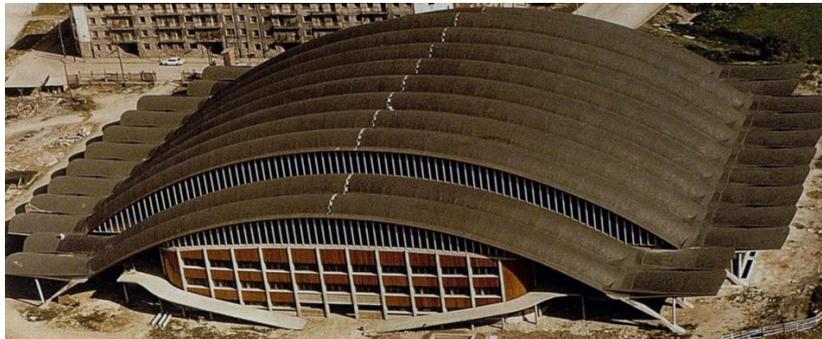


Figura 1 Vista aérea del Palacio de los Deportes, 1972

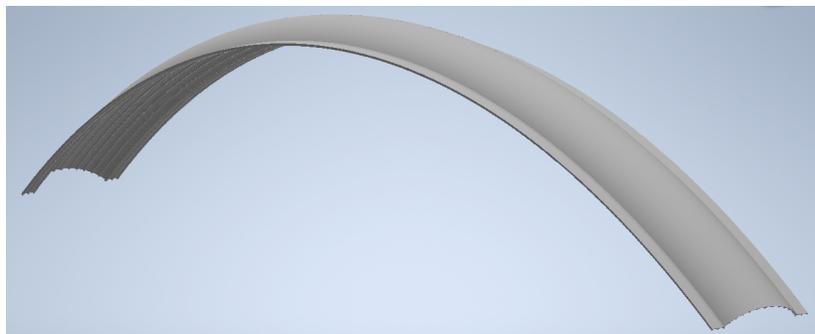


Figura 2 Imagen del Modelo A de Arco-Onda

2.1 Descripción de la estructura

El Palacio de los Deportes de Oviedo es la obra más ambiciosa y sin duda más relevante de Sánchez del Río, pues constituye la máxima expresión de su genuino método de construcción de las *dovelas-onda*. Es en ella donde el autor satisface su ansiada pretensión de levantar estructuras diáfanas de grandes luces, haciendo uso de *arcos-onda* que llegan a salvar vanos de 100 m, generando en conjunto un espacio de 7.000 m² sin una sola columna. Sobrepasa de esta manera los límites de sus previas edificaciones levantadas con esta metodología (con vanos máximos de 35 m en las naves Río-Cerámica en Madrid, 1957, y el Almacén de Azúcar en Palencia, 1960), confirmando finalmente la validez de este método de diseño para estructuras laminares de grandes luces. Esta obra no sólo representa la finalización de la carrera profesional de Ildelfonso -para cuya inauguración oficial en 1975 contaba ya con 77 años de edad- si no además la culminación de los más de 20 años del estudio y desarrollo de esta excepcional técnica.

Las *dovelas-onda* son resultado de una incansable búsqueda del método y la forma de construir cubiertas ligeras de grandes luces. (...) Sánchez del Río, tal y como estaban haciendo gran parte de los más destacados maestros de las estructuras laminares, como Pier Luigi Nervi o Eduardo Torroja, introdujo la "ondulación" en la superficie de sus cubiertas, geometría que le dio la clave para dotarlas de mayor rigidez de forma frente al pandeo, permitiéndole incrementar la luz de su vano. (Casinello, 2011).

Esta **metodología** está orientada a la construcción bóvedas de cañón cilíndrico mediante arcos con directrices normalmente parabólicas, los cuales se componen de módulos individuales (*dovelas*) de composición mixta de hormigón, acero y cerámica, ejecutados a pie de obra y posteriormente hizados y ensamblados sobre la cimbra. La rigidez de las estructuras planteadas con el método de las *dovelas-onda* reside en tres principios: la estabilidad natural asociada al

empleo de arcos, capaces de convertir las cargas externas en esfuerzos fundamentalmente compresivos direccionados a lo largo de la línea media del arco; la resistencia al pandeo que supone la aplicación de una sección ondulada, necesaria para tolerar dichos esfuerzos compresivos; y la ligereza inherente al empleo de bovedillas cerámicas en la sección, que reducirá el peso propio y, en consiguiente, las tensiones sufridas por la estructura. Estos tres principios actúan en colaboración para generar las grandes cubiertas con espesores ínfimos. Según expuso el propio Ildefonso, sería posible construir bóvedas de hasta 200 m de luz con espesores de 37 cm. (Sánchez del Río, 1960).

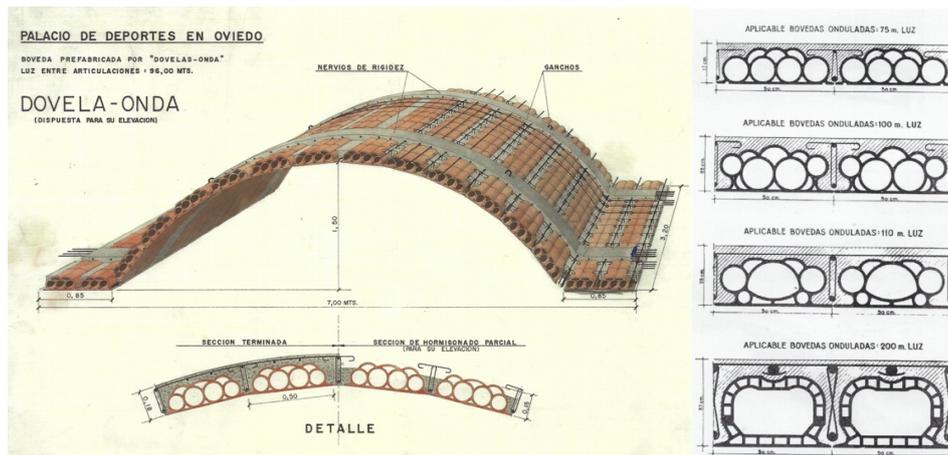
El **arco** es aquel elemento constructivo capaz de salvar un vano repartiendo el peso propio de la estructura y las cargas externas en forma de esfuerzos de compresión a lo largo de la directriz hasta los apoyos, que serán los encargados de recoger los empujes generados. La estabilidad de un arco está directamente ligada con el grado de aproximación de su línea media al antifunicular de las cargas que sobre él gravitan, pues de ello dependerá la aparición de esfuerzos cortantes y momentos flectores, haciendo que la estructura trabaje en mayor o menor medida a compresión. Idealmente, cuando la directriz es coincidente con el antifunicular y las cargas se reparten de manera uniforme, cada uno de los puntos del arco se encuentra en un estado puramente compresivo. Este hecho cobra especial relevancia cuando el material a emplear en el arco carece de una elevada resistencia a la tracción, como es el caso del hormigón. En la realidad, a pesar de que se de esta antifunicularidad, el arco estará sometido a asimetrías tanto estructurales como de carga (viento lateral, por ejemplo), que generarán las consecuentes tensiones indeseadas. Con este objetivo, en el caso que aquí compete, Sánchez del Río proyectó una directriz que sigue un trazado sensiblemente coincidente con el antifunicular del peso propio, sometido a fuerzas fundamentalmente estáticas, gravitatorias y simétricas.



Figura 3 Vista interior del Palacio de los Deportes

En lo referente al caso en cuestión, el Palacio de los Deportes es una estructura laminar ondulada conformada por la sucesión de 12 arcos biarticulados de tan sólo 18 cm de espesor. La estructura está dividida en tres secciones: la bóveda central, constituida por 8 arcos de 100 m de luz entre los arranques (96 entre articulaciones) y dos bóvedas auxiliares conformadas por 2 arcos de 90 m de luz entre los arranques (86 entre articulaciones) cada una. Las directrices de los arcos responden todas a la misma parábola, por lo que se genera una diferencia de alturas entre las diferentes secciones que el autor aprovecha para la entrada de luz de luz natural mediante la colocación de amplios lucernarios verticales. Todos los arcos poseen un ancho de 7 m, por lo que la nave central y las auxiliares alcanzan anchos de 56 y 14 m, respectivamente, generando una planta sensiblemente rectangular de 84x100 m².

Los ingenieros y arquitectos de la época desarrollaron muy distintas soluciones para aumentar la resistencia al pandeo en las estructuras laminares, que muy frecuentemente se sustentaban en un mismo principio: la **ondulación** de la lámina. En el caso del método de las *dóvelas-onda*, la forma de esta sección varía en función de las solicitaciones de resistencia a pandeo que requiera la magnitud del arco, pudiendo aumentar el espesor de la dovela (altura de las bovedillas) o la flecha de la misma para incrementar dicha resistencia. Así pues, en el caso del Palacio de los Deportes, la dovela adopta la forma de la *figura 4 (a)*, mientras que en la *figura 4 (b)* se pueden observar las distintas geometrías de las bovedillas cerámicas que Ildefonso desarrolló en función del vano del arco.



Figuras 4 (a) y (b) Dovela-onda del Palacio de los Deportes; Tipos de secciones de bovedillas según la luz del arco

Estas **bovedillas** cerámicas fueron estudiadas detalladamente por Idefonso en su aplicación para sus patentes de forjados de pisos de hormigón. La función que desempeñan estas bovedillas es cuádruple: aligerar la estructura; facilitar el encofrado de las dovelas gracias a su excepcional adherencia con el hormigón; servir de aislamiento térmico y acústico debido al aire que encierran en sus cavidades; y absorber en cierta medida los esfuerzos tangenciales generados en el hormigón.

Las dovelas se engendraban in situ a pie de obra sobre un encofrado de madera, apoyando sobre éste las bovedillas y posicionando a continuación el forjado de acero. El hormigonado se dividía en dos fases: un hormigonado parcial a pie de obra, que cubría la mitad del espesor total, y un hormigonado final continuo, una vez ensambladas las dovelas en el arco. Para poder realizar la elevación de las 5 ton sin que se descompusiera la dovela era necesario añadir los **nervios de rigidez**, que albergan los 4 puntos de anclaje de la grúa. Estos nervios además poseen la crucial función estructural de mantener la curvatura de la sección en situación de carga y así evitar la “apertura” del arco, que llevaría al colapso del mismo. Este fenómeno de apertura es estudiado posteriormente generando un modelo sin dichos nervios de rigidez. El ensamblaje se realizaba sobre una cimbra de acero y madera, que se trasladaba en la dirección del cañón conforme se terminaban los arcos. El descimbramiento aplicado fue por clave, separando los dos semiarcos con la ayuda de 7 gatos hidráulicos posicionados en los nervios de rigidez de las dovelas de la clave.

Los arcos están biarticulados haciendo uso de contrafuertes de hormigón armado que parten a una altura de 4'5 m, y a una distancia de 2 m de los arranques. Estos contrafuertes transmiten la resultante oblicua de 250 ton a través de las **articulaciones** hasta las zapatas subterráneas, en las que hubo que emplear pilotes de hasta 20 metros socavados a 20° para conseguir contrarrestar el empuje horizontal, debido a la mala calidad del estrato superficial (Sánchez del Río, 1977). En el punto medio de los contrafuertes se encuentran las articulaciones, necesarias para transmitir los empujes a la cimentación de la manera más estable posible. Están conformadas cada una por 7 redondos F60 cromados de 60 mm de diámetro, y dispuestas concienzudamente a la altura del espectador dentro de una vitrina iluminada, haciendo resaltar con un sólo golpe de vista la relevancia que toman en la estabilidad de la estructura.

En el perímetro lateral del edificio se encuentra una marquesina sensiblemente horizontal proyectada en continuidad con la sección ondulada del arco. La sustentación de estos vuelos laterales se consigue mediante nervios en forma de espadines de hormigón que nacen de la parte superior de los contrafuertes, y que cuentan con el apoyo intermedio de una columna circular hueca que sirve además de desagüe de evacuación del agua de lluvia. La cubierta en sí se conforma de piezas curvas cerámicas apoyadas sobre los nervios.



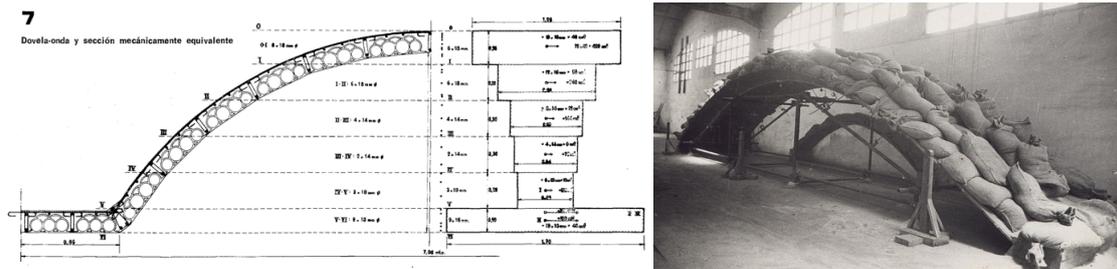
Figura 5 Contrafuertes, articulaciones y vuelos laterales



Figura 6 Detalle de los redondos de las articulaciones

Conviene resaltar brevemente el método de cálculo que Sánchez del Río aplicó para el **cálculo** resistente de los arcos ondulados. Éste se fundamenta en la transformación del arco de sección ondulada en un nervio curvo de hormigón armado de sección doble T disimétrica de alma variable, donde la dovela queda dividida en 6 sectores rectangulares mecánicamente equivalentes con coincidencia de sus centros de gravedad, tal y como se puede observar en la *figura 7 (a)*. De esta manera, el cálculo del arco completo se limita al de una viga curva biarticulada.

Además, durante la investigación y desarrollo del método de las *dovelas-onda* era necesario contrastar experimentalmente los resultados del cálculo teórico, para validar la hipótesis de viga doble T disimétrica. Para ello, Sánchez del Río en colaboración con Carlos Benito diseñaron una serie de **ensayos** a escala 1:10 sobre el arco onda de 100 m de luz, que se llevaron a cabo en el Laboratorio de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. De esta manera, sobre aquel modelo de 10 m de luz y 20 mm de espesor se aplicaron diversos estados de sobrecarga -*figura 7 (b)*-, midiendo las deformaciones pertinentes (principalmente flecha del arco y apertura de la dovela) con las que se podían extraer las tensiones que sufría la estructura. Sánchez del Río presume en numerosos escritos de el “*excepcional comportamiento elástico y rigidez*” que resultó tener el modelo a escala reducida, con flechas y aperturas de dovela muy inferiores a las obtenidas en el cálculo (Sánchez del Río, 1957).



Figuras 7 (a) y (b) Dovela-Onda y sección doble T equivalente; Ensayo a escala reducida del arco de 100 m de luz

2.2 Carácter, alcance y objetivos del estudio

La tipología estructural descrita previamente simplifica en gran medida el cálculo de la misma, condición requerida en toda obra de Sánchez del Río, que en numerosos escritos remarca su "pobre" cualificación matemática, y la importancia de saber elegir las formas geométricas adecuadas para racionalizar los procesos de diseño y de construcción. De este modo, el cálculo del Palacio de los Deportes se reduce a estudiar el comportamiento de uno sólo de los *arcos-onda*, y este es precisamente el objeto de estudio del presente modelo computacional. Debe entenderse que el análisis resistente llevado a cabo no tiene como objetivo el dimensionamiento preciso de la estructura mediante la obtención pormenorizada de tensiones y deformaciones. El estudio aquí expuesto se realiza con una **pretensión comprensiva**, que tiene como objetivo entender y hacer entender el por qué de la tipología estructural empleada, los materiales elegidos, la sección aplicada y el posicionamiento del forjado. Para ello, se busca extraer de la simulación la distribución principal de tensiones generadas por el peso propio de la estructura, tanto a lo largo de la directriz del arco como a lo largo de la propia sección, con el fin de comprender qué tipo de esfuerzos sufre la estructura y el consecuente reparto de los distintos materiales empleados en la misma. El objetivo final es demostrar mediante los modelos que la tipología estructural se diseña en búsqueda de la compresión pura. Por otra parte, pese a que la situación más crítica para el arco se da en la etapa de construcción cuando solamente hay un arco levantado, el estudio busca explicar la estructura en su configuración final, es decir, aquella donde los arcos contiguos ya están contruidos.

Inicialmente, el presente estudio se pretendía llevar a cabo mediante la simulación de un único modelo –modelo A– de arco-onda. En este modelo se obviaron los nervios de rigidez de las dovelas, pues se malinterpretó que su única función era la de dar la rigidez suficiente a la dovela para su elevación con grúa. Los primeros resultados evidenciaron que estos nervios no sólo sí que desempeñan una función estructural, sino que además esta función es crucial para mantener la geometría de la dovela y por tanto la estabilidad de la obra. En consiguiente, se decidió complementar el estudio con otro modelo que sí contemplase dichos nervios, el modelo B. No obstante, el cálculo de este arco nervado no se pudo llevar a cabo por motivos informáticos que se evaluarán más adelante. Por esta razón, y dado el interés de estudiar la unidad básica que conforma la estructura, se decidió añadir al análisis otros dos modelos, en los cuales el objeto de estudio es una única dovela. En ellos se aplicó la carga crítica de presión que afecta a la pieza, así como su peso propio, y así fue posible calcular y analizar la influencia de los nervios de rigidez en el comportamiento de una dovela. Estos dos modelos se han denominado **modelos C y D**, sin nervios y con nervios respectivamente.

2.3 Consideraciones e hipótesis comunes a todos los modelos

Acerca de los softwares empleados

Las geometrías 2D y 3D se modelaron en AutoCAD® e Inventor® respectivamente, importándose posteriormente -formato *STEP*- al software Abaqus® de elementos finitos para realizar el análisis tensional. Abaqus® trabaja de manera adimensional, por lo que se decidió introducir las medidas de longitud en milímetros y las cargas en newtons, y las tensiones serán extraídas en unidades de megapascales.

Acerca de la sección del arco y sus materiales:

El perfil inferior de la sección está compuesto por 16 bovedillas cerámicas cuya única función resistente es la de absorber los esfuerzos tangenciales generadas en el forjado. Se ha considerado que estos **esfuerzos tangenciales** son **despreciables** frente a la tracción normal, por lo que a nivel estructural no aportan ninguna capacidad resistente. Es este el motivo por el cual se ha decidido obviarlas del modelo, incluyendo en el análisis únicamente la porción de sección correspondiente al hormigón armado. Además, con el objetivo de comprender el posicionamiento del forjado de acero y, además, simplificar en gran medida el modelado, se ha considerado que el material de la sección es hormigón en masa. Así pues, las zonas más traccionadas de la sección serán aquellas que será necesario reforzar y poseerán mayor cantidad de acero.

Dado el carácter comprensivo y explicativo del estudio, se ha considerado el hormigón como material **elástico lineal** isótropo y homogéneo, pese a que su comportamiento mecánico real dista mucho de estas simplificaciones. Las propiedades del hormigón en masa Portland estándar fueron extraídos de la herramienta online EngineeringToolbox®, y se compilan en la siguiente tabla:

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad	ρ	$2'3 \cdot 10^{-6}$	Kg/mm^3
Módulo Elástico	E	30.000	MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0'2	Adimensional
Límite a Compresión	σ_C	30	MPa
Límite a Tracción	σ_T	3'5	MPa

Tabla 1 Propiedades del hormigón en masa de cemento Portland estándar

Para generar la geometría 2D de la sección se hizo uso del software AutoCAD®. Las medidas de la misma se extrajeron de los planos de la *figura 4 (a)* y la *figura 55 -anexo 6.3-*, en los cuales las geometrías de las bovedillas tuvieron que ser determinadas mediante métodos gráficos, por lo que sus valores están expuestos a un error natural que se considera aceptable debido al perfil del estudio. Las medidas definitivas aplicadas a las bovedillas se pueden consultar en el anexo 6.3. Primero se trazó la sección maciza, conformada por la intersección de un anillo circular con los dos rectángulos de los extremos. A continuación se generaron las geometrías de las bovedillas, de dos tipologías distintas para la parte curva y las partes rectas, y se extrajo de la sección maciza las porciones correspondientes a las mismas.

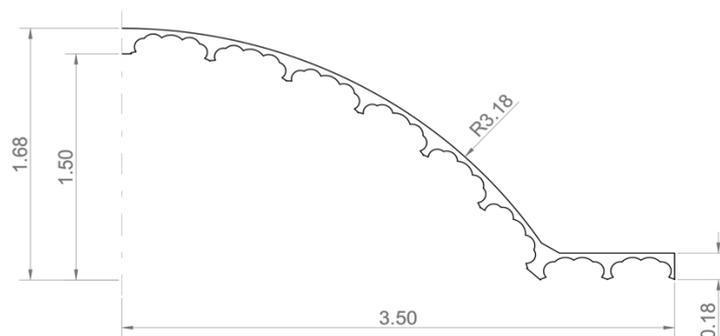


Figura 8 Plano de la sección de la dovela, cotas en m

Acerca de las cargas aplicadas

Se ha estudiado el comportamiento de la estructura ante su propio peso, es decir, las únicas cargas que interactúan son gravitatorias.

Acerca del mallado

La inusual y ciertamente detallada geometría de la sección en cuestión, que además es de mucha menor magnitud que la longitud axial del arco, hace que el mallado de la pieza requiera de un cierto estudio. Se realizaron en cada modelo varios tanteos variando el tipo de elemento y el tamaño a aplicar, teniendo siempre en cuenta el peso computacional de la resolución. Se consideró la opción de emplear elementos tetraédricos que se adaptan más fácilmente a las geometrías complejas a costa de poseer mayor rigidez y menor precisión en la convergencia de la solución. En el caso del modelo D -dovela con nervios- fue necesario aplicar este elemento dado que la presencia de nervios impedía mallar con elementos hexaédricos, y para contrarrestar la imprecisión inherente al elemento tetraédrico se decidió aplicar una aproximación cuadrática.

No obstante, se dio preferencia siempre al elemento hexaédrico, que es con el que finalmente se consiguió mallar los modelos A -arco sin nervios- y C -dovela sin nervios-. Con este tipo de elemento, más preciso que el tetraédrico, una aproximación lineal se estima suficiente.

Por otra parte, la diferencia de magnitudes entre la sección y su directriz se trató de subsanar “estirando” el elemento en la dirección del trazo, respetando siempre un ratio máximo 4/1 para mantener el adecuado rendimiento de la malla. Este razonamiento se considera aceptable dada la relativa poca curvatura que alcanza el arco. Las características de las tres mallas empleadas se exponen a continuación, y las imágenes detalladas de las mismas se pueden visitar en el anexo 6.3.

Modelo	Tipo de elemento	Tipo de aproximación	Tamaño plano sección (mm)	Tamaño directriz (mm)	Número elementos	Número nodos
A	Hexaédrico	Lineal	100	400	44.286	66.051
C	Hexaédrico	Lineal	30	100	30.176	42.999
D	Tetraédrico	Cuadrática	50	150	51.230	93.468

Tabla 2 Características de las mallas empleadas

2.4 Modelo A: Arco-Onda sin nervios de rigidez

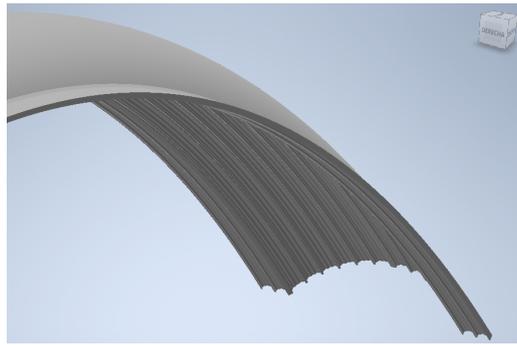


Figura 9 Imagen del Modelo A

2.4.1 Consideraciones, hipótesis y condiciones de contorno del modelo A

Acerca del trazado del arco

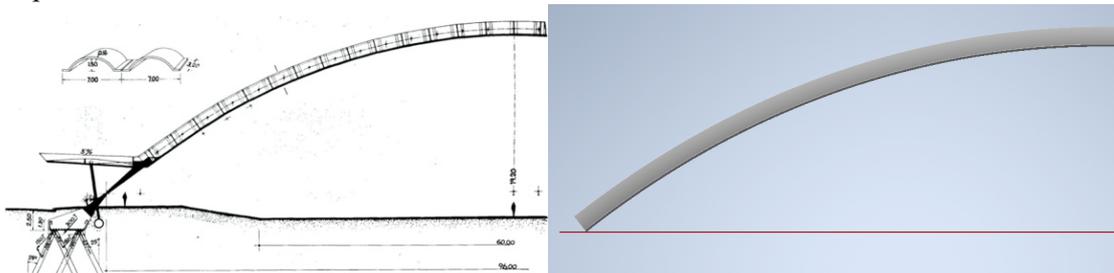
La generación del modelo 3D de la estructura se ha llevado a cabo con el software Inventor[®], importando la sección 2D trazada previamente. Se ha considerado que el trazado del arco es continuo, eliminando los entrefases presentes entre las dovelas para generar el arco como una sola pieza curva. Para ello, la sección transversal se le ha aplicado un barrido (*sweep*) a lo largo de la **parábola** de cuarto orden que define la directriz, cuya expresión es:

$$y = -\frac{1}{129.000} [0'05425x^4 + 950x^2] + 19'2$$

Esta función fue extraída de un artículo de la revista *Informes de la Construcción* donde Sánchez del Río redacta ciertos detalles constructivos de la estructura, y afirma que es "*sensiblemente el antifunicular de las cargas que sobre él gravitan*" (Sánchez del Río, 1977). La directriz se generó mediante la unión polinómica (*Spline*) de puntos distanciados horizontalmente 0'5 m uno del otro, hasta completar el vano de 88 metros (176 puntos).

Cabe mencionar que la función funicular es única para cada distribución de cargas, por lo que en este modelo en el que se ha obviado la masa de las bovedillas y del acero de refuerzo, ésta no sería la función exacta. En consiguiente se puede afirmar que aparecerán esfuerzos cortantes y momentos flectores indeseados.

Como se trata de un estudio de carga gravitacional, de carácter simétrico y dirección vertical, se optó por resolver únicamente un semiarco, liberando así en gran medida la carga computacional del modelo.



Figuras 10 (a) y (b) Plano lateral del trazado del arco (ISR Inf Const; Vista lateral del arco del Modelo A

Acerca de las condiciones de contorno

Los contrafuertes que albergan las **articulaciones** y la pieza de transición entre éstos y las dovelas quedaron exentos de ser modelados al ser considerados de no suficiente relevancia para el carácter del estudio, además de la falta de medidas necesarias y la complejidad de modelado los mismos. En consecuencia, la condición de articulación se impuso directamente en las secciones extremas de las dovelas, realizando una partición para aplicarlas únicamente en la parte recta inferior. Es de esperar, por tanto, que las tensiones computadas tomen valores

extraordinariamente altos en estos puntos que no responden a la situación estructural real, si no a modo en que ésta fue modelada.

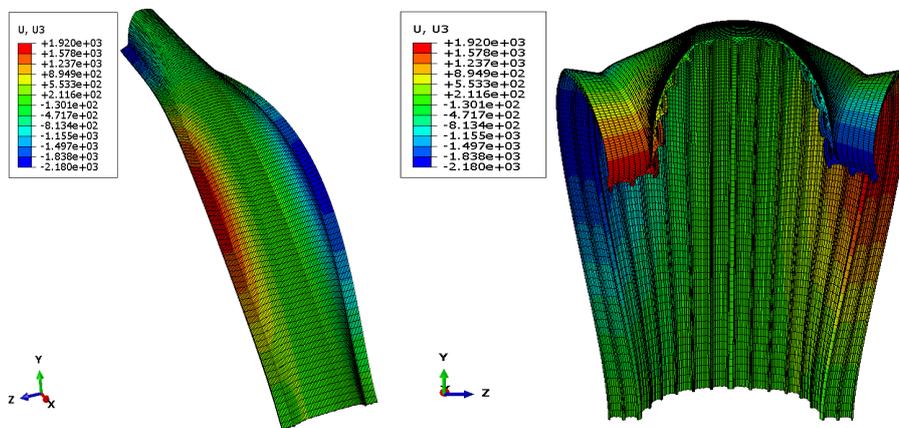
Para modelar el comportamiento del arco completo se aplicó una condición de **simetría** en la sección de la clave.

Al no haber sido capaz de calcularse el modelo B se decidió aplicar una condición de simetría en los laterales del arco que simulan el contacto con los **arcos contiguos** de la estructura, limitando de esta manera la deformación de apertura de la sección en esta dirección y simulando en parte la función que desempeñan los nervios de rigidez. Esta condición es coherente con la decisión de estudiar la configuración final de la estructura, y no la fase de construcción.

2.4.2 Evaluación de los resultados del modelo A

Acerca de la apertura de la dovela

Con el objetivo de observar el fenómeno de apertura de la sección, se realizó una primera simulación obviando la condición de simetría lateral de arcos contiguos. A simple vista de la deformada se pueden apreciar los desplazamientos en dirección Z de los puntos del arco que alteran completamente la sección transversal del mismo, apreciables a continuación.

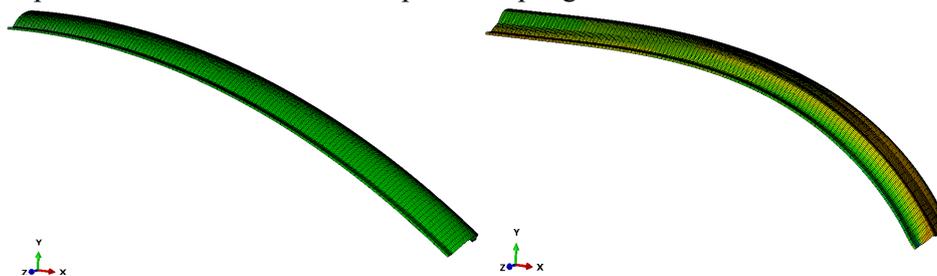


Figuras 11 (a) y (b) Deformada y desplazamientos en Z del modelo A

Estos desplazamientos indeseados, que a su vez generan unas tensiones desmesuradas en la estructura que no merece la pena comentar, son los que nos reafirman la importancia rigidez transversal que aporta la presencia de los nervios. Se alcanzan desplazamientos de **apertura** total de 4 metros (57% de deformación en la sección) y de similar magnitud en el **pliegue** de la clave. La flecha máxima desciende 1'45 m, casi hasta el plano horizontal.

Acerca de la apertura del arco

En las siguientes simulaciones sí se aplicó la simetría lateral de contacto entre arco, subsanando en cierta medida la falta de rigidez. En este caso la flecha de la sección extrema se redujo hasta en 250 mm -un 82.7% menos que en el caso anterior- que todavía sigue siendo un valor inaceptablemente alto. También se aprecia un pliegue de cerrado de la sección de la clave.



Figuras 12 (a) y (b) Fenómeno de apertura del arco (Modelo A)

La falta de rigidez de la estructura modelada genera unas deformaciones indeseadas no sólo en la sección, si no también en la directriz del arco que sufre también un fenómeno de apertura (o aplastado) derivado de los momentos flectores presentes y de la falta de funicularidad explicada. Esta desviación –que debería ser casi nula- hace que aparezcan a lo largo de la directriz distintas zonas de tracción indeseadas, en un arco que debería trabajar fundamentalmente a compresión. Pese a que los valores de estas tensiones son demasiado altos como para tenerlos en consideración -unas 10 veces el límite del material-, sí pueden extraerse algunas conclusiones valiosas.

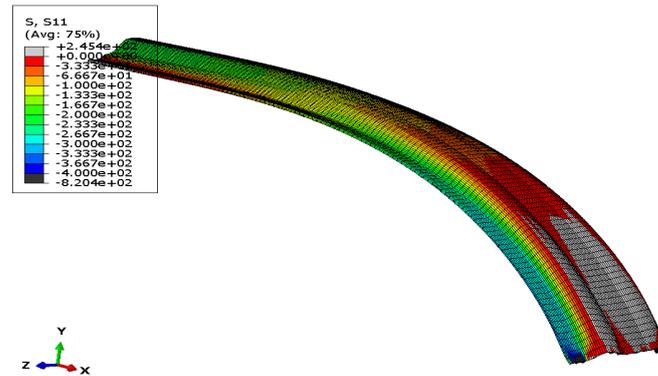


Figura 13 Tensiones axiales del Modelo A

En primer lugar puede observarse que las magnitudes de las zonas traccionadas (gris) son aproximadamente 4 veces menores que en las zonas comprimidas, por lo que el arco da indicios de tender a trabajar según lo esperado en la situación rigidizada.

Por otra parte se puede apreciar que en la zona circundante a la sección extrema las tensiones aumentan rápida y significativamente. Esto se debe en parte a que el empuje aumenta conforme se acerca al arranque, pero además parece indicar que la condición de articulación no fue modelada de manera óptima. Probablemente podría mejorarse aplicando el giro libre en la sección completa.

Además, se ha realizado un análisis comparativo de la magnitud que alcanzan las **tensiones** en las **direcciones principales** del arco. Para ello se han seleccionado 14 puntos al azar a lo largo de la longitud del arco, y se han extraído las tensiones axiales -eje X- y transversales -ejes Y, Z- generadas. Los 14 puntos estudiados se pueden ver gráficamente en el anexo 6.3, y los valores se exponen en la siguiente tabla:

S11 (X)	-294	10	-9	-42	-78	-122	-123	-156	-181	-188	-207	-216	-221	-229
S22 (Y)	-216	3	-6	-6	-14	-13	-16	-10	-8	-5	-2	-3	0	2
S33 (Z)	124	-30	13	1	-15	-2	-1	7	2	19	18	3	21	-9

Tabla 3 Selección de valores de las tensiones en los ejes principales, modelo A

Tal y como se puede apreciar los valores de las tensiones a lo largo de la directriz superan hasta en dos órdenes de magnitud las transversales. En base a lo expuesto, podemos afirmar que el arco sí distribuye las cargas gravitacionales según lo esperado (a lo largo de la directriz), y que estas tensiones transversales indeseadas -Y, Z- están ligadas a la deformación de la sección debida a la falta de rigidez.

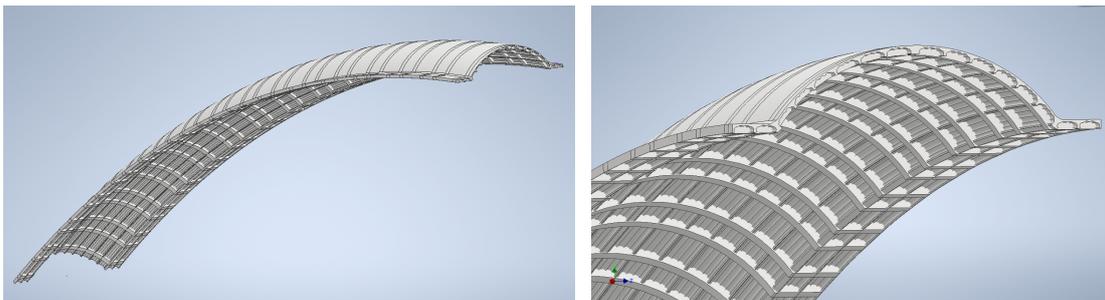
2.5 Modelo B: Arco-Onda con nervios de rigidez

El presente modelo pretendía ser el que estudiara el comportamiento resistente real del arco, incluyendo los nervios de rigidez para hacer una comparativa con el modelo anterior. La **geometría** se generó **satisfactoriamente** en Inventor[®], modelando los nervios mediante la extrusión de la sección llena de la dovela –sin extraer las bovedillas-, y realizando el ensamblaje de los mismos en los puntos correspondientes del trazado del arco. Se introdujeron un total de 30 nervios a lo largo del semiarco -15 dovelas- respetando las distancias de posicionamiento de los nervios dentro de cada dovela virtual –recordar que el arco es un trazo continuo-.

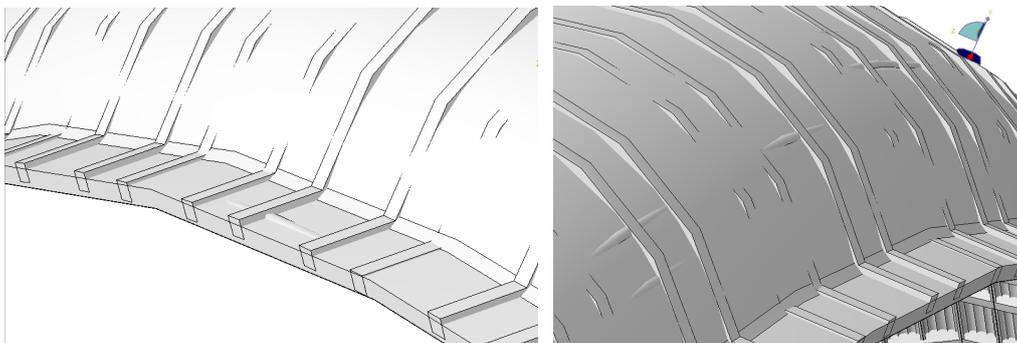
El problema del modelo apareció al tratar de importar la pieza en Abaqus[®], observándose que los nervios se desplazaban inexplicablemente de los puntos donde fueron ensamblados, arrastrando consigo parte de la geometría contigua. Incluso el extradós del arco llegó a ser intersectado por la sección interna de la bóveda. Esta alteración geométrica se consideró inaceptable para un correcto estudio comparativo.

La razón de estos **errores** es puramente **informática**, y se sospecha que tiene relación con el hecho de que los nervios son rectos en su profundidad, mientras que la directriz del arco posee una ligera curvatura. Esto hace que en los puntos de ensamblaje los softwares malinterpreten esta relación recta-curva, e intenten corregirla de manera errónea. Ningún formato de los disponibles importó correctamente la pieza. Para tratar de subsanar este error se estudiaron dos posibilidades: la primera sería extruir los nervios con la curvatura del arco, tratando de que el ensamblaje entonces fuera perfecto. Dado que cada uno de los 30 nervios poseería una curvatura local distinta del anterior y obtener dicha curvatura de la parábola en cada punto resultaría demasiado costoso, se decidió que no compensaría el esfuerzo dado el carácter comprensivo del estudio, teniendo en cuenta que no había garantías de que fuera una solución exitosa. Por otra parte se consideró aplicar elementos barra 2D en el posicionamiento de cada nervio, y asignarle la sección rectangular correspondiente. Esta solución podría añadir la rigidez pertinente al modelo, pero se encontraron diversas dificultades para modelar el elemento barra con la sección curva de la dovela que llevaron a desechar también esta solución.

Así pues, el interés por analizar la influencia de los nervios de rigidez y el comportamiento de una unidad estructural aislada ha resultado en la realización **dos modelos adicionales** -C y D- en ausencia y en presencia de los nervios. A estos modelos se les aplicará una carga compresiva en la dirección de su profundidad –eje Z- que simulará la presencia del resto del arco.

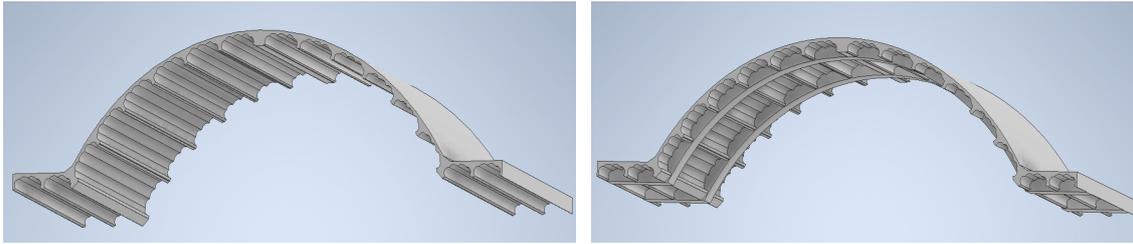


Figuras 14 (a) y (b) Geometría exitosa del modelo B



Figuras 15 (a) y (b) Errores geométricos del modelo B al importar en Abaqus[®]

2.6 Modelos C y D: Dovela-Onda sin y con nervios de rigidez



Figuras 16 (a) y (b) Modelo C, Dovela-Onda sin nervios; Modelo D, Dovela-Onda con nervios

2.6.1 Consideraciones, hipótesis y condiciones de contorno de los modelos

C y D

Consideraciones geométricas

La geometría del modelo C -Dovela sin nervios- fue generada mediante una simple extrusión de la sección ya estudiada a lo largo de los 3'2 m de profundidad de la dovela. En el caso del modelo D -Dovela con nervios- la dovela se compuso mediante 5 extrusiones, 3 sobre la sección sin bovedillas y 2 sobre la sección llena, que corresponden a los nervios. La profundidad de los nervios no aparecía acotada en ningún plano, así que por métodos gráficos se estimó una anchura de 300 mm.

Acerca de las cargas aplicadas

Tal y como ha quedado demostrado, el peso propio del arco se convierte en empuje compresivo que recorre la directriz atravesando las dovelas. Para simular este empuje se ha aplicado en la sección extrema anterior de la dovela una carga de **presión**, que se ha decidido que sea próxima a la del límite de compresión, fijándola en 25 MPa (12'8kN). El estudio de estos modelos C y D pretende analizar cómo responde la dovela ante la acción combinada de esta compresión con el momento flector que genera el propio peso de la dovela. En el caso más desfavorable, el aquí estudiado, la carga gravitatoria actúa verticalmente en dirección perpendicular a la profundidad de la dovela, es decir, en la clave.

Acerca de las condiciones de contorno

La situación que se trata de simular aquella en la que la dovela está ensamblada dentro del arco y en estado de carga.

La **fijación/sustentación** de la dovela con las piezas contiguas se modeló impidiendo los desplazamientos verticales -eje Y- y axiales -eje Z- en los puntos de la sección posterior de la dovela. En los puntos de la sección anterior (aquella donde se aplica la presión) se bloquearon los desplazamientos verticales -Y- pero se permitieron los axiales -Z-. De haberse bloqueado también los desplazamientos en Z la carga de presión no haría ningún efecto.⁵

Tal y como se realizó en el modelo A, el contacto con los arcos contiguos se simuló aplicando las convenientes condiciones de **simetría** en las caras laterales.

⁵ Nótese en las figuras de resultados que las condiciones de contorno y la carga de presión fueron accidentalmente introducidas en sentidos opuestos del eje Z en cada modelo. Dado el carácter simétrico del estudio se ha decidido no darle mayor relevancia.

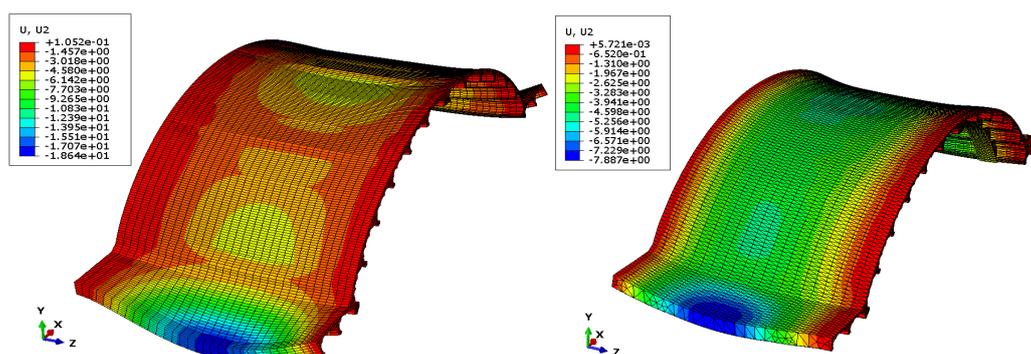
2.6.2 Evaluación de los resultados de los modelos C y D

Acerca de la influencia de los nervios en la apertura de la dovela

En el modelo A quedó demostrado el fenómeno de apertura de la dovela en ausencia de nervios, y se ha considerado oportuno evaluarlo de nuevo en la dovela aislada, analizando esta vez la influencia de los nervios. Para ello se realizó una primera simulación sin la condición de simetría de arcos contiguos, además de liberarse los desplazamientos verticales de la zona curva para que la dovela pudiera ser deformada. Los resultados obtenidos -consultables gráficamente en los anexos 6.6.3 y 6.6.4- reflejan que la presencia de nervios de rigidez **reduce en un 72'1%** la deformación de la sección, obteniéndose aperturas de 24'63 mm y 6'87 mm en los modelos sin y con nervios, respectivamente.

Acerca de la influencia de los nervios en la flexión de la dovela

Analizando el comportamiento de flexión de la dovela ante la carga gravitatoria, se observa que los desplazamientos verticales mayores se dan en las alas extremas de la misma, en el punto central, y toman valores de 18'64 mm y 7'87 mm, respectivamente. Así mismo, la flecha de la dovela se reduce en 7'1 mm y 4'22 mm respectivamente. Esto es lógico ya que las alas poseen una menor rigidez a flexión que la parte curva.



Figuras 17 (a) y (b) Desplazamientos en Y de los modelos C y D

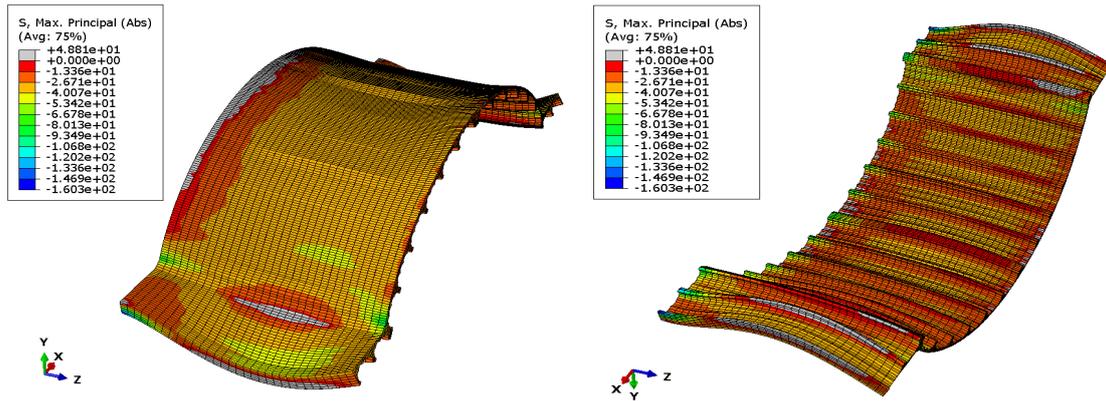
A pesar de notarse la influencia de los nervios al **disminuir en un 50%** aproximadamente los desplazamientos en Y, estos siguen siendo relativamente altos -recordar que la dovela mide 3'2 m de profundidad-. Esto se debe a que las barras de acero que recorren la dovela en la dirección Z no se han tenido en cuenta. Estos resultados justifican el posicionamiento de dicho forjado para absorber el momento flector gravitatorio.

Acerca de la influencia de los nervios en el aplastamiento de la dovela

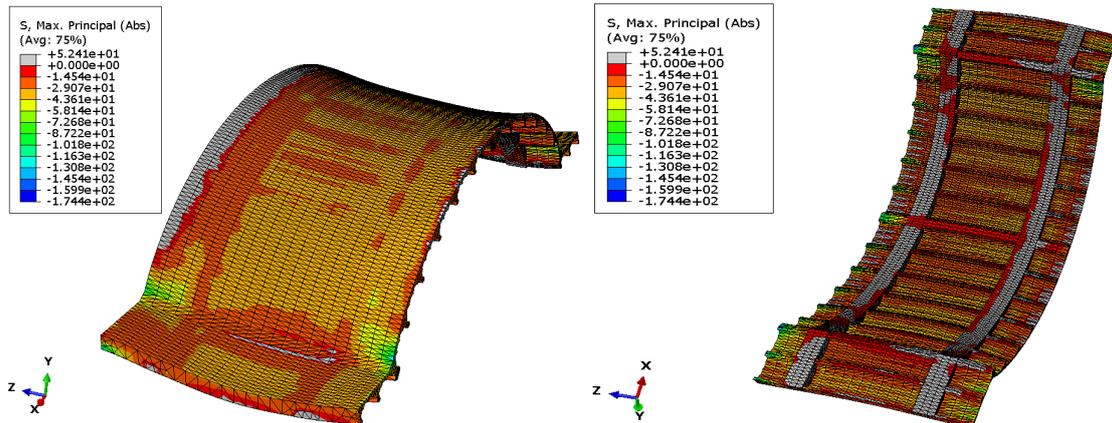
Los desplazamientos en la dirección Z de la sección cargada -consultables gráficamente en los anexos 6.6.3 y 6.6.4- ascendieron a 3'58 mm y 3'12 mm en los modelos C y D, respectivamente. Se observa que la diferencia de deformación no es tan grande dado que los nervios están dispuestos para aportar rigidez en las direcciones transversales principalmente.

Acerca de la influencia de los nervios en la respuesta tensional

A continuación se exponen los mapas de las tensiones máximas absolutas generadas en ambas piezas, habiéndose fijado el límite superior en 0 MPa para observar fácilmente las zonas sometidas a tracción (color gris). Idealmente, y dado que lo que se intenta demostrar es la capacidad para absorber el momento flector gravitatorio sin generar tracciones, toda la dovela debería trabajar a compresión.



Figuras 18 (a) y (b) Tensiones máximas absolutas en el modelo C



Figuras 19 (a) y (b) Tensiones máximas absolutas en el modelo D

En primer lugar se aprecia que en ambos modelos existe una zona de tracción en el extradós cercana a la sección anterior, que se explica fácilmente con la condición de restricción de desplazamientos en Z aplicada en dicha sección. Al haber una **flexión** de la dovela y no poder rotar esta sección respecto al eje X, la zona colindante se tracciona en el extradós y se comprime excesivamente en el intradós (puntos verdes). En el arco real esto no sucedería porque el desplazamiento en Z sería solidario con el de la dovela anterior.

Por otra parte se observa que, en el modelo D, los **nervios** de rigidez están sufriendo **tracción** en su práctica totalidad. Esto es lógico dado que precisamente la función de los nervios es absorber el momento flector de la dovela e impedir que estos esfuerzos de tracción alcancen la delgada lámina de hormigón. Este hecho justifica pues el posicionamiento del forjado de acero que recorre toda la longitud del nervio, que será el encargado de absorber estas tensiones. El resto de pequeñas zonas sometidas a tracción se justifica con el forjado no modelado que recorre toda la dovela en su profundidad.

Quizá sería de esperar que la diferencia de áreas sometidas a tracción fuera más acusada entre ambos modelos, a pesar de que sí se aprecia que dichas zonas son mayores en el modelo C. Esto puede deberse a dos factores, o bien la ausencia de la masa de los nervios genera un momento flector gravitatorio menor; o bien la condición simétrica de arcos contiguos limita demasiado la deformación de la dovela y por tanto las tensiones generadas.

3. MODELADO Y ANÁLISIS RESISTENTE DEL PARAGUAS OCTOGONAL



Figura 20 Ildefonso (izquierda) sobre el Paraguas octogonal de Pola de Siero, 1972

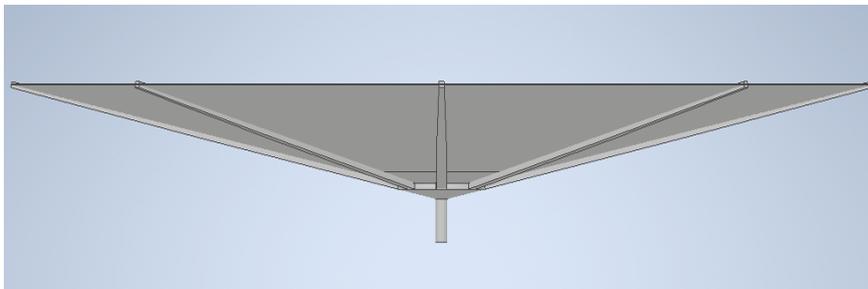


Figura 21 Geometría del modelo de Paraguas Octogonal

3.1 Descripción de la estructura

Resulta cuanto menos peculiar, si no poético, que Sánchez del Río tomara la decisión de consumir su carrera profesional proyectando la misma clase de cubierta con la que la inició, los paraguas. Es casi como si en su última lección pretendiera demostrar toda la experiencia adquirida a lo largo de sus 50 años como proyectista. Y así lo hizo, levantando un conjunto de cuatro estructuras de no sólo gran belleza arquitectónica e impacto visual, si no también de especial relevancia al tratarse de sus **primeras estructuras laminares** enteramente de **hormigón armado**.

Se trata de los paraguas de Pola de Siero (Oviedo, Asturias), un conjunto de cuatro cubiertas laminares con tipología de **paraguas invertidos** que fueron proyectados en 1971 y construidos en 1972 para el Mercado de Ganado. Son estructuras impresionantes tanto visual como estructuralmente gracias a su esbeltez y magnitud, y que a nivel resistente nada tienen que ver con los paraguas construidos por Ildefonso en sus primeros años (1920-1930). En ellos los plementos de Uralita de la lámina no desempeñaban función estructural alguna, recayendo esta misión sobre el entramado de vigas y zunchos que los sustentaban⁶. Pese a que estos primitivos paraguas -que no superaban los 16 m de diámetro- supusieron en su momento una solución formal original, eficiente y económica, no dejan de ser obras de un rango mucho menor que las que se exponen a continuación, llegando a ser catalogadas de “pasatiempos” en años posteriores por Sánchez del Río.

⁶ Ver anexo 6.2.3 “Estructuras y cubiertas nervadas” para más información al respecto.



Figura 22 Panorámica del Mercado de Ganado de Pola de Siero, 1972

Tres de los paraguas de Pola de Siero se desarrollan sobre una planta cuadrada de 20 m de lado, apoyados cada uno sobre un pilar cilíndrico, y dispuestos de manera contigua resguardando una superficie rectangular de 60 x 20 m². El espesor de la lámina es de tan sólo 3'5 cm, y a pesar de ser colindantes no existe contacto alguno entre ellos, por lo que cada paraguas se sustenta individualmente. Es precisamente esta pequeña separación de unos pocos centímetros la causante de la degradación de los mismos, generada por los roces y choques que se daban en los perímetros de la lámina en días de fuerte viento. Esta erosión fue la que llevó a la demolición de los tres paraguas cuadrados a principios de los años 90 para construir en su lugar la actual Estación de Autobuses de Pola. Mejor suerte corrió el cuarto paraguas, objeto del presente estudio, pues su carácter monumental e icónico hizo que se decidiera conservarlo e incorporarlo a las instalaciones de la estación, no sin las pertinentes reparaciones estructurales en 1990 y 2017.

El paraguas aquí analizado se levanta sobre una planta circular de 40 m de diámetro cubriendo un área de aproximadamente 1250 m² mediante la suspensión de una fina lámina de hormigón armado de 3'5 cm de espesor, convirtiéndose en el paraguas de **mayor magnitud y esbeltez** construido hasta la fecha en este material. La planta circular queda dividida simétricamente en 8 sectores mediante nervaduras radiales en voladizo que parten del capitel hacia el exterior con una inclinación de 12'68 grados, alcanzando una cota de 6'5 m y una separación de 15 m entre extremos consecutivos.

La cubierta descansa sobre un **pilar** central cilíndrico de 90 cm de diámetro y 1'8 m de longitud, que en su extremo superior se encuentra con el capitel central, de 4 m de diámetro. Desde el perímetro superior del capitel, y enrasado con el mismo, se extiende radialmente un **forjado extra** que se encuentra con la lámina tras sus 2 m de longitud, generando la continuidad del extradós de la cubierta que permitirá al agua de lluvia discurrir hacia el tubo de desagüe que atraviesa el centro del pilar. A parte de esta función pluvial, este forjado desempeña el importante papel estructural de ayudar a contrarrestar los esfuerzos de tracción derivados del momento flector que genera el peso de la lámina y los nervios en esta sección central.

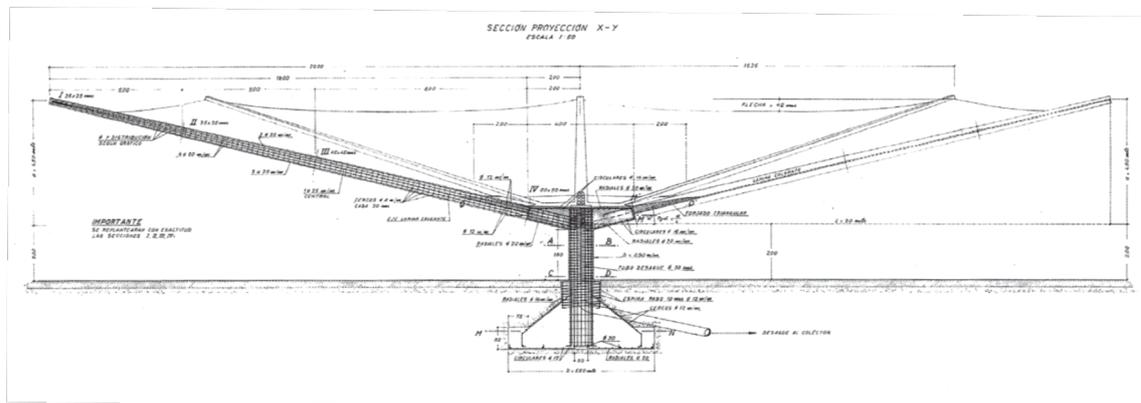


Figura 23 Plano en sección del paraguas octogonal

El pilar de apoyo continúa su recorrido bajo el pavimento para encontrarse con la gran **zapata** subterránea, de perfil cónico y diámetro máximo de 5'5 m. En la primera intervención de **restauración** llevada a cabo en 1990 por el ingeniero Aníbal Pérez “*se procedió al micropilotaje del conjunto y a un recrecido del canto de la zapata*” (Brufau, Aguado de Cea, De la Fuente, & Payola, 2018), que bien por asentamientos del terreno o debido a un error de cálculo de las cargas de viento había sufrido inclinaciones inaceptables. En esta intervención se decidió además incrementar en 30 cm el diámetro del pilar.

La **lámina** de 3'5 cm de espesor se desarrolla entre cada par de nervios siguiendo una **catenaria** que alcanza una flecha máxima de 42 cm en el punto central. El motivo de esta curvatura es el mismo que el reside bajo la tipología estructural de la *banda tesa*⁷ o de los puentes suspendidos, y se fundamenta en que el elemento en cuestión -lineal en el caso de puentes y superficial en este caso- se somete únicamente a axiles de **tracción** que recorren la curva, minimizando los esfuerzos cortantes y flectores. El principio inverso es el que se aplica en el caso de arcos antifuniculares. El forjado de la lámina cobrará especial relevancia al ser el encargado de absorber estas tracciones. Además, las estructuras catenáticas tienen el beneficio de resistir mejor ante vibraciones y ondulaciones, por lo que las vibraciones de la lámina generadas por el viento no serán preocupantes. Esta tipología tiene el inconveniente de trasladar los esfuerzos horizontales a los extremos, pero al tratarse de una geometría simétrica estas fuerzas se equilibran en el nervio, que sólo recoge los esfuerzos de compresión a lo largo de su dirección axial. Este comportamiento queda muy bien descrito por el ingeniero Javier Manterola:

“La componente tangencial de todas estas superficies colgadas se compone con la contigua introduciendo unas fuertes cargas de compresión en la costilla (nervio) a lo largo de toda ella. La deformación vertical de la costilla, por su inclinación vertical, tensa más las telas e incrementa sus componentes tangenciales y por tanto la compresión sobre la costilla. A lo largo de toda su longitud, la tracción varía y la compresión de la costilla crece.” (Manterola, 2011)

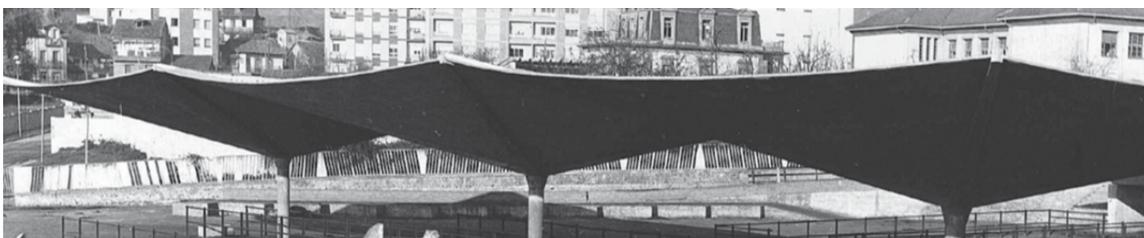


Figura 24 Vista de la catenaria de los paraguas cuadrados

La comprobación resistente de estas primeras estructuras laminares de hormigón de Ildefonso se realizó en la misma obra mediante la ejecución de dos **modelos** a escala 1:4 de los paraguas, uno de planta cuadrada y otro de planta circular -visible en la figura 22-, que permanecieron en el mercado como cubiertas menores. Sobre ellos se realizaron dos pruebas de carga, una con una carga puntual de 500 Kg y otra con una carga distribuida de 70 Kg/m². Conviene comentar que el paraguas que aquí se estudia iba a ser en un principio hexagonal, hecho que se dio a conocer tras la muerte de Ildefonso con la publicación de los planos originales. De hecho, si se observa la figura 22 con detenimiento, el modelo para ensayos posee esta morfología hexagonal. Es de esperar, por tanto, que este cambio de tipología se deba a una necesidad de aumentar la rigidez de la estructura a la vista de los resultados recogidos por las pruebas de carga realizadas.

⁷ Para más información al respecto ver “*La banda tesa de hormigón pretensado, un esquema estructural para pasarelas*” de Diego Cobo del Arco.



Figuras 25 (a) y (b) Ensayos sobre el prototipo hexagonal (FTJ); Paraguas Octogonal en la actualidad (MC2)

Comparando las figuras 20 y 25-b, tomadas desde el mismo ángulo pero con 45 años de diferencia, parece que el perímetro que tras su construcción era sensiblemente octogonal se haya deformado hasta alcanzar una forma mucho más circunferencial. Según los ingenieros encargados de la restauración que tuvo lugar en 2017, estas deformaciones habrían sido previstas ya por Ildefonso intuyendo el comportamiento que iba a desarrollar la estructura con el tiempo, lo cual, de ser cierto, supondría un extraordinario alarde de su genialidad. (Brufau, Aguado de Cea, De la Fuente, & Payola, 2018).

Por último, comentar que esta solución formal de paraguas invertidos de Ildefonso fue aplicada previamente dos remarcables precursores: Félix Candela (1910-1997) y Giorgio Baroni (1907-?), pero los paraguas realizados por estos ingenieros, además de no superar los 30 m de diámetro, responden a comportamientos estructurales significativamente distintos a los de Ildefonso. Los paraguas de Baroni poseían, a parte de las nervaduras diagonales, otras vigas resistentes en el perímetro que ayudaban a recoger la tracción; mientras que Candela basaba sus geometrías en paraboloides hiperbólicos en los que los nervios estaban embebidos en la propia lámina.

3.2 Consideraciones, hipótesis y condiciones de contorno del modelo

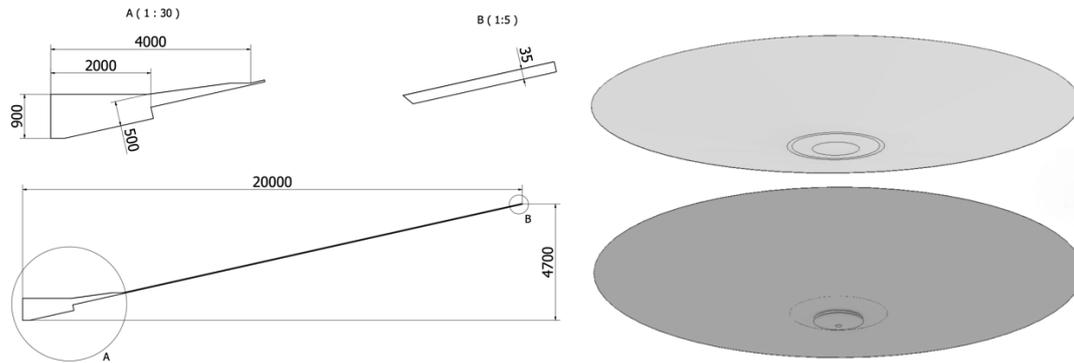
Consideraciones geométricas

La geometría del paraguas se modeló en el software Inventor[®], extrayéndose las medidas pertinentes de los planos publicados por el mismo Ildefonso (*figura 23*). Para llevarla a cabo se decidió fraccionar el paraguas en **tres partes**: el pilar de apoyo, el(los) nervio(s) y el capitel con la lámina. Una vez generadas las tres tipologías se ensamblaron de manera conveniente para después importarse en Abaqus[®] como una sola pieza sólida.

Las dos primeras resultan bastante sencillas de modelar. El **pilar** es únicamente un cilindro que se obtuvo mediante la extrusión de un círculo de 45 cm de radio a lo largo de la altura de 1'8 m. Los **nervios** se generaron mediante una extrusión de sección cuadrada variable linealmente, teniendo un valor de 50x50 cm en la base y 25x25 cm en el extremo. En la realidad esta variación no es lineal, alcanzando la sección una dimensión de 45x45 cm en la mitad del nervio y descendiendo después de manera lineal hasta los 25x25 cm del extremo. Esta aproximación se considera válida.

Se tomó la decisión de generar el **capitel, la lámina y el forjado** contiguo como una sola pieza aprovechando la conveniente simetría de revolución. Para ello se trazó el boceto 2D que corresponde a la sección del capitel con la lámina, que se puede observar en la *figura 26 (a)*, y se generó la pieza revolucionando esta sección a respecto del eje de simetría central -eje Y-. El hecho de generar la lámina como una pieza de revolución ignora las catenarias de la estructura real, aproximación que se aceptará dado el perfil del estudio, la dificultad de modelar dichas curvas y la falta de medidas al respecto.

En primera instancia se modeló el paraguas completo, pero a la hora de aplicar el mallado correspondiente se originaron más de un millón y medio de nodos, empleando tetraedros de orden cuadrático, lo que suponía un coste computacional demasiado alto para la capacidad disponible. Es por este motivo que finalmente se decidió generar únicamente un **cuadrante** del paraguas, aplicando las condiciones de simetría correspondientes para simular la situación equivalente. Así se consiguió reducir a menos de un tercio el peso computacional.



Figuras 26 (a) y (b) Plano de la sección de revolución del capitel más la lámina, cotas en mm; Pieza de revolución

Acerca del material

Se tomaron las mismas hipótesis que en los modelos del Palacio de los Deportes.

Acerca de las cargas aplicadas

Las cargas estudiadas en el modelo son únicamente gravitacionales. En un primer lugar se trató de aplicar la carga de peso mediante la opción que incorpora Abaqus® -Gravity force- tal y como se realizó exitosamente en los modelos del Palacio de los Deportes. No obstante, al computar la solución se obtuvieron unos resultados incongruentes -desplazamientos verticales positivos de varios metros y tensiones de miles de MPa- que conllevaron a desechar la aplicación de la carga volumétrica. Se trata de un error informático del que no se ha encontrado explicación y, por tanto, no merece mayor consideración.

En su lugar se decidió transformar las cargas gravitacionales volumétricas en su **equivalente superficial**, para aplicarlas directamente en el modelo como cargas externas uniformemente distribuidas.

Para modelar el **peso de la lámina** se calculó el peso total de la misma y se dividió por la superficie en la que se aplicaba, de la manera mostrada a continuación. Esta será la carga superficial vertical equivalente -P- a aplicar en el extradós de la tela.

$$P = \frac{\rho \cdot V_T \cdot g}{A_T} = \frac{\rho \cdot A_T \cdot e \cdot g}{A_T} = \rho \cdot e \cdot g = 2'3 \cdot 10^{-6} \cdot 35 \cdot 9'81 = 789'7 \cdot 10^{-6} \text{ N/mm}^2$$

Siendo ρ la densidad del material en Kg/mm^3 ; A_T el área total de la tela; e el espesor de la tela en mm; V_T el volumen total de la tela y g la aceleración de la gravedad en m/s^2 .

Como Abaqus® sólo deja aplicar cargas superficiales de manera normal o tangencial a la misma, y dada la inclinación de la lámina -12'68°-, hubo que **descomponer** la carga vertical a las coordenadas pertinentes. Además, la fuerza superficial tangente sólo puede aplicarse acorde a un vector, es decir, la dirección no puede variar de manera que siempre sea radial, lo cual correspondería a la situación real. Se decidió aplicar la carga tangencial siguiendo el trazado del nervio central del modelo, lo que implica que en los nervios extremos esta carga tendrá una dirección de 45° respecto a los mismos. Esta aproximación se considera aceptable dada la pequeña magnitud de la componente tangencial y el carácter del estudio. Así las cargas superficiales normal -P_n- y tangencial -P_s- quedan:

$$P_n = P \cdot \cos(12'68^\circ) = 770'44 \cdot 10^{-6} \text{ N/mm}^2$$

$$P_s = P \cdot \text{sen}(12'68^\circ) = 173'3 \cdot 10^{-6} \text{ N/mm}^2$$

Para modelar el **peso de los nervios** se procedió de la misma manera que con la lámina. Se calculó la carga superficial equivalente y se descompuso en las dos componentes -normal y tangencial- de la superficie superior de cada nervio. Pese a que se sabe que los nervios poseen una sección variable, se aproximó por un prisma de sección constante 30x30 cm, puesto que no compensaba el esfuerzo calcular y aplicar una carga variable. Las cargas superficiales vertical -Q-, normal -Q_n- y tangencial -Q_s- quedan:

$$Q = \frac{\rho \cdot V_N \cdot g}{A_N} = \frac{\rho \cdot l^2 \cdot L \cdot g}{l \cdot L} = \rho \cdot l \cdot g = 2'3 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 9'81 = 6'77 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

$$Q_n = Q \cdot \cos(12'68^\circ) = 6'6 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

$$Q_s = Q \cdot \sin(12'68^\circ) = 1'49 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

Siendo ρ la densidad del material en Kg/mm^3 ; A_N el área de aplicación de la carga; l el lado de la sección en mm ; L la longitud del nervio; V_N el volumen total del nervio y g la aceleración de la gravedad en m/s^2 .

Tener en cuenta que en los nervios extremos sólo hay que aplicar la mitad de las cargas superficiales calculadas por estar sólo modelado la mitad del nervio.

El peso **conjunto** del capitel, el pilar y el forjado central se aproximó la geometría del mismo según muestra la figura 27, y se calculó la carga superficial equivalente al peso del conjunto -C- para aplicarse en el extradós del capitel siguiendo la misma metodología que en las cargas previas.

$$V_{C/4} = \frac{V_C}{4} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot H + \pi \cdot r^2 \cdot h}{4} = \frac{\pi \cdot 2^2 \cdot 0'9 + \pi \cdot 0'45^2 \cdot 1'8}{4} = 3'11 \text{ m}^3$$

$$C = \frac{\rho \cdot V_C \cdot g}{A_{C/4}} = \frac{\rho \cdot V_C \cdot g}{(\pi \cdot R^2)/4} = \frac{2'3 \cdot 10^{-6} \cdot 3'11 \cdot 10^9 \cdot 9'81}{(\pi \cdot 2000^2)/4} = 22'33 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

Siendo ρ la densidad del material en Kg/mm^3 ; R el radio del capitel; H la altura del capitel; r el radio del pilar; $V_{C/4}$ el volumen de un cuarto del conjunto; $A_{C/4}$ el área superior de un cuarto del capitel; y g la aceleración de la gravedad en m/s^2 . (R , H , r y h aparecen acotados en la figura 27).

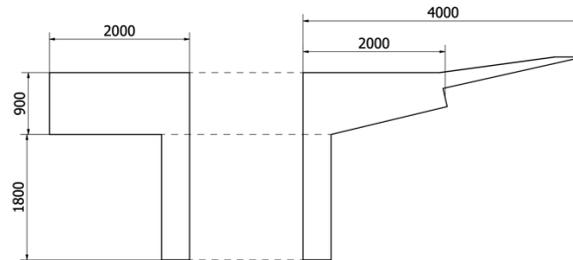


Figura 27 Plano en sección de la aproximación realizada para el cálculo de la carga central, cotas en mm

Acerca de las condiciones de contorno

En las secciones extremas -coincidentes con los planos XY y ZY- se aplicaron las pertinentes condiciones de **simetría** que simulan el comportamiento del resto del paraguas.

Para modelar la cimentación del pilar se **encastró** la sección inferior del mismo, es decir, se bloquearon los desplazamientos y los giros en las tres direcciones. Estas condiciones se pueden apreciar siguiente figura, junto con las cargas aplicadas.

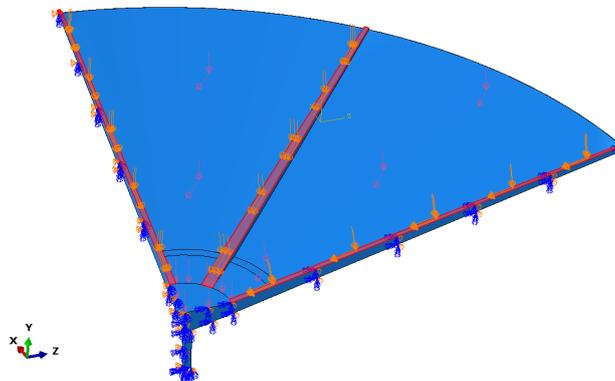


Figura 28 Cargas y condiciones de contorno del modelo de Paraguas Octogonal

Acerca del mallado

Aplicar una malla apropiada en esta geometría tan inusual no es tarea sencilla si se quiere limitar en cierta medida el peso computacional del modelo. Recordar que se trata de una lámina de 18 m de longitud y 35 mm de espesor. En primer lugar se ha de tener en cuenta que el modelo es una sola pieza sólida, por lo que no se puede mallar con distinto tipo elemento para cada sección, lo cual hubiera sido lo ideal dado que los nervios y la lámina aceptarían perfectamente un elemento hexaédrico. Se ha aplicado finalmente un elemento tetraédrico de orden cuadrático, que se acopla correctamente a las geometrías presentes. El tamaño general del elemento es 90 mm, dado que el pequeño espesor de la tela -35mm- no acepta un tamaño de elemento mayor. Se ha tratado de agrandar el tamaño del elemento en las zonas que no lo necesitan (nervios, pilar y capitel) mediante la imposición de tamaño en las aristas pertinentes, con el fin de reducir el peso computacional. Finalmente, la malla empleada tiene un total de 301.718 elementos y 586.178 nodos. Más imágenes detalladas de la malla pueden consultarse en el anexo 6.4.

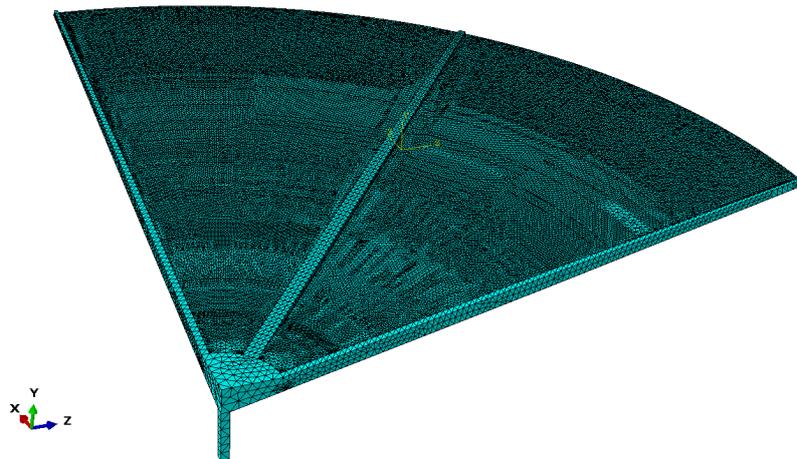
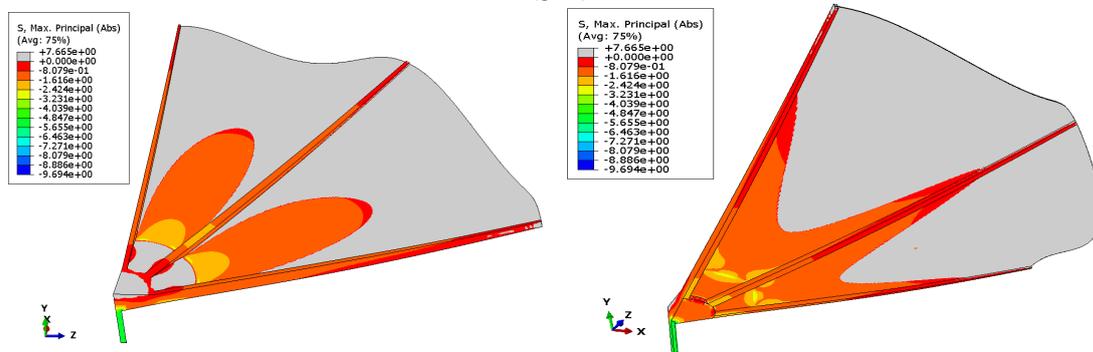


Figura 29 Malla del modelo de Paraguas Octogonal

3.3 Evaluación de los resultados

A continuación se presenta el mapa de las tensiones máximas absolutas generadas en el paraguas, en el que se han obviado las aristas de los elementos al considerarse que estorbaban su visualización. Las imágenes con la malla se pueden consultar en el anexo 6.4. Tal y como en el caso del Palacio de los Deportes, no interesa demasiado analizar los valores exactos de las tensiones si no su naturaleza y dirección. Se ha aplicado un límite superior de 0 MPa para identificar fácilmente las zonas traccionadas (gris).



Figuras 30 (a) y (b) Tensiones máximas principales en el extradós e intradós del Paraguas Octogonal

En primer lugar se observa rápidamente que la **zona más solicitada** se encuentra en el **pilar** del paraguas, lo cual es lógico dado que es el encargado de recoger el peso de toda la estructura. No obstante este hecho no es preocupante pues se trata de una zona que, ante cargas gravitacionales estará solamente sometida a esfuerzos compresivos. La tensión máxima toma un

valor de 6'76 MPa, que representa un margen de seguridad 4'4 respecto el límite de compresión. Pero se puede afirmar que este margen no es real debido a dos motivos: en primer lugar no se ha tenido en cuenta el peso del acero, que aumentaría el esfuerzo de compresión; y en segundo lugar, y más importante, es que la carga que podría derivar del viento tampoco se ha modelado, ignorando el momento flector que sufriría el pilar -que no sería pequeño dada la envergadura del paraguas- y el consiguiente aumento de las tensiones.

Prestando atención a lo esencial, la estructura en general parece responder al comportamiento esperado y descrito en los apartados anteriores. La mayor parte de la **lámina** se encuentra sometido a esfuerzos de **tracción** que deberán ser absorbidos por el forjado embutido dentro de la misma. Estos esfuerzos de tracción se transmiten a los **nervios** de los que está colgada la tela para convertirse en **esfuerzos compresivos** a lo largo de los mismos, que aumentan de valor conforme se aproximan a la sección de unión con el capitel. Además, la flexión generada en los nervios por el peso de la lámina y su propio peso hacen que la zona del intradós alcance mayores tensiones que la del extradós, lo cual es simplemente lógico. Este hecho se hace especialmente visible en la raíz de los nervios, que sufre un momento mayor.

Se aprecia también que la superficie superior del capitel y del forjado que lo rodea se encuentra en estado de tracción ocasionado por el momento flector que generan los pesos de la cubierta y los nervios sobre esta zona central, con la consiguiente compresión en el intradós de estos elementos. Si se observa con detenimiento el plano de la *figura 23* se puede apreciar cómo Sánchez del Río había predicho ya estos esfuerzos y había emplazado una serie de barras de acero tanto radiales como concéntricas en la parte superficial de esta zona.

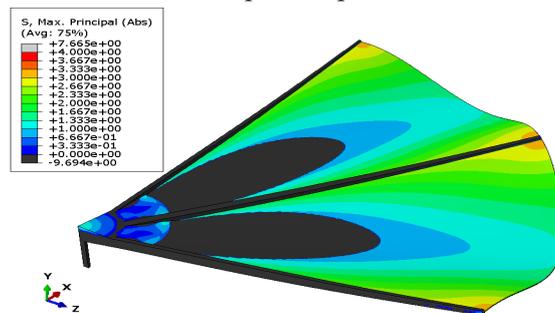


Figura 31 Zonas de tensión en la lámina

Si se limitan inferior y superiormente los valores de las tensiones en 0 y 4 MPa respectivamente, se pueden analizar cuales son las zonas más críticas de la lámina. Estas se dan en el punto de unión con los extremos de los nervios, y toman un valor de 4MPa aproximadamente -zonas naranjas-.

Reflexionando un momento sobre estas magnitudes, puede uno darse cuenta de que los límites tanto de compresión como de tracción parecen no alcanzarse en ningún punto de la estructura. De hecho, los valores máximos y mínimos de tensión que aparecen en la leyenda se encuentran los dos en un mismo elemento que se ha localizado en la unión del nervio central con el capitel -se puede ver en el anexo 6.4-, y se sospecha que se trata de algún tipo de error geométrico o de cálculo porque no tienen una continuidad con los valores de tensiones de su alrededor, sino que se disparan en ese punto concreto.

Es casi como si la **estructura no necesitase de forjado** alguno para sustentarse, pero no es así. No debe olvidarse que, aunque el paraguas aparentemente pudiera resistir por si mismo la gravedad, el más mínimo soplido de viento generará una carga de gran magnitud en la estructura debido a los 1250 m² de envergadura que alcanza. Lo mismo ocurriría al nevar. Así pues se justifica que los forjados de la lámina, los nervios y el capitel, han sido emplazados para resistir principalmente a estas cargas externas.

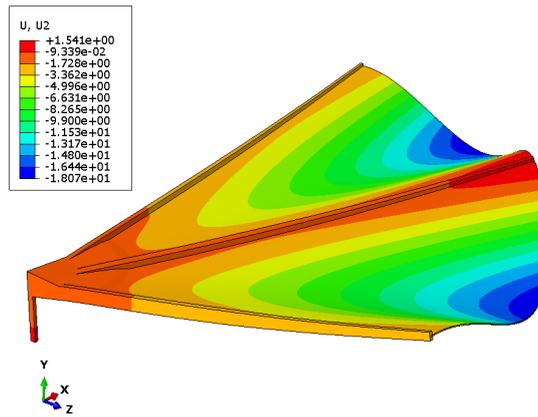


Figura 32 Desplazamientos verticales del Paraguas Octogonal

Por último se va a comentar brevemente la deformada de la estructura, dado que ella misma habla por sí sola. Los únicos desplazamientos que se dan son verticales, lo cual es consecuente con la simetría geométrica y de carga que posee el sistema, y por eso son los representados en la figura anterior. El punto de mayor deflexión se da en el punto central del perímetro entre dos arcos contiguos -zona azul-, y alcanza un valor de 18 mm. Pese a que este valor es demasiado alto y seguro se reducirá al implementar el forjado concéntrico que atraviesa la tela, y el forjado axial que recorre los nervios, la deformación se da en un punto coherente con lo esperado.

4. CONCLUSIÓN

Se considera que los detalles técnicos y constructivos de las dos estructuras aquí analizadas han quedado suficientemente bien justificados, razonados y explicados, así que la presente conclusión se realiza a nivel personal a modo de reflexión a partir de los conocimientos adquiridos a lo largo de los procesos de comprensión y redacción del proyecto.

Vivimos en una época dotada de una abrumadora capacidad computacional en la que tenemos al alcance de un par de “clicks” un verdadero universo de posibilidades. Un nivel de sofisticación computacional que el hombre de hace 50 años no podría si quiera haber imaginado, del mismo modo que a nosotros nos resulta imposible proyectar la dirección que tomará la tecnología en los próximos 50 años. Los softwares de representación y cálculo se desarrollan a un ritmo tan vertiginoso que apenas podemos percibir las repercusiones que genera en nuestra manera de pensar.

Cuando calcular la respuesta de una estructura o realizar su comprobación experimental costaba días o semanas, en vez de segundos como ahora, el ingeniero más válido era aquel que sabía exactamente qué era aquello que tenía que calcular, y qué era aquello que podía desechar de un solo vistazo.

Nuestra generación se ha gestado y ha nacido dentro de estos avances, donde la tecnología nos facilita tanto la vida que a veces cometemos el error de asumir que la vida es sencilla, simple, y no profundizamos en el por qué, nos contentamos con aceptar los resultados de la pantalla. Es por estos motivos que opino que existe una especial relevancia en enseñar a las nuevas generaciones a interesarse por conocer y comprender cómo pensaban los hombres del pasado, cuales eran sus inquietudes, cómo proyectaban sus ideas y cómo afrontaban sus retos con las capacidades de entonces. Y es por ello que me interesé por este trabajo, porque me parece que Sánchez del Río poseía todas aquellas características que hacen ingenioso a un ingeniero.

No pretendiera que esta reflexión, que repito es a nivel puramente personal y para nada generalizable, desprestigiase en medida alguna a los ingenieros modernos, nada más lejos de la realidad. Simplemente creo que es preciso reconocer este peligro, percibir esta corriente que a veces puede ser tentadora de arrastrarnos, y no dejar que la tecnología eclipse los verdaderos valores que caracterizan a un ingeniero: la curiosidad, la creatividad, la ambición y la intuición.

Finalizaré el proyecto con una breve y concisa cita de Elbert Hubbard que considero refleja en mayor o menor medida la idea que pretendo exponer:

“Una máquina puede hacer el trabajo de cincuenta hombres ordinarios, pero ninguna máquina puede hacer el trabajo de un solo hombre extraordinario.”

5. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Pereira, J. R. (2013). *Los orígenes del hormigón armado en la arquitectura española*. (Vol. 7). La Coruña: Revista Labor & Engenho.
- Anaya Díaz, J. (2000). Hormigón, estructura y forma de una nueva técnica en la arquitectura española de la primera mitad del siglo XX. *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Sevilla: Junta Andalucía.
- Arquitectura Asturias, F. (s.f.).
- Bassegoda, J. (1987). *El hormigón armado, en Historia de la Arquitectura Española*. (Vol. 5). Barcelona.
- Brufau, A., Aguado de Cea, A., De la Fuente, A., & Payola, J. (2018). La Consolidación de una estructura única: El Paraguas de Pola de Siero. *Quaderns D'Estructures*.
- Burgos Nuñez, A. (2005). *El desastre del Tercer Depósito, cien años después*. Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil.
- Casinello, P. (2011). Las cubiertas de Sánchez del Río en el contexto internacional de la Arquitectura Moderna. En F. J. Turriano, *Ildefonso Sánchez del Río Pisón* (pág. 122). Madrid.
- Cassinello, P. (2012). Ildefonso Sánchez del Río Pisón: De la bóveda a la lámina (1924-1972). *Séptimo Congreso Nacional de la Historia de la Construcción*. Santiago.
- CEHOPU. (s.f.).
- CNAM. (1902).
- Docomomolbérico. (s.f.).
- Fernández Cuesta, C. (s.f.). *Interiores del Mercado de Pola de Siero*.
- Fundación Janelo Turriano. (2011). *Ildefonso Sánchez del Río Pisón: El Ingenio de un Legado*. Madrid: Ediciones del Umbral.
- Imprenta de Hernando y Cia. (1898).
- Libros Alcaná. (s.f.).
- Manske, M. (s.f.).
- Manterola, J. (2011). Ildefonso Sánchez del Río Pisón, ingeniero. En F. J. Turriano, *El Ingenio de un Legado*. Ramos.
- MC2 (Grupo Tyspa). (2018). *Proyecto Rehabilitación del Palacio de los Deportes*. Oviedo.
- Menéndez, M. (s.f.). *Lavadero de Corredoria en la Actualidad*.
- Nistal Cordero, A., Retana Maqueda, M. J., & Ruiz Abrio, T. (2012). *EL HORMIGÓN: HISTORIA, ANTECEDENTES EN OBRAS Y FACTORES INDICATIVOS DE SU RESISTENCIA*. Madrid: Revista Tecnológico@ y Desarrollo, Universidad Alfonso X el Sabio.
- Pamies Rahan, T. (2011). *Evolución del conocimiento del hormigón estructural hasta 1970*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Pérez Guel, I. (s.f.). *Apuntes para la materia de estructuras de concreto*. México: Tesis de Ingeniería Civil.
- Revuelta Pol, B. (2011). Breve Crónica de un Ingeniero Bohemio. En F. J. Turriano, *El ingenio de un legado*.
- Ribera, J. E. (1903). *Construcciones modernas de Hormigón Armado*. Madrid: Revista de Obras Públicas.
- Ribera, J. E. (1931). Mi última lección, establezco mi balance profesional. *Revista de Obras Públicas*.
- Ribera, J. E. (1936). Progresos constructivos de la Ingeniería española. *Revista de Obras Públicas*.
- Sánchez del Río, I. (1928). El cuarto Depósito de aguas de Oviedo. *Revista de Obras Públicas*.
- Sánchez del Río, I. (1930). El Cuarto Depósito de aguas de Madrid. *Revista de Obras Públicas*, 139-145.
- Sánchez del Río, I. (1931). Un paraguas de hormigón armado en Oviedo, o el ojo clínico del ingeniero. *Revista de Obras Públicas*(2578), 302.
- Sánchez del Río, I. (1957). *La construcción de grandes bóvedas por el sistema de "dóvelas onda"* (Vol. 2905). Madrid: Revista de Obras Públicas.
- Sánchez del Río, I. (1960). Estructuras Laminas Cerámicas. *Informes de la Construcción* , 12(119).
- Sánchez del Río, I. (1977). Palacio de los Deportes de Oviedo, España. *Informes de la Construcción* , 29(287), 73-85.
- Saenz Ridruejo, F. (2002). *Sánchez del Río y Fernández Casado, Dos ingenieros de la Generación del 27*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Soraluce, J., & Alonso, J. (1994). El Banco Pastor.
- Valenzuela, A. (2015). *Las patentes de hormigón armado. Del gran negocio al gran desarrollo tecnológico. Los antecedentes del Movimiento Moderno* (Vol. 3). Rita.
- Yepes Piqueras, V. (2016). *La barca de Lambot, el "Antecesor" del hormigón armado*. Valencia.

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS DE LAS IMÁGENES

Figuras 1, 3, 4 (b), 7 (b), 22, 23, 25(a), 33, 37 (b), 40, 41, 42, 43, 45 (a), 46 (b), 47 (a), 48 (a), 48 (b), 50 (a), 50 (b), 51, 52 (a), 53 (b), 54 (a), 54 (b) (*Fundación Janelo Turriano, 2011*)

Figuras 4(a), 7 (a), 55 (*Sánchez del Río, Palacio de los Deportes de Oviedo, España, 1977*)

Figuras 5, 6 (*MC2 (Grupo Tysa), 2018*)

Figuras 20, 44 (*Arquitectura Asturias*)

Figuras 24, 25 (b) (*Brufau, Aguado de Cea, De la Fuente, & Payola, 2018*)

Figura 34 (b) (*Manske*)

Figura 35 (a) (*Imprenta de Hernando y Cia., 1898*)

Figuras 35 (b), 36 (b) (*CNAM, 1902*)

Figura 36 (a) (*Libros Alcaná*)

Figura 37 (a) (*Menéndez*)

Figuras 38 (a), 38 (b) (*Sánchez del Río, Un paraguas de hormigón armado en Oviedo, o el ojo clínico del ingeniero, 1931*)

Figura 39 (*Casinello, 2011*)

Figuras 45 (b), 46 (a), 47 (b) (*Sánchez del Río, El cuarto Depósito de aguas de Oviedo, 1928*)

Figuras 49, 50 (a) (*Fernández Cuesta*)

Figura 52 (b) (*DocomomoIbérico*)

Figuras 53 (a) (*Sánchez del Río, Estructuras Laminares Cerámicas, 1960*)

6. ANEXOS

6.1 Resumen biográfico



Figura 33 Retrato de Sánchez del Río

Ildefonso Sánchez del Río Pisón fue un ingeniero de caminos nacido en la localidad de Haro, La Rioja, en mayo de 1898 y fallecido en Madrid en diciembre de 1980, que dedicó su carrera profesional a la proyección y construcción de estructuras de grandes luces en hormigón armado.

De padre leonés y madre riojana, pasó su niñez en Haro junto con sus 7 hermanos menores, hasta alcanzar los 19 años de edad, cuando, en 1917, se traslada a Madrid para comenzar sus estudios en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Completó sus estudios en 1922, quedando en el puesto número 32 entre los 44 de su promoción. Fue discípulo del reconocido proyectista José Eugenio Ribera, pionero en la introducción del hormigón armado en España, y heredó de él, además de su inclinación al mencionado material, un fuerte carácter racional y práctico, enfocando siempre sus diseños desde la creatividad, el ingenio y la intuición técnica en busca de la solución óptima a nivel estructural y económico.

Tras una estancia de 2 años en el puerto de San Esteban de Pravia, realizando proyectos de menor alcance, en 1924 fue nombrado Ingeniero Municipal de Oviedo, cargo que desempeñaría durante los próximos 17 años, y durante el cual daría luz a sus construcciones más imaginativas. Durante esta época las edificaciones de Sánchez del Río se caracterizan por componerse de un esqueleto autoportante de hormigón armado, del cual se colgaban o apoyaban las finas láminas que conforman la cubierta, que podía ser de Uralita o de hormigón armado, también. Con esta metodología lleva a cabo todo tipo de proyectos: puentes, cubiertas, depósitos de agua, acueductos, naves, edificios municipales, etc. Entre ellos son destacables las numerosas e icónicas cubiertas en forma de paraguas, como el Paraguas de la Leche de Oviedo (1925); el IV Depósito de Oviedo (1928), con un diseño circular original de Sánchez del Río, tan sobresaliente a nivel estructural, económico y estético, que fue replicado en sus próximos 5 depósitos; el Mercado Cubierto de Pola de Siero (1931), por su original solución estructural; el puente de 80 m sobre el Río Nalón (1929); y las naves de la fábrica de Armas de Oviedo (1940).

Durante la Guerra Civil se encargó del abastecimiento de agua de la ciudad de Oviedo, y al finalizar la misma recibió la Cruz del Mérito Civil entre otras condecoraciones por su colaboración. Tras terminar la guerra abandona su puesto en el entramado estatal y se une a la aventura empresarial en Madrid. En 1941 funda junto con Luis Sánchez-Guerra la asociación “Dragados y Construcciones”, que diez años más tarde convertiría en la primera empresa de obras públicas de España, y que actualmente sigue operativa internacionalmente dentro del

grupo ACS. El único proyecto en el que se embarcaron juntos fue el del Dique Oeste de Palma de Mallorca (1941).

Sánchez del Río pronto se despegó de la empresa para llevar a cabo proyectos individuales y en colaboración con otros técnicos. Al año siguiente, en 1942, con el fin de patentar sus forjados cerámicos (hasta 15 patentes en los siguientes 13 años), Ildefonso fundó su propia empresa “Río-Cerámica”, la cual seguirá activa hasta 1977, cuando Ildefonso retira definitivamente del mundo laboral. Cabe resaltar los talleres y el hangar construidos para el Instituto Nacional de Técnica Aeronáutica en 1944, junto con Carlos Fernández Casado.

En 1945, Sánchez del Río, a pesar de sus pobres dotes administrativas y políticas, es nombrado Director General de Carreteras por el entonces ministro de Obras Públicas Fernández Ladreda, alcalde de Oviedo mientras Ildefonso desempeñaba su cargo de ingeniero municipal, y que había comprobado su eficacia técnica. Según sus colaboradores, Sánchez del Río no llegó a interesarse nunca por el complicado funcionamiento de la Administración, y dedicó la mayor parte de su tiempo a redactar la Ley de Modernización de Carreteras, publicada en 1950 justo antes de retirarse del puesto y volver a la actividad privada.

Durante los siguientes años de su carrera y hasta el final de la misma, Sánchez del Río se centró en desarrollar su genuino método de las “*dovelas-onda*” para la construcción cubiertas laminares de grandes luces, ambición que había tenido desde el inicio de su carrera, pero que no pudo realizar hasta entonces debido a su limitada cualificación matemática. Este procedimiento se basa en la generación de cubiertas de cañón mediante la consecución de arcos autoportantes, compuestos por el ensamblaje de módulos individuales (dovelas) de sección curva y composición mixta de hormigón, acero y cerámica. El desarrollo y aplicación de esta técnica se convirtió en el centro de la actividad profesional de Ildefonso hasta su jubilación. Con este método Sánchez del Río llevó a cabo las cubiertas de diversas naves industriales durante las décadas de los 50 y los 60, con las que alcanzó vanos máximos de 35 metros en las naves de Río-Cerámica en Madrid (1957) y la Sociedad Azucarera Española de Palencia (1960), pero cuyo máximo desarrollo se plasma en el Palacio de los Deportes de Oviedo (1961-1975), alcanzando vanos de 100 metros.

Durante su construcción, Sánchez del Río llevó a cabo otras estructuras merecedoras de mención por ser sus primeras estructuras laminares enteramente de hormigón armado, los paraguas invertidos del Mercado de Ganado de Pola de Siero (1972), uno de planta octogonal de 40 metros de diámetro, y tres de planta cuadrada de 20 metros de lado. La inauguración del Palacio de los Deportes supuso la finalización de la carrera profesional de Sánchez del Río, para la cual contaba ya con 77 años. Cuatro años más tarde, en 1979, es nombrado Hijo Adoptivo de Oviedo, un año antes de fallecer por causas naturales en Madrid.

6.2 Revisión de la obra

El presente apartado tiene como objetivo la selección de los proyectos más representativos desarrollados por Ildefonso a lo largo de su carrera y la exposición pormenorizada de los aspectos técnicos más relevantes de los mismos.

La obra ingenio-arquitectónica de Sánchez del Río estuvo fuertemente marcada por su afán renovador, creativo y atrevido heredado de su maestro José Eugenio Ribera; no limitándose a imitar a sus coetáneos, si no tratando de conceptualizar y desarrollar continuamente técnicas constructivas que fueron de gran utilidad para asentar e impulsar aquel "nuevo"⁸ material que revolucionaría el ámbito de la construcción hasta nuestros días: el hormigón armado. En última instancia, esta sección (y el presente trabajo en sí) pretende que poner en valor el excepcional ingenio que el autor esconde tras su obra, al que se considera no suficientemente reconocido.

Se comenzará contextualizando históricamente los inicios del hormigón en la España de principios del siglo XX, enlazándolo con la denominada como "Generación del 27 Técnica" de la que se expondrán brevemente los principales ingenieros y sus corrientes científicas. Tras esta introducción se procederá a presentar y evaluar la obra de Ildefonso, la cual se ha dividido en dos apartados coherentes cronológicamente: "*Estructuras y cubiertas nevadas*" y "*Naves onduladas y Bóvedas de grandes luces*". Se han descartado de esta selección los proyectos de puentes que llevó a cabo por considerarse de no suficiente interés técnico.

6.2.1 Inicios del hormigón armado en Europa y España

Bien conocidos desde hace milenios son sendos materiales que componen el denominado actualmente como hormigón armado: el hierro, empleado ya hace 7.000 años (principalmente con fines armamentísticos y agrarios) en un hito histórico que bautizó esta época con el nombre de dicho metal; y el hormigón, descubierto y empleado con fines constructivos por los romanos en el 300 a.C. "*Este primitivo tipo de hormigón surgió de la mezcla de cal y arena volcánica abundante en Puzzoli, a las faldas del Vesubio, que lo dotaba de una excepcional resistencia.*" (Pérez Guel). Algunas de las principales obras que podemos destacar y que aún perduran son el Pont du Gard (Francia), los baños públicos de Roma, el teatro de Pompeya, o el Panteón (Italia).

Se tiene constancia de que durante la época del Imperio Romano y del Renacimiento, si bien de manera más práctica que consciente, se recurría de habitualmente a la utilización del recurso de reforzar la albañilería con grampas de bronce o hierro cuando la tracción era excesiva, usando particularmente en arcos y bóvedas piezas de hierro en forma de U en la cara traccionada evitando así que se abriesen las juntas de los bloques de piedra. (Nistal Cordero, Retana Maqueda, & Ruiz Abrío, 2012).

No obstante, tras la caída del Imperio Romano, las aplicaciones constructivas del hormigón parecieron desvanecerse en pos de la madera, piedra y mortero tradicionales, abriendo un periodo de más de un milenio durante el cual este material cayó en el olvido, limitándose a formar parte de elementos ornamentales y esculturas.

En 1824 el albañil británico Joseph Aspdin consiguió la patente del que se convertirá en el cemento mayormente utilizado por el hombre, el **cemento Portland**⁹, base de la mayoría de hormigones actuales. Pero no será hasta mitad del siglo XIX, gracias al desarrollo de nuevos materiales impulsado por la Revolución Industrial, cuando el inicialmente denominado hormigón reforzado hará su aparición (de forma más intuitiva que científica) de la mano de los franceses Jean-Louis **Lambot** (1814-1887) y Joseph **Monier** (1823-1906). Lambot, pionero con poca visión empresarial, desarrolló varios sistemas de cemento reforzado con malla de acero en su finca agrícola, los cuales nunca llegó comercializar exitosamente. Destaca entre ellas la

⁸ Ver el siguiente apartado "Contextualización: inicios del hormigón armado en Europa y España"

⁹ British Patent 5022: "An Improvement in the Mode of Producing an Artificial Stone", by Joseph Aspdin; 1824.

famosa *Barca de Lambot*¹⁰ (figura 34 (a)), construida en 1848 y patentada en 1856, entramado de alambres de acero cubierta de cemento -material al que denominó "ferciment"- asumida como el "*homo antecessor*" del hormigón armado (Yepes Piqueras, 2016).

El considerado formalmente como padre del hormigón armado fue Monier, jardinero de profesión, quien intuitivamente decidió cerchar con malla de alambre de acero sus macetas de hormigón para aumentar su capacidad resistiva a la tracción que estas sufrían provenientes del crecimiento de las raíces de las plantas. Comenzó a experimentar en esta línea en 1949 y rápidamente vislumbró la multitud de posibilidades que podrían derivarse de esta combinación, así que durante los próximos años de su vida se dedicó a diseñar y patentar numerosos sistemas con este enfoque, entre los cuales se incluían depósitos, estanques, tubos, prefabricados para fachadas, puentes¹¹ (figura 34 (b)), vigas y, finalmente, casas. Sin embargo, "*Monier no consiguió sacar el merecido partido a sus patentes, malvendiéndolas a diferentes emprendedores europeos (principalmente G.A. Wayss en Alemania) (...) y perdiendo oportunidades de explotación en Rusia y Estados Unidos*". (Valenzuela, 2015).

En España, El ingeniero militar Francesc Macià i Llussà (1859-1933) adquirió los derechos de explotación de las patentes de Monier y en 1893 construyó el depósito de Puigverd en Lleida (figura 34 (c)), considerado como la primera construcción española en hormigón armado, de planta circular de 25,3m de diámetro y 1000m³ de capacidad (Valenzuela, 2015).

Hemos de mencionar junto a estos dos precursores al francés François **Coignet**, quien unos años antes, en 1852, aplicó vigas de acero en doble "T" en la construcción de la cubierta de su casa como refuerzo de las losas de hormigón de 30cm de espesor que había diseñado. "*Si bien no podía considerarse como hormigón armado, sí mostraba claramente hacia dónde se dirigían los esfuerzos de constructores, industriales y técnicos en aquellos años*" (Valenzuela, 2015).



Figuras 34 (a), (b) y (c) Barca de Lambot; Puente de Chazelet (Francia); Depósito de Puigverd (Lleida)

A partir de los descubrimientos de estos tres pioneros, hace su aparición el material que daría respuesta a las necesidades emergentes de la sociedad moderna europea abriendo un extenso abanico de posibilidades constructivas que revolucionarían el prisma edificativo para siempre. La capacidad de romper las barreras dimensionales creando mayores voladizos y amplios espacios diáfanos libres de columnas interiores; las propiedades ignífugas del hormigón que cada vez eran más necesarias tanto en edificios públicos densamente transitados como en las numerosas incipientes fábricas¹²; y la economía asociada tanto a su adquisición como a su moldeo y posterior mantenimiento¹³, dieron pie a **nuevos sistemas edificatorios** que atendían las exigencias sociales y productivas de la época. El hormigón armado parecía imponerse (y de hecho lo hizo) por encima de las estructuras férricas tan veneradas durante el anterior siglo, pues estas conllevaban tres importantes problemáticas: la oxidación inevitable, la deformación

¹⁰ Se trata de una barca de 4 m de largo, 1.3 m de ancho y un espesor de tan sólo 4 cm que Lambot diseñó para su uso privado en su finca. Fue mostrada por primera vez en la Exposición Universal de París de 1855, y supuso la apertura de una línea mundial de navas posteriores construidas de este material.

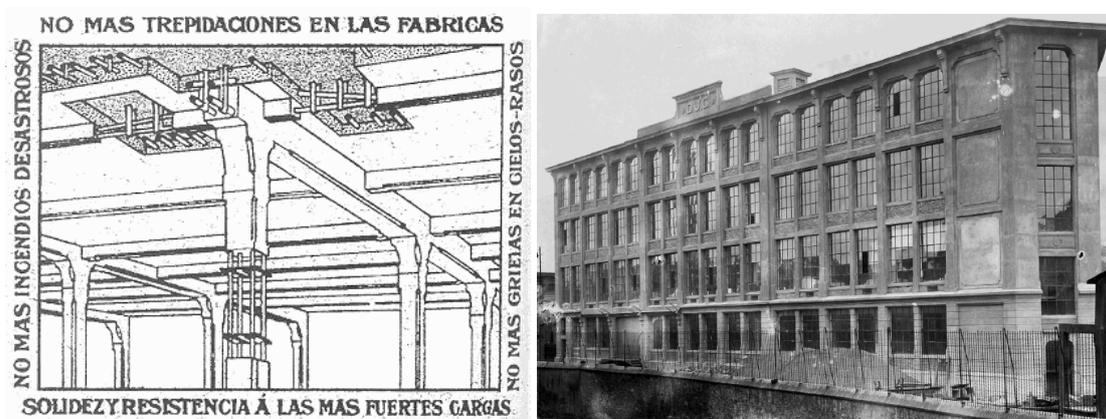
¹¹ En 1875 construyó el Puente de Chazelet (Benoît-du-Sault, Francia), considerado el primer puente de hormigón armado de la historia con un vano de 16m de luz y un ancho de 4m.

¹² Los numerosos incendios derivados de las débiles medidas de seguridad de las nuevas fábricas eran la principal preocupación de los emprendedores de la época.

¹³ Cabe resaltar que en este momento se asumía el hormigón como un material cuasi-eterno y de escaso o nulo mantenimiento, creencia que el tiempo desmentiría.

con la temperatura y el aflojamiento sistemático de los remaches. Se abre a partir de este momento (finales del siglo XIX) una verdadera carrera de patentes para aprovechar la oportunidad económica que se abría.

A esta carrera se sumaron distinguidos ingenieros y arquitectos como Hyatt, Möller, Mèlan, Mattrai, Cottancin o Wünc, cada uno con su **propio método** aunque poco se diferenciaban en lo esencial; pero pronto todos quedaron a la cola del imperio construido por el belga François de **Hennebique**. El sistema Hennebique se basaba en la creación del esqueleto autoportante completo, desde la cimentación hasta la cubierta, entramando vigas y pilares rectos de hormigón armado, liberando a su vez a las fachadas de su carga¹⁴ e incluyendo amplias cristaleras en las mismas (*figuras 35 (a) y (b)*). El éxito de Hennebique proviene dos factores: de su modelo de negocio multinacional basado en empresas concesionarias; y de la divulgación propagandística que la misma firma realizaba mediante su revista *Le béton armé* (1898-1939), en la que se exponían periódicamente los avances y obras efectuados por los constructores. Según Valenzuela: "En 1902 llegó a tener 290 concesionarios y 43 oficinas en Europa, 12 en Estados Unidos y 10 por África y Asia. (...) ya había levantado más de 7.000 estructuras para entonces."



Figuras 35 (a) y (b) Cartel publicitario del sistema Hennebique para la construcción de pisos; Lavandería industrial Duménil, Jaéglé et Compaigne, 1902 (Francia)

Por otra parte, cabe mencionar que las estructuras de hormigón armado, tanto en el sistema Hennebique como en el resto de métodos¹⁵, en este momento (y durante algunos años más) se estaban fuertemente fundamentados sobre **experimentos empíricos**, pruebas de carga, y la vista y experiencia del técnico supervisor.

“Ensayos y construcciones serán el capital inicial de las empresas con patentes y en consecuencia el conocimiento sobre el que descansará la puesta en obra, inclinando a los teóricos a evolucionar en la aplicación de los cálculos como instrumentos de comprobación que se debían ajustar a los resultados de los ensayos y pruebas de carga, hacia una teoría general de la Mecánica Aplicada.” (Anaya Díaz, 2000)

Hasta 1939 no existían en España normas de obligado cumplimiento acerca del cálculo, diseño y ejecución con hormigón armado, por lo que los **laboratorios** de experimentación constructiva cobran una especial importancia. En el territorio español podemos destacar el laboratorio de la Escuela de Caminos (1898) y el instituto de Construcción y Cemento fundado por Eduardo Torroja en 1934. Ante esta falta de metodología técnica, muchos escépticos seguían aferrándose al imperio férreo y rechazando el nuevo material.

Es aquí donde se presenta el nexo entre el hormigón europeo y el protagonista del presente trabajo: el ingeniero de Caminos **José Eugenio Ribera**, maestro de Ildefonso. Ribera fue concesionario de la firma Hennebique en España desde 1897 hasta 1901 para a continuación fundar su propia empresa *Hidrocivil*, convirtiéndose en uno de los principales pioneros del

¹⁴ Hasta entonces las fachadas solían ser portantes y hechas de piedra, densamente adornadas, y el esqueleto estructural nunca quedaba a la vista.

¹⁵ Eran varios en aquel momento: sistemas Monier, Mèlan, Möller, Mattrai...

hormigón armado. Habiéndose convertido durante su juventud en Portugal en experto en estructuras de ferrocarriles (mayormente en grandes puentes de hierro), Ribera pudo ver de primera mano el desarrollo del nuevo material en Europa al asistir al Congreso del Hormigón Armado en París en 1898 y a los congresos anuales de los concesionarios Hennebique; y fue el principal encargado de transmitir la proyección de posibilidades a los ingenieros y arquitectos españoles. Otras figuras merecedoras de mención que participaron en esta misión fueron: ingenieros como Juan Manuel de Zafra, Ricardo Martínez Unciti, Eduardo Gallego Ramos y Gabriel Rebollo; arquitectos como Mariano Belmás, Federico Ugalde, Mauricio Jalvo Millán y Claudio Durán; empresarios como Domingo Fort, Manuel Balbás y Eugenio Grimal; o militares como Manuel Cano León y Ricardo Seco de la Garza, entre otros. No faltaron tampoco retractores a la implantación del hormigón armado, principalmente del mundo de la arquitectura, los cuales no se mostraban convencidos de las nuevas formas artísticas que este nuevo material traería consigo.

En palabras del propio Ribera en uno de sus 72 artículos escritos en la ROP¹⁶, la pretensión de este equipo era que:

"(...)España, en el arte de la construcción, no vaya a la zaga de las demás naciones, ya que, por desgracia, en otras muchas cuestiones, desempeñamos un papel modesto cuando no vergonzoso." (Ribera J. E., 1903).

Comenzó a construir con el sistema Hennebique en **1898**, con los pisos de la cárcel panóptica de Oviedo (primera obra de este tipo en España), siguiendo un proceso fundamentado en la experimentación a base de pruebas de carga¹⁷. Durante los siguientes siete años las construcciones en hormigón armado **crecieron** numerosamente en nuestro país, la mayoría con el sello Hennebique. Según el arquitecto e historiador catalán Joan Bassegoda:

"Desde entonces comenzaron a multiplicarse sus aplicaciones en toda España: primero en el País Vasco, Asturias y Cantabria, y, poco después, en Cataluña, Valencia y Andalucía, mientras en Madrid, el número de aplicaciones fue más limitado, reduciéndose a un puente de Ribera sobre el Manzanares y a algunas construcciones de carácter industrial." (Bassegoda, 1987).

No obstante, tras estos primeros años de expansión y divulgación, el novedoso hormigón armado, al que todo el mundo parecía observar con lupa sus primeros pasos, sufre un batacazo que pospondrá durante más de una década su completo asentamiento: el **desastre de 1905**. Este hecho catalogado de desastre o crisis fue el colapso de la cubierta del Tercer Depósito del Canal de Isabel II en Madrid durante su construcción, proyecto a cargo de Ribera y que prometía traer consigo por un lado la resolución del problema de abastecimiento en la capital, y por otro lado la consolidación de la edificación en hormigón en el país. El proyecto se había retrasado y encarecido durante varios años debido a la inestabilidad de los suelos, así que se decidió ejecutar una cubierta de hormigón, que resultaba más barata y rápida, en la que sería *"una de las más grandes obras de hormigón armado construidas hasta entonces en todo el mundo"* (Burgos Nuñez, 2005). Fue este un terrible accidente en el cual perdieron la vida treinta trabajadores y más de cincuenta quedaron gravemente heridos, y que desencadenó una grandiosa polémica que casi sirvió para **paralizar** el desarrollo en nuestro país de este material.

Pese a caer sobre Ribera toda la responsabilidad del accidente, del cual fue declarado inocente, supo recuperarse de este duro golpe sufrido en su empresa, en gran parte gracias al inmediato éxito en 1906 de la apertura del Sifon de Sosa¹⁸, parte de la estructura del canal de Aragón, una obra sin precedentes en España considerado el mayor hito hidráulico del momento.

Durante los próximos años la empresa de Ribera desarrolló multitud de proyectos,

¹⁶ ROP es el acrónimo de Revista de Obras Públicas, quizá la más importante de las revistas de divulgación de conocimiento constructivo en España. Entonces este tipo de revistas era la manera más eficaz de transmitir los avances científicos.

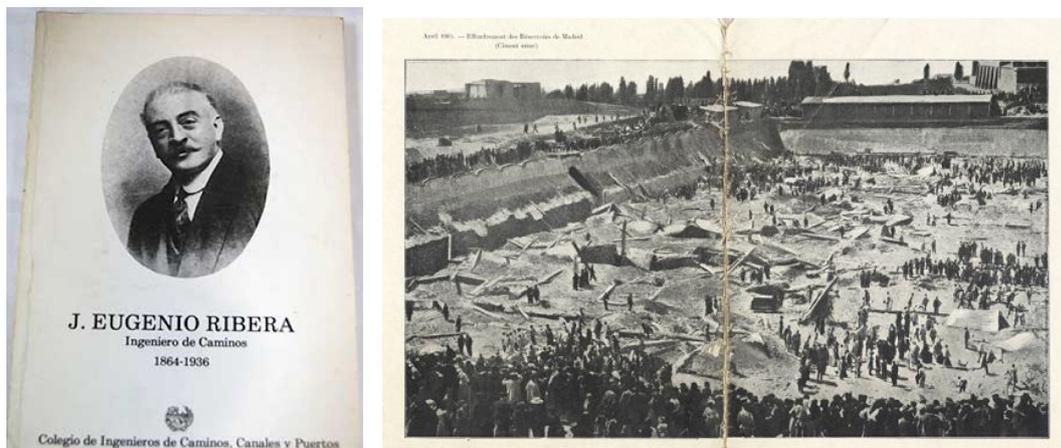
¹⁷ Ver el artículo de Ribera: ROP 1898, *"El hormigón armado"*, vol 118, páginas 363-365. Allí se exponen los concienzudos experimentos a los que se sometió la estructura.

¹⁸ Proyecto del que dependían las capacidades de regadío de Huesca y Lérida, y que comprendía la hazaña de emplear dos tubos de hormigón de un kilómetro de longitud y 3,8 metros de diámetro sometidos a una presión de agua de 3 atmósferas.

siempre orientados a sus **ideales** característicos de simplicidad, eficacia, racionalidad y economía; los cuales recoge en su artículo "*Mi última lección, establezco mi balance profesional*", publicado al final de su carrera en la ROP (1931). (Ribera J. E., 1931)

A partir de entonces construir en la capital con hormigón armado era considerado un atrevimiento, al cual solo hicieron frente principalmente empresas extranjeras que, aprovechando el creciente sector del ocio (el cual alcanzará su máximo desarrollo en la década de los años 20), levantaron emblemáticos teatros, hoteles y cines.

Por su parte, en el resto de la península, la posterior recuperación y evolución de la técnica del hormigón armado se efectuó de la mano de nuevas empresas constructoras, como la Compañía de Sestao, de fuerte implantación por entonces en el Norte de España, que llegó a arrebatar el liderazgo a Ribera(...). La organización Hennebique recobró protagonismo con Miguel Salaverría y, sobre todo, con Juan Miró Trepas, creador de 'Construcciones y Pavimentos', la gran empresa catalana de construcciones de hormigón durante la siguiente década. (Alonso Pereira, 2013)



Figuras 36 (a) y (b) José Eugenio Ribera; Tercer depósito de Madrid tras del Desastre

No obstante, la total consolidación del hormigón armado en España no se conseguirá hasta conseguir **unificar** y normalizar su uso en 1914. Con la enorme cantidad y variedad de **patentes** existentes en el momento resultaba muy complicado regular aspectos como las medidas de seguridad, los costes y mano de obra, los materiales o la adjudicación de las obras públicas. De esta necesidad surge, según expone Alonso Pereira:

"La primera norma española: la Real Orden de 20 de octubre de 1914 para el hormigón armado en las obras públicas. Para entonces habían sido ya fijadas en Alemania y en Francia las primeras normas oficiales de cálculo para el empleo de este sistema, en 1904 y 1906 respectivamente. En todo caso, en España se contaba ya con un eficaz tratado empírico: 'Manual práctico del constructor' (Jalvo, 1904), analizado y valorado positivamente por 'La Construcción Moderna' y, unos años después, con otro científico, 'Mecánica del hormigón armado' (Zafra, 1911)" (Alonso Pereira, 2013)

No obstante, "la primera Instrucción española de obligado cumplimiento no fue editada hasta 1939 (provisional), (...) editándose de forma definitiva en el año 1944." (Pamies Rahan, 2011).

A partir de este momento comienzan a proliferar numerosos en España las **empresas especializadas** en construcción con hormigón armado, así como se refuerza la **enseñanza** en las escuelas técnicas sobre los aspectos constructivos y los métodos de cálculo de este material. En esta línea, en 1918, Ribera comienza su labor como profesor en la Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Madrid en la asignatura de "Puentes de Fábrica y Hormigón Armado", sin dejar de lado su carrera de proyectista. Permanecerá en la escuela hasta 1931, cuando será obligado por ley a jubilarse. Cuando entró en la escuela ya había otro especialista del hormigón ya mencionado, Juan Manuel de Zafra.

Ribera y Zafra eran dos caras de la misma moneda, ambos tenían amplios conocimientos sobre el hormigón armado y habían contribuido enormemente a su introducción

en España; pero mientras Zafra se caracterizaba por la fundamentación teórica, la exactitud en los cálculos y el rigor científico, el método de Ribera era mucho más **práctico, intuitivo y creativo**. Ribera desarrollaba un método de enseñanza directamente aplicado a la economía, simpleza y eficacia que le caracterizaban. Quizá sea esta diferencia (sumado a la prematura muerte de Zafra en 1923) la que hizo que muchos alumnos de aquella generación se sintieran discípulos de Ribera. Aquella generación de excelentes técnicos que muchos denominaron, en analogía con la poética de entonces, la "**Generación del 27 técnica**". Esta comprende un grupo de aproximadamente 500 individuos licenciados en la Escuela de Caminos entre los años 1917 y 1931 (Saenz Ridruejo, 2002), e incluye una amplia variedad de técnicos con alto enfoque empresarial (en línea con la expansión económica favorable en la España de la época) y muchos de ellos internacional, que se dedicaron a distintos ámbitos científicos como la ingeniería, la arquitectura, la electricidad, la aeronáutica y la empresa hidroeléctrica, entre otros.

“Daremos algunos nombres que pueden servir de referencia. En las carreteras sobresalió José Luis Escario; en ferrocarriles, José María García Lomas y Francisco Jiménez Ontiveros; en hidráulica Enrique Becerril y Guillermo Serra-Andreu; en electricidad José Armero y Rafael Spottorno; en hidroelectricidad Victoriano Muñoz y Santiago Corral y en puertos Ramón Iribarren y Gabriel Roca. Proyectistas destacados fueron César Villalba, Francisco Martín Gil, Eduardo Torroja, Ildefonso Sánchez del Río y Carlos Fernández Casado. Entre los constructores mencionaremos a José María Aguirre, Rafael López Bosch, José Juan Aracil y Ramón Belmonte, además del ya citado Entrecanales. A la enseñanza de las matemáticas se dedicó el ya citado Bachiller, aparte de otros como Alicart o Humaran. En la física aplicada destacó Alberto Laffon y en la aeronáutica Juan de la Cierva.” (Saenz Ridruejo, 2002)

Si bien Sánchez del Río no fue el alumno más aventajado de la Escuela (quedando 32 de 44 en su promoción), sí heredó de su maestro ese carácter tan creativo y práctico que lo enfocó a los estudios experimentales en vez de a cálculos minuciosos. Aunque no trabajó nunca de la mano de Ribera, sí les unió la admiración recíproca que se tenían, alabando Ribera públicamente en numerosas ocasiones las construcciones (especialmente las primeras) de su discípulo.

Conviene resaltar el papel de Eduardo Torroja, que desde los años 30 estaba involucrado (y llegó a ser uno de los máximos referentes¹⁹) en la denominada por la arquitecta Pepa Cassinello como "**Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna**", iniciada por los alemanes Franz Dischinger y Wilhelm Flügge²⁰ en la década anterior. Esta aventura encaminada a la construcción de estructuras laminares de hormigón armado (o *Thin Concrete Shells*); "*no incluyó a muchos ingenieros y arquitectos ávidos de este incipiente conocimiento debido a la complejidad de los primitivos sistemas de cálculo y la falta de experiencia proyectual y constructiva en aquellos momentos*" (Cassinello, 2012). Así pues, algunos de estos técnicos, como es el caso de Ildefonso, tuvieron que desarrollar sus propios métodos libres de dicha carga matemática para construir sus cubiertas de hormigón armado. En palabras del propio Ildefonso:

“A diferencia de Torroja y Salvadori, llevo treinta y tres años proyectando y construyendo cubiertas pero ninguno he dedicado a profundizar en la teoría de las cubiertas laminares, porque no tengo la preparación matemática de mis admirados colegas.” (Sánchez del Río, 1960)

¹⁹ Fundador de la IASS (International Association of Shell Structures) en 1957, todavía operativa. Entre sus obras más famosas incluyen el mercado de Abastos de Algeciras (1935), el frontón de Recoletos (1935) y el hipódromo de la Zarzuela (1931) en Madrid. Ver el libro "Las estructuras de Eduardo Torroja" de M. Salvadori.

²⁰ Dischinger construyó el Zeiss Planetarium de Jena en 1925, primera estructura laminar reconocida y Flügge redactó en 1934 el manual de cálculo y diseño por excelencia para estas estructuras: *Statik und Dynamik der Schalen (Stress in Shell)*.

6.2.2 Aspectos generales de la obra de Ildefonso

Todas las construcciones proyectadas por Sánchez del Río persiguen una aspiración común, que casi se puede decir se convirtió en toda una filosofía para su metodología de diseño: la **constructividad**²¹. La constructividad, en la más extendida de sus definiciones, es la manera en la cual un diseño facilita el uso eficiente de los recursos de construcción y aumenta la facilidad y seguridad de construcción en obra, al tiempo que los requerimientos del cliente son cumplidos. De este modo, la obra de Ildefonso es en sí un llamado a la **eficiencia** y la **economía**, valores claramente heredados de su maestro J. E. Ribera y que, en cierta medida, son coherentes con la situación política en la que se enmarca la carrera de Ildefonso, (sobre todo en los primeros años que formaron su carácter) en los que se sucedieron dos dictaduras militares intercaladas por un periodo de cinco años de mando republicano y una guerra civil de tres años de duración. Había que racionalizar y había que hacerlo en todos los aspectos.

No obstante, el lenguaje poético, la ternura y sentimiento con los que Ildefonso se refiere a sus obras y que se irán descubriendo en la exposición de las mismas, reflejan también el afán por las **formas armoniosas** y estéticas propias más del mundo arquitectónico que del ingenieril. Es lo que sorprende de la doble visión de este ingeniero artista, su capacidad de emplear la creatividad para superar retos ingenieriles desde la mente de un arquitecto, conjugando siempre sus ideales de eficiencia y economía con las inquietudes estéticas que, según él, calmaban su espíritu.

Es de esperar, por tanto, que las técnicas constructivas de este ingeniero estén en armonía con el perfil expuesto previamente. Los factores exigibles en toda obra de Ildefonso son dos: hacer del hormigón armado el material dominante, y una geometría cuyo cálculo estructural resulte aceptable, recurriendo mayoritariamente a soluciones isostáticas.

Así pues, la estructura estándar proyectada por Sánchez del Río estaría conformada por un **esqueleto resistente** de hormigón armado, que bien podría componerse de pilares, vigas y viguetas de gran canto o muy frecuentemente de arcos, pudiendo ser estos articulados o rígidos. Sobre este esqueleto se apoyarían o colgarían las delgadas **láminas** de la cubierta, excepcionalmente fabricadas de fibrocemento²² pero generalmente de hormigón armado, que posteriormente evolucionarían a losas aligeradas con bovedillas de cerámicas patentadas y fabricadas por su empresa Río-Cerámica. Este es el método que Sánchez del Río desarrolló y aplicó desde sus primeras obras y durante los 30 años posteriores, y con el que construyó algunas de sus obras más importantes como el IV Depósito de Aguas de Oviedo o el Mercado cubierto de Pola de Siero.

Allá por los años 50, cuando los retos de **diafanidad** superaban las capacidades de esta técnica de esqueleto resistente con finas cubiertas, Ildefonso comenzó a encaminarse hacia la construcción de **bóvedas onduladas**, empleadas anteriormente por sus coetáneos Luigi Nervi y Eugène Freyssinet. Esta técnica comprende la construcción de arcos autoportantes de perfil parabólico y sección cilíndrica, sucedidos uno tras otro creando la mencionada bóveda arrugada. De este modo el cálculo de la estructura se simplificaba al de uno solo de los arcos, que bien eran arriostrados directamente al suelo o descansaban sobre muros de carga. Para la construcción de estos arcos Ildefonso desarrolló y patentó su excepcional método de las **"dovelas-onda"**, consistente en la fabricación a pie de obra de módulos individuales (dovelas) de composición mixta de hormigón, acero y cerámica, que se hizaban y ensamblaban sucesivamente formando el perfil del arco. Esta metodología fue empleada por Sánchez del Río en numerosas naves que serán comentadas más adelante, pero su máxima expresión la

²¹ Ver el capítulo "El concepto de constructividad" del libro "Constructividad y Arquitectura", 2010, de Mauricio Loyola y Luis Goldsack; Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile.

²² Material compuesto por fibras de refuerzo orgánicas, minerales o sintéticas aglomeradas generalmente con cemento. En aquel momento la fibra más empleada era la de amianto (comunmente uralita), que resultó ser tóxica para los humanos y terminó siendo prohibida en España en diciembre de 2001.

encontramos en la que es sin duda su obra más relevante, el Palacio de los Deportes de Oviedo, proyectado en 1966 y terminado en 1975.

En los próximos apartados se describirán los detalles técnicos de una selección de las obras más relevantes de Sánchez del Río, una buena parte de los cuales se han extraído de los artículos compilados en el libro: "*Ildefonso Sánchez del Río: el ingenio de un legado*" (Fundación Janelo Turriano, 2011), la mayor recopilación y evaluación de su obra arquitectónica existente; y de los diversos artículos publicados por Ildefonso en las revistas divulgativas de la época, principalmente la ROP.

6.2.3 Estructuras y cubiertas nervadas

6.2.3.1 Paraguas

Paraguas concéntricos:

La primera cubierta proyectada y construida por Sánchez del Río en su carrera, durante el cargo como ingeniero municipal de Oviedo fue, en efecto, un paraguas. Ésta fue la original solución que Ildefonso propuso cuando se le fue encargado un diseño de cubierta económica para proteger de las frecuentes lluvias asturianas las instalaciones de los lavaderos comunales, que por aquel entonces eran un requisito sanitario de los barrios urbanos y rurales. De este modo se construyeron con este diseño cuatro cubiertas en diferentes puntos de Oviedo entre los años 1923 y 1925: el lavadero de la Plata, el lavadero de Corredoria, el lavadero de Olloniego y el Paraguas de la Leche.

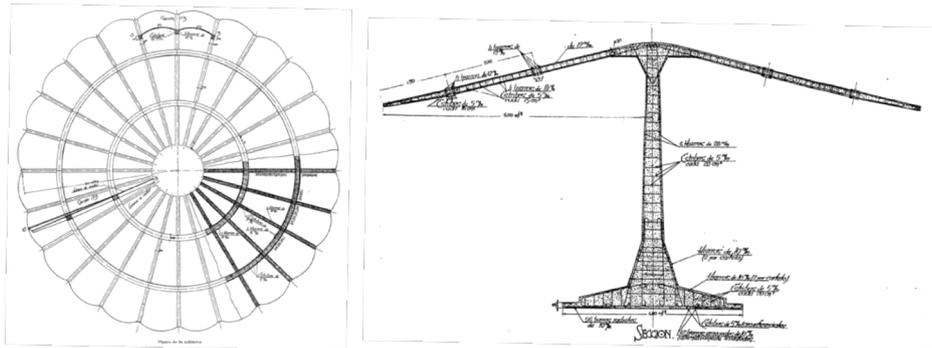


Figuras 37 (a) y (b) Paraguas de la Corredoria y Paraguas de la leche en la actualidad

Si bien estas primeras construcciones no se encuentran entre las más complejas del autor a nivel estructural, calificadas de "pasatiempos" posteriormente por el propio Ildefonso, sí adquieren una cierta relevancia dado que reflejan, por una parte, las bases racionales del método constructivo que Sánchez del Río emplearía a partir de entonces, y por otra parte la capacidad ingeniosa del proyectista para dar soluciones novedosas al tiempo que económicas, dejando su singular firma en forma de una tipología estructural ciertamente icónica.

En cuanto a la planta se refiere, Ildefonso opta por una cubierta circular dado que, en sus propias palabras: "*ninguna razón existe para hacerlos rectangulares, que adolecen de los inconvenientes de la pérdida de espacios en las esquinas*" (Sánchez del Río, 1931). Las cubiertas para los lavaderos eran idénticas entre sí y de un diámetro de 8 metros, mientras que el Paraguas de la Leche, que debe su nombre al puesto de venta de leche que escondía bajo sí y que posteriormente daría nombre a la plaza que lo contiene (Plaza del Paraguas), requería tapar un espacio de 12 metros de diámetro. Ambos modelos se conforman por la conjugación de elementos lineales de hormigón armado, donde las varillas del paraguas toman forma de nervaduras de canto rectas que parten radialmente desde el capitel de transición en ángulos de 15° numerando un total de 24 varillas, que son zunchadas mediante anillos concéntricos, también de hormigón, dotando de rigidez al esqueleto. Esta es la principal diferencia entre ambos modelos, pues los lavaderos, al tener un diámetro menor sólo requieren de un anillo mientras que el Paraguas de la Leche requiere de dos para reducir la longitud de los voladizos. El resto del diseño es idéntico difiriendo sólo en términos de magnitud, por lo que los datos y planos que se muestren a continuación se referirán al Paraguas de la Leche.

Las varillas tienen una sección rectangular 10 cm de ancho y 15 cm de alto constante hasta el segundo anillo, cuando la altura se reduce linealmente hasta alcanzar 8 cm en el extremo. Los anillos son de sección cuadrada constante de 20x20 cm. La cubierta se genera mediante placas curvas de Uralita de 1 cm de espesor y de escaso peso propio que se apoyan y atornillan sobre las varillas de hormigón, quedando el esqueleto estructural en el intradós de la cubierta. Las 4 filas de placas se superponen una sobre otra a modo de tejas, y la forma curvada aporta su porción de rigidez al conjunto. Pese a tratarse de piezas de fabricación especial, la ejecución in situ de estos plementos laminares curvos con hormigón armado, hubiera supuesto un artesanal y laborioso encofrado, que sin duda hubiera restado racionalidad al proceso de construcción del prototipo, y elevado su coste. (Cassinello, 2012).



Figuras 38 (a) y (b) Planos en planta y sección del Paraguas de la Leche

El pilar sobre que descansa la cubierta es de sección hexagonal para facilitar la extensión de las varillas desde el capitel, reduciendo al mismo tiempo el coste que supodría realizar un encofrado cilíndrico con la tecnología de la época. La sección del pilar aumenta ligeramente al disminuir la cota del mismo para resistir mejor los momentos generados por las cargas de viento, culminándose esta misión con los seis contrafuertes que parten de la base del pilar. Estos contrafuertes, que pueden observarse en el plano seccionado, fueron a su vez tapados de hormigón en masa para crear la plataforma sobre la que estaban las lecheras.

Además de la solemne prueba que supone seguir en pie después de casi un siglo (no sin sufrir las pertinentes reparaciones estructurales), al paraguas se le sometió a diferentes pruebas de carga una vez finalizada la construcción. Estas vienen redactadas en el artículo citado de Sánchez del Río (Sánchez del Río, 1931), y básicamente son dos: una prueba de flexión de las varillas que consistía en colgar sacos de 60 y 120 kg de los extremos de las varillas para observar la deformación y recuperación elásticas; y una prueba de torsión del pie realizando un esfuerzo de palanca oscilante aplicado en los extremos de las varillas. Estas pruebas se dieron por válidas dado que, según Ildefonso, dada la localización del paraguas, rodeado de edificios de mediana altura, nunca se podrían originar cargas de viento superiores a las ensayadas.

Paraguas excéntrico:

Otro diseño de paraguas aún más inusual y que se comenta brevemente a continuación es el del quiosco de la música de Ciaño (Langreo, Asturias), realizado en colaboración con el arquitecto Julio Galán. Se trata de una cubierta con forma de concha de peregrino, cuyo único apoyo se sitúa de manera excéntrica y cuya resolución, según Ildefonso, les obligó a emplear "*más horas de cálculo que en otras obras mucho más importantes*".

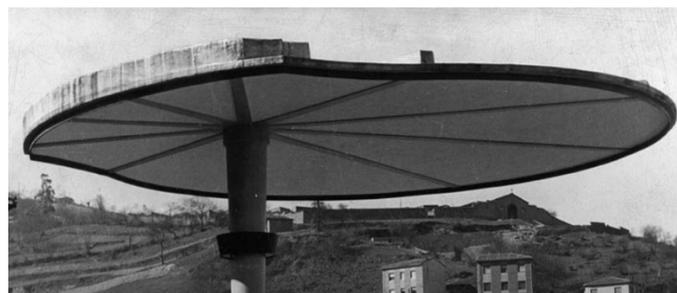


Figura 39 Paraguas excéntrico

La longitud total de la concha es de 9,5 metros, divididos por el pilar de apoyo creando dos vuelos de 7 y 2,5 metros. Contiene un total de diez nervios, dos coincidentes con los voladizos mayores y menores, y ocho distribuidos simétricamente a ambos lados. Para equilibrar las cargas sobre el pilar la zona del voladizo mayor fue aligerada mediante bovedillas de cerámica, siendo el voladizo menor de hormigón armado al que se le colocó además un peso de hormigón en masa en la zona superior, como se puede apreciar en la imagen. Ésta cubierta, en vez de estar apoyada como en los paraguas ya descritos, se encontraba colgada de un anillo de acero fundido posicionado en la cúspide del pilar, del que salen diversos tirantes que se anclan las nervaduras radiales, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen.

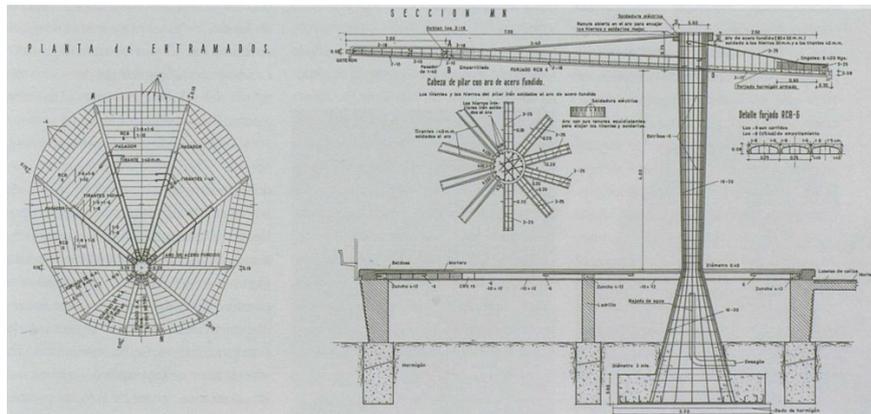


Figura 40 Planos en planta y sección del Paraguas Excéntrico

Paraguas invertidos:

Paradójicamente, la carrera constructiva de Sánchez del Río finalizó de la misma manera que comenzó, proyectando paraguas, pero en esta ocasión vez de muy distinta índole. Se trata de los paraguas para el mercado de ganado de Pola de Siero (1971-972), un conjunto de cuatro cubiertas laminares y curvas donde la forma del paraguas es invertida, descansando cada una de ellas sobre un único pilar cilíndrico.

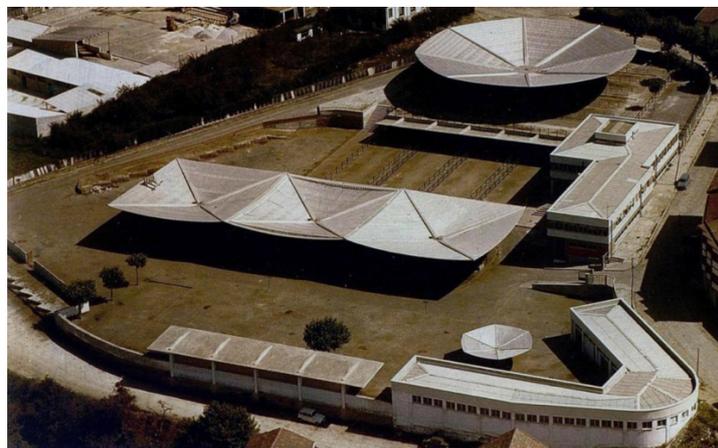


Figura 41 Panorámica del Mercado de Ganado de Pola de Siero, 1972

Tal y como se puede apreciar en la imagen, tres de los paraguas son de planta cuadrada, que pese su emplazamiento no se encuentran apoyados entre ellos si no que alcanzan el equilibrio estructural independientemente, y el otro paraguas mayor es de planta octogonal. Las cubiertas cuadradas tienen 20 metros de lado, mientras que el diámetro del octogonal alcanza los 40 metros, convirtiéndose en el paraguas de hormigón armado más grande del mundo hasta la fecha, por encima de los construidos por Giorgio Baroni en los años 30 y por el famoso constructor de estas estructuras Félix Candela en los años 50 y 60. También se observa en la parte inferior de la imagen un pequeño paraguas hexagonal de 10 metros de diámetro, que sirvió de centro de experimentación para las que serían las primeras cubiertas laminares únicamente de hormigón armado de Ildefonso. Sobre ellas se realizaron dos pruebas de carga, una con una

carga puntual de 500 Kg y otra con una carga distribuida de 70 Kg/m², que concluyeron en un cambio de diseño a una geometría octogonal para rigidizar la estructura.



Figura 42 Pruebas de carga sobre el prototipo hexagonal

Los plementos laminares de la cubierta de tan solo 3,5 cm de espesor se cuelgan sobre una serie de nervaduras de sección cuadrada variable, de 20x20 cm en los extremos y 40x40 cm en el centro para los cuadrados y de 25x25cm en los extremos y 55x55 cm en el centro para el octogonal. En éste último las nervaduras acaban en la cabeza del pilar, de un diámetro de 4 metros frente a los 0,55 metros de diámetro del propio pilar, que tras sus casi 2 metros de longitud termina en su base inferior en una zapata subterránea de diámetro máximo 5,5 metros. En ambos modelos se coloca en el centro del pilar una tubería interior que servirá de desagüe para las aguas de lluvia. Ambas estructuras alcanzan una altura máxima de 6,5 metros.

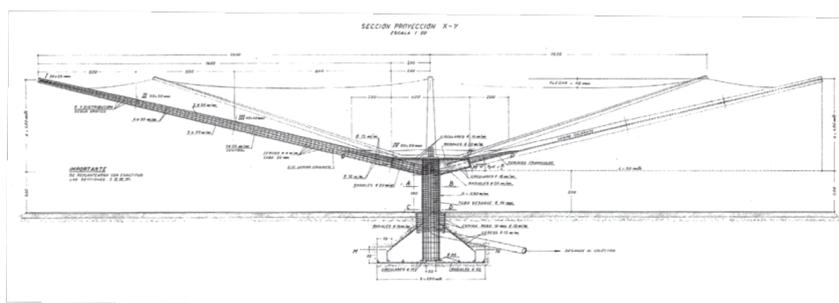


Figura 43 Plano en sección del paraguas octogonal

Ninguno de los paraguas de este conjunto ha resultado tener una vida sencilla. Los paraguas cuadrados fueron demolidos en los años 80 para liberar el espacio que requería la actual estación de autobuses. El paraguas mayor se añadió a las instalaciones de la estación, pero ha tenido que ser reparado en 2 ocasiones (1990 y 2017), habiendo sufrido daños estructurales debidos bien al asentamiento del terreno bajo la zapata o bien a errores en el cálculo de las cargas de viento, y también desprendimientos en el intradós de la cubierta que obligaron a colocar una red protectora.



Figura 44 Ildefonso (izquierda) sobre el Paraguas octogonal de Pola de Siero, 1972

6.2.3.2 Depósitos de Agua

Una de las obras más distintivas y relevantes llevadas a cabo por Sánchez del Río es el IV depósito de aguas de Oviedo (1928), no sólo por el hecho de poseer una geometría excepcionalmente icónica, si no porque precisamente esta geometría lo convertía en la solución constructiva más económica y estructuralmente más resistente de los depósitos hasta la fecha construidos. Dos años antes, en 1926, Sánchez del Río inauguraba el III depósito de Oviedo que fue construido junto al segundo, proyectado por Eugenio Ribera en 1904, y por lo cual decidió respetar la estructura clásica de su maestro: forma rectangular, muros de recinto de gravedad, y cubierta corriente de hormigón armado compuesta de pilares, vigas, viguetas y forjado.

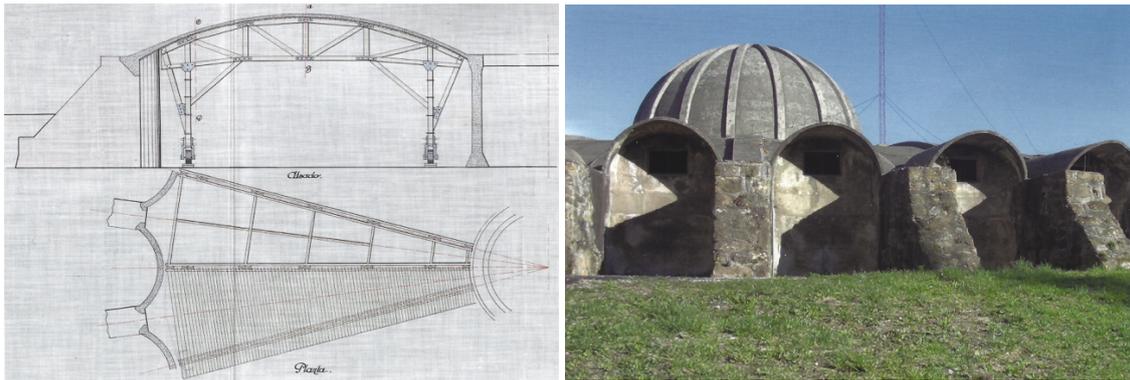
Una vez recibido el encargo del IV depósito y fijada su ubicación en una colina dominante rodeada de protuberancias montañosas, un Sánchez del Río libre de condicionantes comenzó a concebir una estructura que armonizase con todo aquel entorno alpino, y que siendo una obra necesariamente ingenieril y arquitectónica saciara además sus exigencias de economía, constructividad y verdad. El resultado de este proceso fue un depósito de planta circular y forma toroidal sin precedentes, con un presupuesto de 405.000 pesetas, suponiendo un ahorro de 200.000 pesetas frente al presupuestado con la clásica estructura rectangular.



Figuras 45 (a) y (b) IV Depósito de Oviedo en la actualidad; Plano en planta del IV Depósito

La capacidad del depósito alcanza los 10.000 m³, proyectados en una planta circular de 50 metros de diámetro, donde la cámara de llaves se sitúa en el centro de la misma y toma forma cilíndrica con un diámetro de 10 metros, reduciendo a 20 metros el vano a salvar por los arcos radiales. En la parte superior de la cámara, justo debajo de la pequeña cúpula semiesférica que la remata, se sitúa el anillo resistente, clave de la rigidez de la estructura, que trabaja a compresión y que alberga el arranque de los 48 arcos que emanan de él y que descansan en el extremo opuesto sobre contrafuertes de mampostería dispuestos a lo largo del perímetro. Los arcos son de sección rectangular de ancho constante de 60 cm y de altura variable de 20 cm en los arranques y 15 cm en la clave, que se encuentra además articulada por rótulas Mesnager. Éstos siguen la forma del funicular de las cargas que sobre ellos gravitan, siendo su fibra media una parábola de tercer grado, exigiendo únicamente la necesidad de comprobarlos a pandeo mediante un ensayo a escala que realizó en el laboratorio de la Escuela de Caminos.

La cubierta se conforma de una delgada piel de 8 cm de hormigón armado, distribuida en forma de plementos que cubrían los sectores circulares vacíos, de un ancho máximo de 2,7 metros. Estos plementos se colgaban de las nervaduras y se enrasaban interiormente con la mismas, dejándolas visibles en el extradós, con el objetivo de crear un encofrado continuo, para lo cual Ildefonso desarrolló un genuino y eficaz método de cimbra giratoria. Consistía en dos cimbras de madera dispuestas de manera diametralmente opuesta, cubriendo cada una 1/24 de planta total, de manera que los arcos y plementos se encofraban en una duración aproximada de 10 días, construyéndose la estructura completa en 12 operaciones, quedando la cubierta terminada en 4 meses. Tras cada operación bastaba con desacuñar las ruedas de la cimbra y, mediante el esfuerzo de tan sólo 4 hombres, rotar la cimbra hasta el siguiente sector.



Figuras 46 (a) y (b) Cimbra giratoria; Perímetro exterior del IV Depósito

Los huecos que dejan los contrafuertes en los diferentes sectores se taparon con unos tabiques cilíndricos de 15 cm de espesor en la zona superior y 25 cm en la inferior, apoyados en los mismos, dado que esta geometría (la misma que la de la cámara de llaves) permitía absorber perfectamente los empujes generados por el agua del interior. En cada uno de dichos tabiques Ildefonso tuvo la cautela de colocar ventanas abiertas, resguardadas de la lluvia por bovedillas cilíndricas, que no sólo servían para iluminar la cámara, si no que también tenían el objetivo de airear la superficie de agua para evitar que se elevase su temperatura en verano. Con este mismo propósito diseñó la entrada de agua desde el perímetro de la cámara de llaves mediante bocas aplastadas que generan un buen batido de las aguas. Aun así, la cubierta fue diseñada para una sobrecarga de 20 cm de tierra en caso de que fuera necesario mayor aislamiento térmico, que nunca se aplicó.

Esta ingeniosa disposición estructural, de la que Sánchez del Río se muestra tan orgulloso en diferentes escritos para la ROP²³, fue también aplaudida por su maestro Eugenio Ribera que dice en uno de sus artículos:

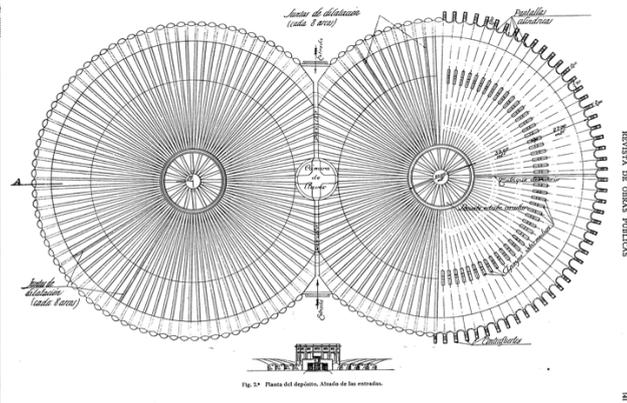
"He proyectado y construido muchos depósitos de agua, pero debo reconocer la superioridad económica, práctica y artística del tipo de depósito de mi discípulo Sánchez del Río sobre cuantas disposiciones se han empleado hasta hoy en el mundo, por lo que estoy seguro se propagará su empleo en cuanto sea más conocido" (Ribera J. E., 1936).

A modo de prueba estructural más allá que de curiosidad, se comenta el bombardeo al que sufrió el depósito en 1936 cuando la ciudad a manos de los sublevados y sufría un duro asedio por los republicanos, que se hicieron con el codicioso emplazamiento del depósito que se convertía en un punto estratégico para la artillería y el suministro de agua. Así, Ildefonso se vio obligado a entregar los planos del depósito a los militares, indicando que lo más importante sería destruir el anillo central que anclaba los 48 arcos. Contra todo pronóstico, el depósito sobrevivió los bombardeos, ante lo que Sánchez del Río confesó posteriormente: *"¿Qué íntima satisfacción no experimentarí yo, al presenciar este claro ejemplo de una disposición constructiva plenamente lograda en sus dos aspectos, ingenieril y arquitectónico, inconvencible a la más terrible prueba a la que puede estar sometida una obra?"* El depósito fue posteriormente restaurado y hoy en día sigue en funcionamiento.

La estructura proyectada por Ildefonso resultó tan exitosa que empleó esta misma tipología en sus cuatro depósitos posteriores, todos de menor capacidad: el depósito de Trubia (1930), Turón (1930), Pola de Siero (1931) y Lugones (1943). También construyó el depósito de Mieres (1930) proyectado con la misma metodología pero de planta semicircular al situarse en mitad de una ladera. Además, Ildefonso proyectó un depósito mucho más ambicioso que se generaba por la sección de dos depósitos circulares de 150 metros de diámetro interior, con anillos cilíndricos interiores de 26 metros de diámetro, de los que partían 98 nervios de cada uno. Este proyecto fue presentado para el concurso del IV Depósito de Aguas de Madrid, del que no resultó ganador pese a partir de un presupuesto un 25% más bajo que el de sus competidores, quizá por ser demasiado "atrevido" para las temerosas mentes madrileñas

²³ Ver los artículos de la ROP: "El cuarto depósito de aguas de Oviedo" de 1928 y "El cuarto depósito de aguas de Oviedo y algunas consideraciones más" de 1931.

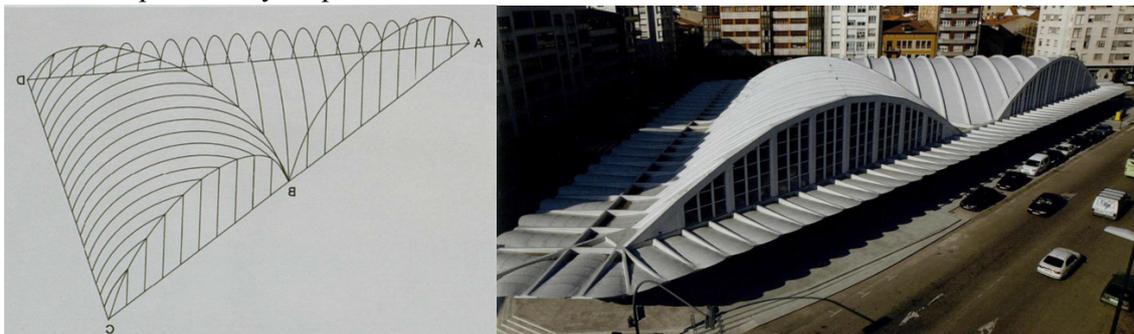
después de lo sucedido en 1905. Para rebatir esta infundada opinión, Sánchez del Río redactó dos artículos para la ROP en los describe detalladamente los cálculos realizados para esta estructura.²⁴



Figuras 47 (a) y (b) Portada de la Revista Oviedo, 1986; Plano en planta del IV depósito de Madrid

6.2.3.3 Mercado de Pola de Siero

El Mercado de Pola de Siero (1930-1931), conocido popularmente como la Plaza Cubierta y asumido como un icono del municipio asturiano, constituye una de las construcciones más singulares de Sánchez del Río debido a la cuanto menos inusual solución geométrica que decide aplicar. El autor justifica dicha elección en base a tres premisas: la planta asignada para el edificio es triangular, lo que descarta directamente muchas de las soluciones tradicionales; el edificio es diseñado para una gran afluencia de personas y mercancías, lo que explica la necesidad de diaphanidad; y presupuesto disponible es muy limitado. Tras desechar dos proyectos basados en la aplicación de grandes pórticos rectos por considerarlos poco económicos, Ildefonso opta por volar la superficie de casi 4.000 metros cuadrados mediante la intersección de dos bóvedas cilíndricas simétricas con directrices paralelas a los catetos (de 70 metros de longitud), que generan una curva de intersección que se proyecta sobre la altura de la hipotenusa. Sobre esta hipotenusa (de 100 metros de longitud) se levanta la gran fachada vertical que intersecta con las bóvedas, en la cual se acomodan amplios lucernarios para el mayor aprovechamiento de la luz natural.



Figuras 48 (a) y (b) Esquema tridimensional del Mercado de Pola; Vista aérea en la actualidad

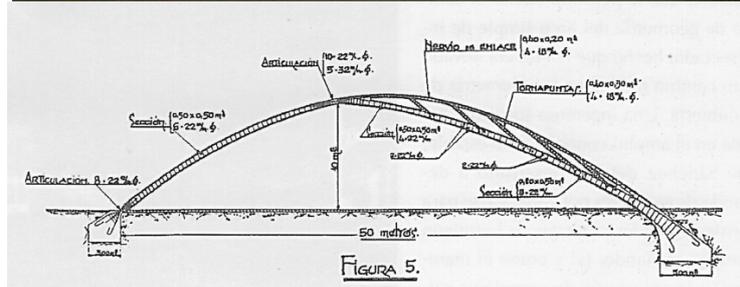
Las bóvedas están proyectadas al estilo Sánchez del Río, conformadas por la sucesión de arcos resistentes de los cuales se cuelgan los finos plementos de hormigón armado de 7 cm de espesor que engendran la cubierta, con el fin de facilitar y abaratar el encofrado continuo en el interior para dejar los nervios en el extradós de la cubierta. Los nervios nacen de las fachadas secundarias de los catetos perpendicularmente a las mismas y, lógicamente, son de vanos variables, dado que algunos acaban en distintos puntos de la curva de intersección y otros se topan con los arcos de la fachada principal para descender verticalmente en forma de pilares rectos, entre los que se encuentran los ventanales.

²⁴ Ver los artículos de la ROP: "El cuarto depósito de aguas de Madrid" volúmenes I y II, de 1930.



Figura 49 Vista interior del mercado desde la intersección de los catetos

El ingenio remanente tras esta estructura, sin duda osada y avanzada para su época, reside en la manera en la que Sánchez del Río canaliza los empujes que generan los nervios de la cubierta hasta los cimientos perimetrales de la estructura, una hazaña que casi le cuesta el abandonar el proyecto. Por una parte, los nervios que intersectan con la fachada principal tienden a volcarla hacia el exterior, ante lo cual Ildefonso decide descomponer el empuje de cada arco en dos componentes: una en la dirección de los arcos de la fachada que encauza fácilmente hacia el punto central de la misma (punto sobre el que descansa toda la estructura); y otra perpendicular a los nervios que transmite hasta el arco central por medio de tirantes ocultos en el forjado de la cubierta, aprovechando las generatrices de la curvatura de ésta. Pero lo aún más sorprendente de la estructura es la manera en que el ingeniero resuelve la problemática que se da en el arco de intersección. Éste se va cargando paulatinamente a medida que los nervios desembocan en él, y no sólo de esfuerzos compresivos, si no que también se generan cargas horizontales, verticales, longitudinales y transversales-horizontales (cuando hay viento). Generar este arco con una sección maciza de hormigón armado hubiera supuesto unas dimensiones inaceptables para la arquitectura modernista del resto de la estructura, así que Sánchez del Río ideó la colocación de un arco biarticulado de doble sección variable, sensiblemente coincidente con el antifunicular de las cargas. El trazado superior coincide con la superficie de la cubierta quedando oculto tras ella, pero el trazado inferior brota desde la cercanía de la clave hasta el apoyo central de la fachada, quedando totalmente a la vista junto con las tornapuntas que comunican ambos trazados. Si bien esta medida no es la más idónea desde el punto de vista arquitectónico, ya que rompe la armonía de las formas cónicas del interior de la cubierta, sí es una ingeniosa y elegante solución ante la problemática de esfuerzos que se le presentaba que le permitió construir su arco con mayor luz hasta la fecha, de 50 metros, longitud nada común en la arquitectura del momento.



Figuras 50 (a) y (b) Arco de doble arista y esquema del mismo

Para concluir se resalta la marquesina que rodea todo el perímetro del edificio, ideada para el emplazamiento los puestos de mercado exteriores, y para resguardar de la lluvia a vendedores y compradores. Se trata de una marquesina compuesta por ménsulas que continúan el trazo de los arcos, de sección de T invertida variable y con voladizos de 6 metros, sobre las cuales Sánchez del Río apoyaría las delgadas placas curvas de Uralita ya empleadas en sus famosos paraguas.



Figura 51 *Marquesina del Mercado de Pola de Siero*

6.2.4 Naves onduladas y bóvedas de grandes luces

El método de dovelas-onda, que ya ha sido ampliamente explicado en el análisis del Palacio de los Deportes, constituye el hito de mayor relevancia que llevó a cabo Sánchez del Río, ya que se trata un método propio, original suyo, que desarrolló durante más de 20 años mediante metodologías más experimentales que teóricas, y que culminó con la construcción de la citada grandiosa estructura de 100 m de luz.

En este apartado se exponen aquellas obras que representan el proceso de crecimiento y perfeccionamiento de esta metodología, hasta llegar a las famosas cubiertas onduladas. Se trata por tanto de obras de menor rango y magnitud que el Palacio de los Deportes, y que explican la evolución de su planteamiento teórico y práctico. También se exponen las primeras obras construidas con la técnica de las dovelas-onda, cuyo fundamento ya ha sido profundamente analizado por lo que se va a proceder simplemente a una breve mención, ilustración y un resumen descriptivo de las mismas.

Previamente a recurrir a la solución de ondular la superficie, Sánchez del Río comenzó a proyectar y levantar cubiertas cuyas luces no sobrepasaron los 25 metros de luz, y que, a diferencia de las construidas hasta la fecha, se basaban en la embutición de los nervios en su propio espesor. Para ello se hacía uso de moldes de cemento que servían de encofrado para el forjado de propia cubierta, solución que también aplicó en forjados para pisos. Se trataba de la misma tipología clásica de nervadura resistente pero con los nervios no visibles, haciéndola más estética, pero que contaba con la ventaja de simplificar el proceso de construcción al disminuir los encofrados. Con esta metodología de moldes de cemento Ildefonso levantó, entre otros, una nave de estructura en pórticos de 22 m de luz para la Fábrica de Anís la Asturiana (1941).

Pronto Sánchez del Río cambiaría los moldes de cemento por sus famosas bovedillas cerámicas, de las que obtuvo más de 120 patentes de procedimientos de fabricación de forjados cerámicos, desarrollados en la empresa que fundó en 1942 para ello: Río-Cerámica. Entre las ventajas de aplicar estas piezas cerámicas se encontraban la ligereza de la estructura, el aislamiento térmico y acústico, y la absorción de esfuerzos tangenciales horizontales dada su excepcional adherencia al hormigón. (Sánchez del Río, 1960).



Figura 52 (a) y (b) *Fabricación de piezas cerámicas en Río-Cerámica; fachada de la Fábrica de Armas de Oviedo*

Probablemente la estructura más representativa de esta metodología sea la Fábrica de Armas de Oviedo (1940), que se compone del conjunto de 3 naves de cubierta inclinada de idéntica luz (25 m) y longitud (75 m) dispuestas de manera colindante en su lado más largo, cubriendo una planta total de 5.200 m². En esta estructura es apreciable la influencia de nuevas corrientes modernistas de la arquitectura de la época.

Este tipo de forjados cerámicos fueron los que Sánchez del Río comenzó a curvar y que implantó en sus primeras naves industriales con cubiertas en bóveda de cañón ondulado, pero de sección recta constante. En numerosas ocasiones tuvo que contrarrestar el empuje mediante tirantes, aunque prefería el empleo de contrafuertes porque de esta manera se percibía mejor la grandiosidad del interior de la estructura. Dos ejemplos destacables de esta metodología parabólica pero de sección recta son la nave de Mersa y la nave de secaderos de Río-Cerámica, ambas con una luz en vano de 33 m y un espesor de 20 cm, contrarrestándose la primera mediante tirantes y la segunda mediante contrafuertes.



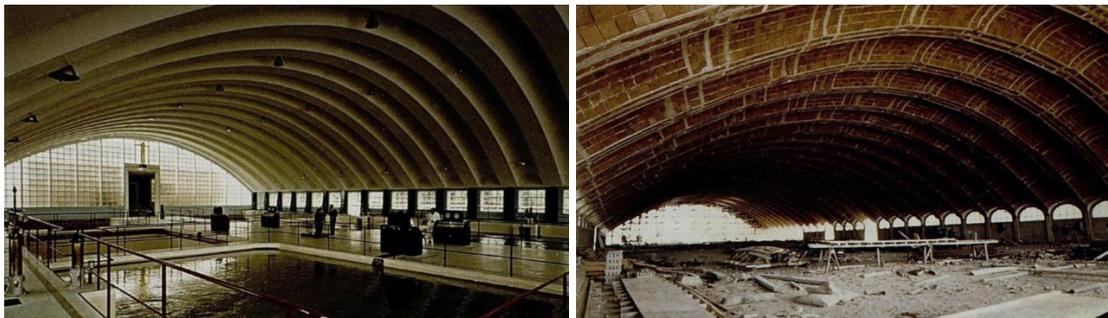
Figuras 53 (a) y (b) Nave Mersa y secaderos de Río-Cerámica

No obstante, Sánchez del Río, cada vez más ansioso por aumentar la luz de sus estructuras, pronto advirtió de que debía modificar esta técnica en vista del riesgo de pandeo que sufrían sus cubiertas. Según expuso más adelante, en 1960:

“La esbeltez de las dos (cubiertas) resulta ya impresionante, y se comprende que con tales espesores se esté cerca del límite del pandeo. En efecto, así es, puesto que corresponde a una luz teórica aproximada de 35 m. Es evidente que aumentando los espesores pueden conseguirse mayores luces, pero es a costa de aumentar los pesos y, entonces, la principal característica de este tipo de bóvedas, que es su ligereza, vendrá seriamente afectada.” (Sánchez del Río, 1960)

Es entonces, a mitad de los años 40, cuando Sánchez del Río, inspirado por otros autores coetáneos como Nervi o Freyssinet, decidió aprovechar los beneficios de introducir en la doble ondulación en sus cubiertas y la resistencia al pandeo que éstas ofrecen. Comienza a desarrollar entonces, el propiamente dicho método de las dóvelas-onda, aunando los conocimientos que expondría públicamente en 1953 en el XXII Congreso de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, y de forma más elaborada y contundente en 1956 en el Congreso Hispano-Luso, cuando ya contaba con alguna estructura levantada en esta metodología. (Revuelta Pol, 2011). Al año siguiente publicaría un artículo divulgativo en la ROP describiendo las investigaciones llevadas a cabo durante la última década y la proyección futura que estaba convencido que tenía esta técnica (Sánchez del Río, La construcción de grandes bóvedas por el sistema de "dóvelas onda", 1957); y en 1960 otro artículo en “Informes de la Construcción” compilando las estructuras construidas y algunos proyectos futuros que tenía en mente (Sánchez del Río, Estructuras Laminadas Cerámicas, 1960).

Así pues, durante los años 50 Sánchez del Río se centró en dar a luz una serie de naves onduladas que demostraran públicamente la eficacia de la técnica que había desarrollado, como la nave Pracesa (1956) de 20 m de luz, las naves Fefasa (1957) de 20 y 30 m de luz, la nave Río Cerámica (1957) o el Almacén de Azúcar en Palencia (1960), ambas de 35 m de luz, entre otras. Fue en 1961 cuando Sánchez del Río proyectó y comenzó a construir el famoso Palacio de los Deportes de Oviedo, dando un salto de magnitudes colosales y consiguiendo el renombre de esta técnica.



Figuras 54 (a) y (b) Naves de Fefasa y Río-Cerámica

6.3 Planos e imágenes del modelo del Palacio de los Deportes

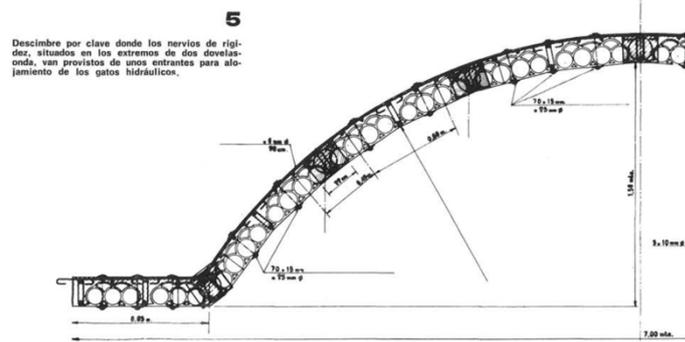


Figura 55 Plano en sección de la dovela onda

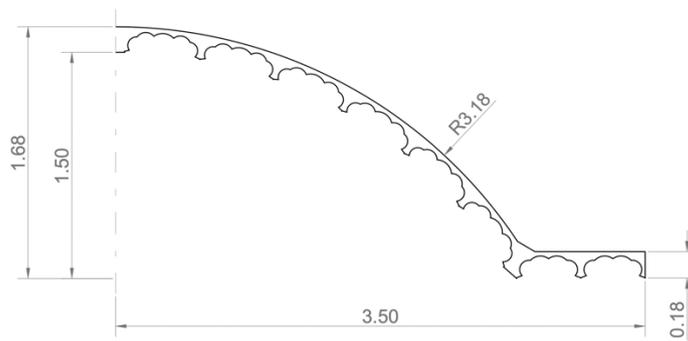


Figura 56 Plano de la sección de la dovela modelada, cotas en m

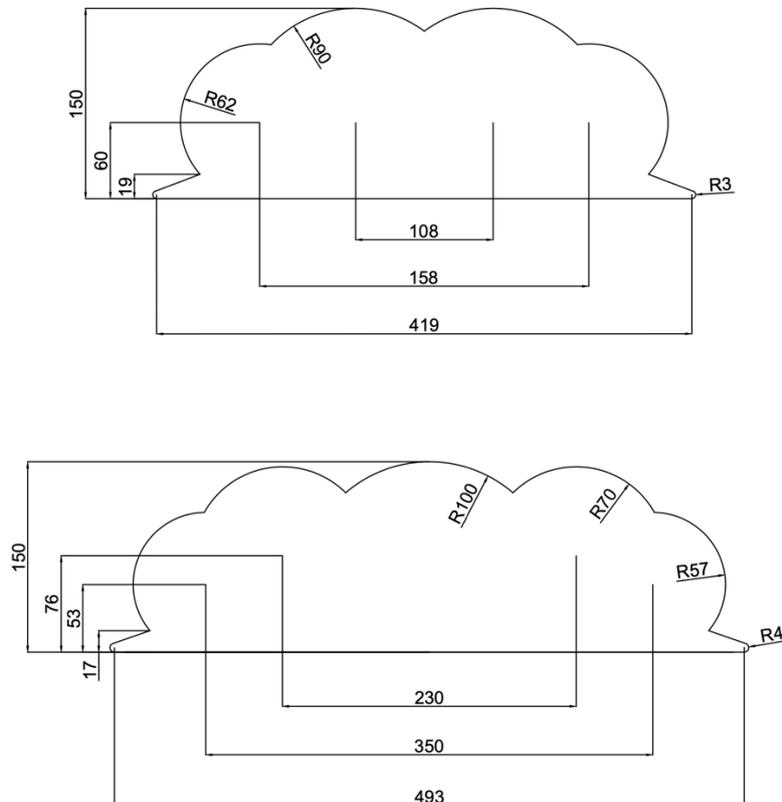


Figura 57 Planos de las bovedillas de la zona curva (arriba) y de la zona plana (abajo), cotas en mm

6.3.1 Modelo A: Arco-Onda Sin Nervios

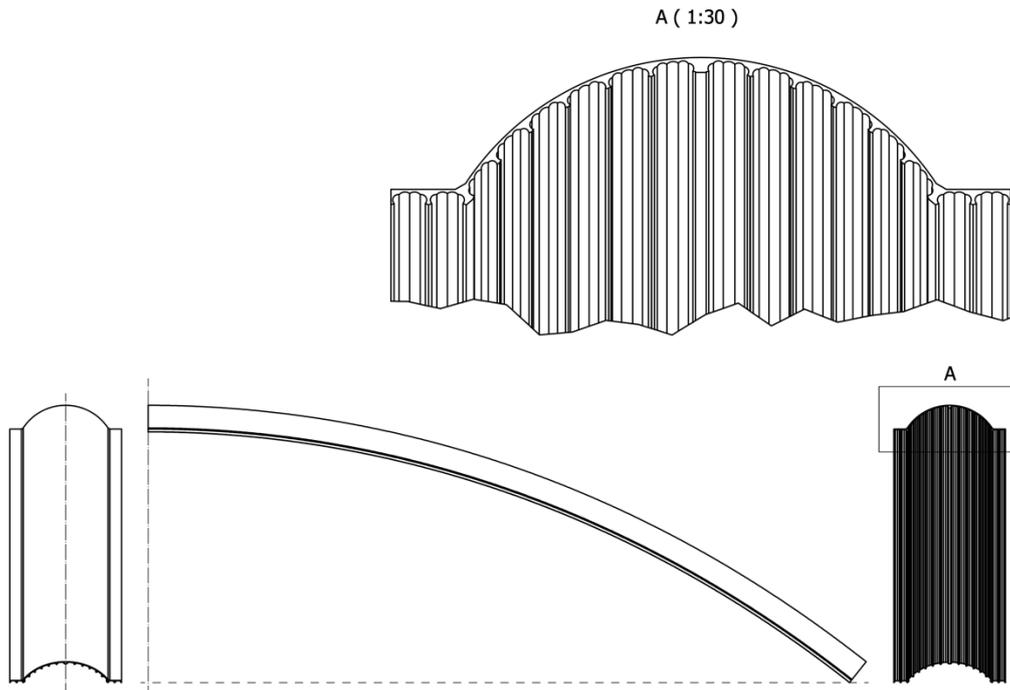
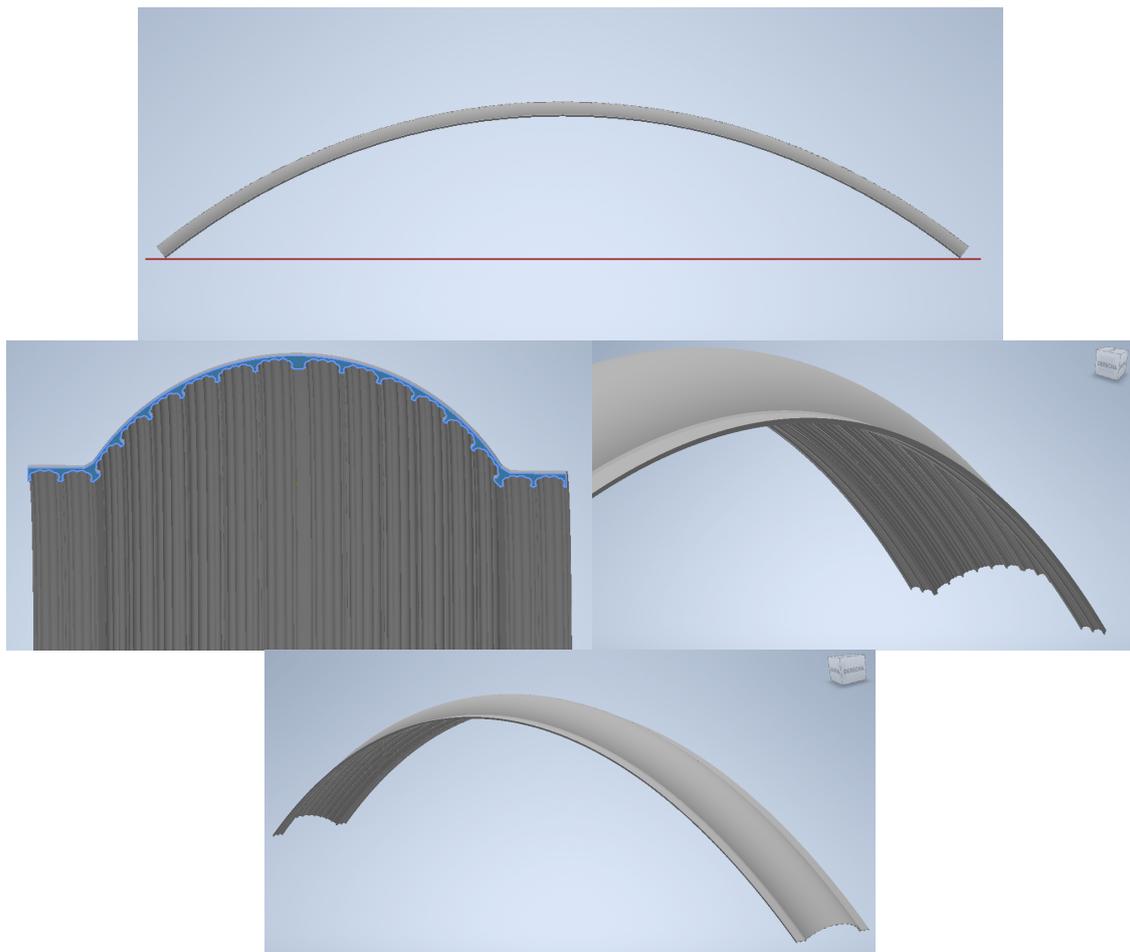
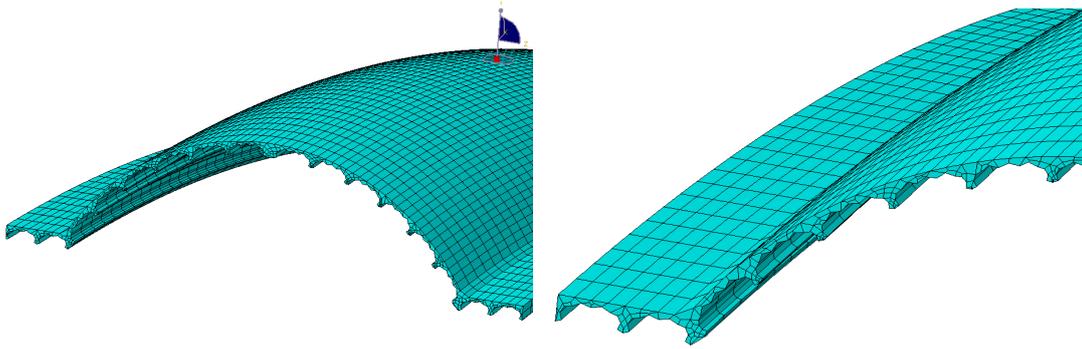


Figura 58 Plano del arco onda sin nervios (modelo A)



Figuras 59 (a), (b), (c) y (d) Geometría del arco sin nervios (modelo A)



Figuras 60 (a) y (b) Detalles de la malla del arco con nervios (modelo A)

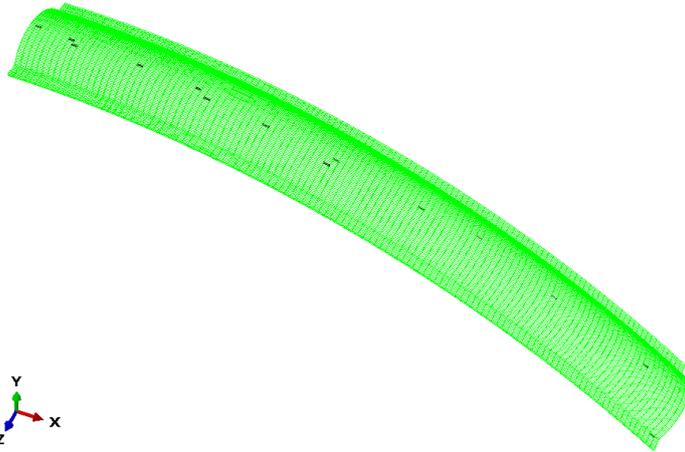


Figura 61 Puntos para el análisis tensional del apartado 2.4.2 (modelo A)

6.3.2 Modelo B: Arco-Onda Con Nervios

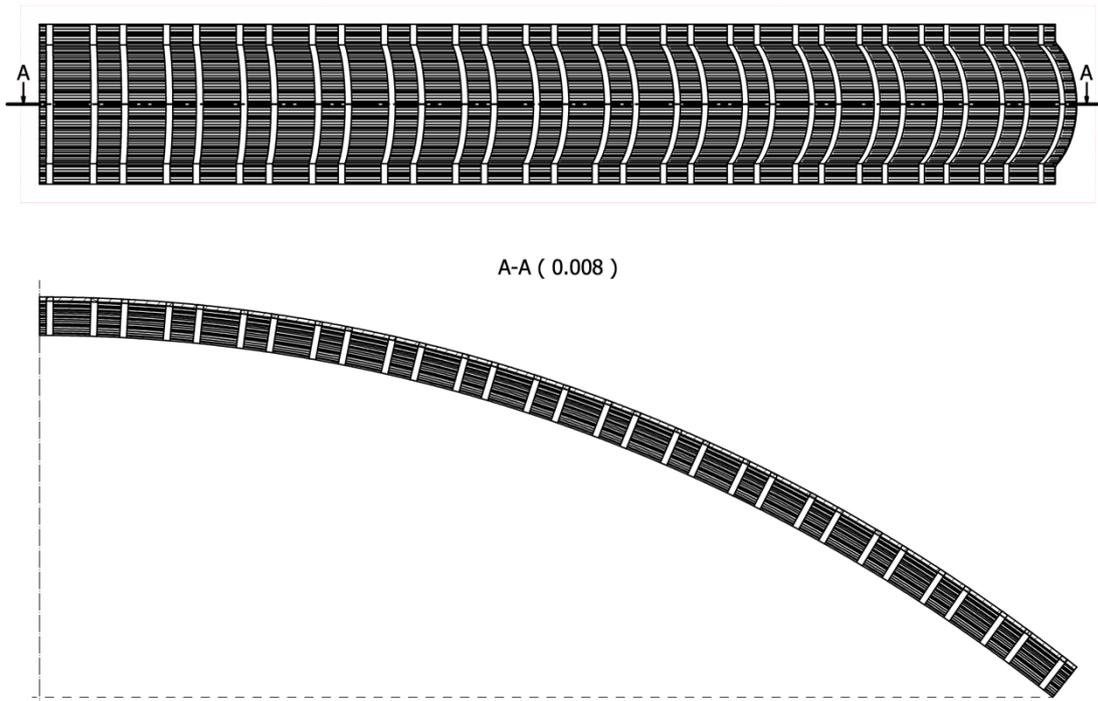
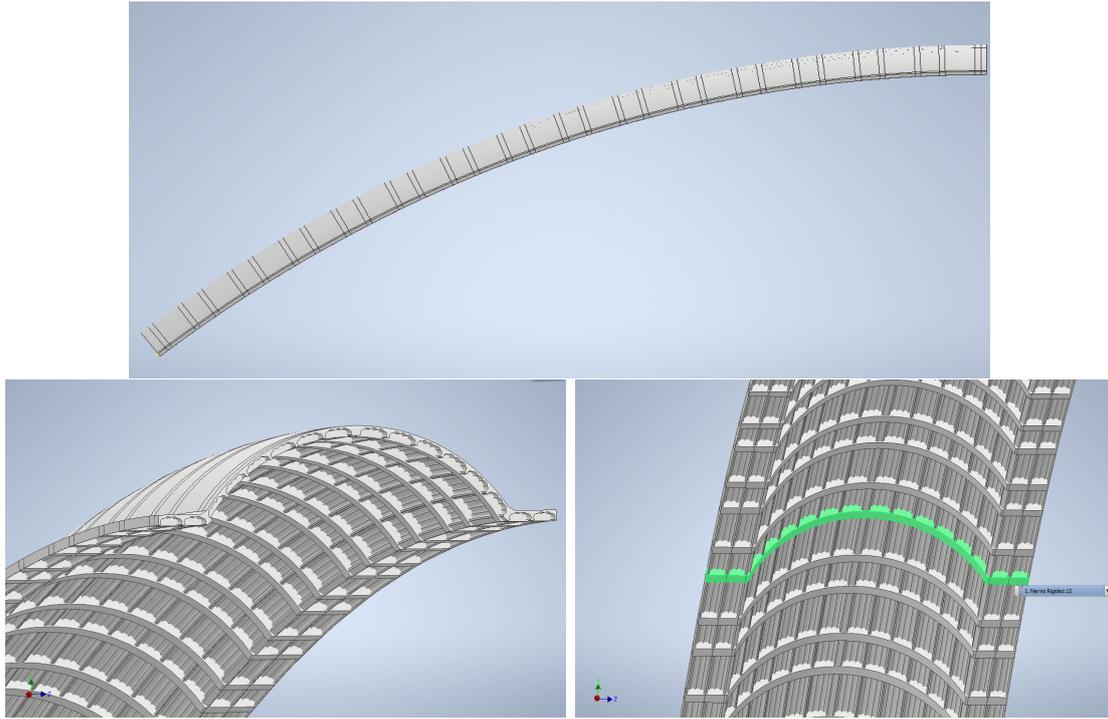


Figura 62 Plano del arco con nervios (modelo B)



Figuras 63 (a), (b) y (c) Geometría del arco con nervios (modelo B)

6.3.3 Modelo C: Dóvela-Onda Sin Nervios

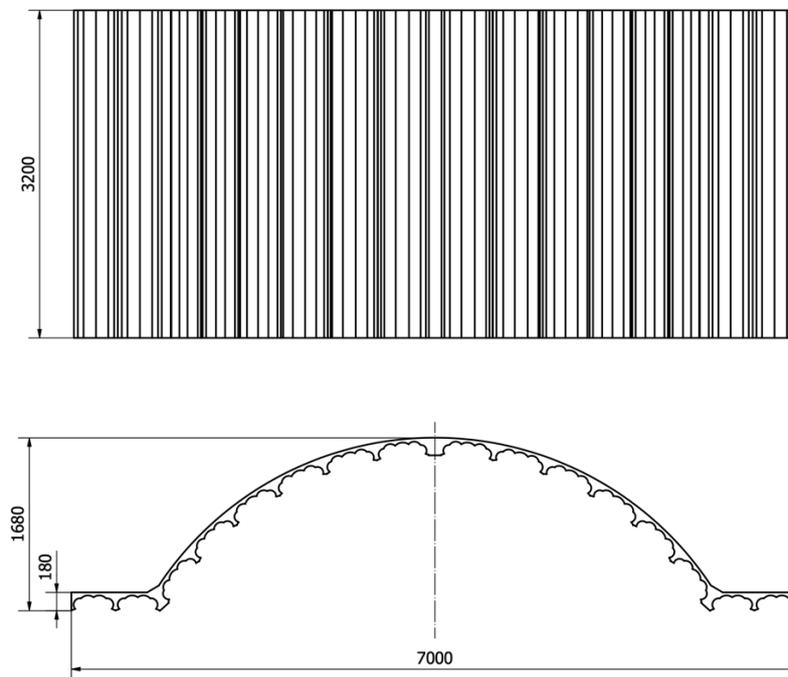
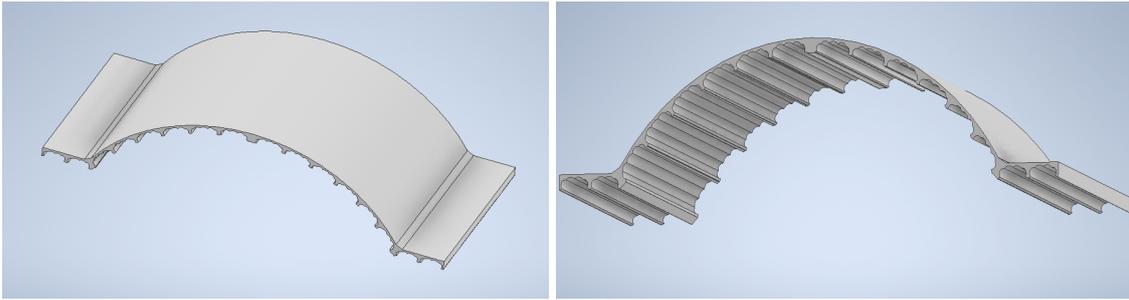


Figura 64 Plano de la dovela sin nervios (modelo C), cotas en mm



Figuras 65 (a) y (b) Geometría de la dovela sin nervios (modelo C)

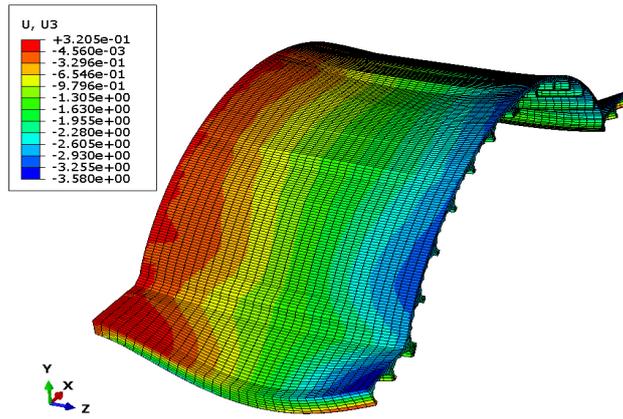
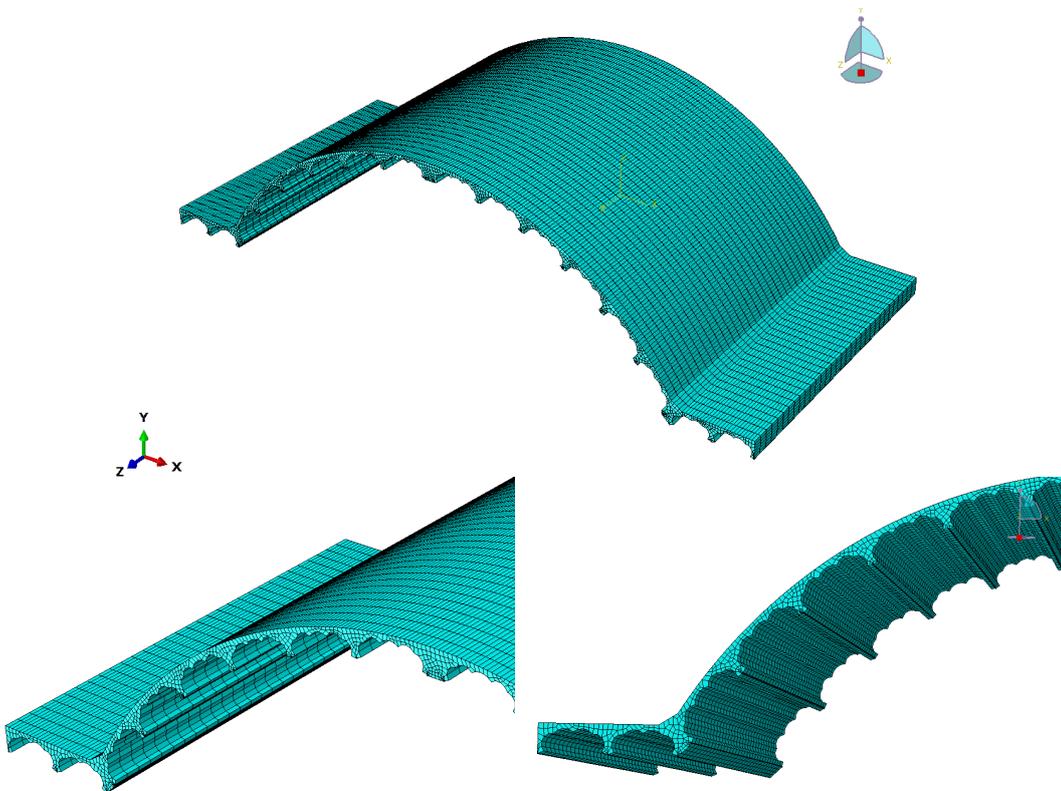


Figura 66 Desplazamientos en Z del modelo C



Figuras 67 (a), (b) y (c) Detalles de la malla de la dovela sin nervios (modelo C)

6.3.4 Modelo D: Dóvela-Onda Con Nervios

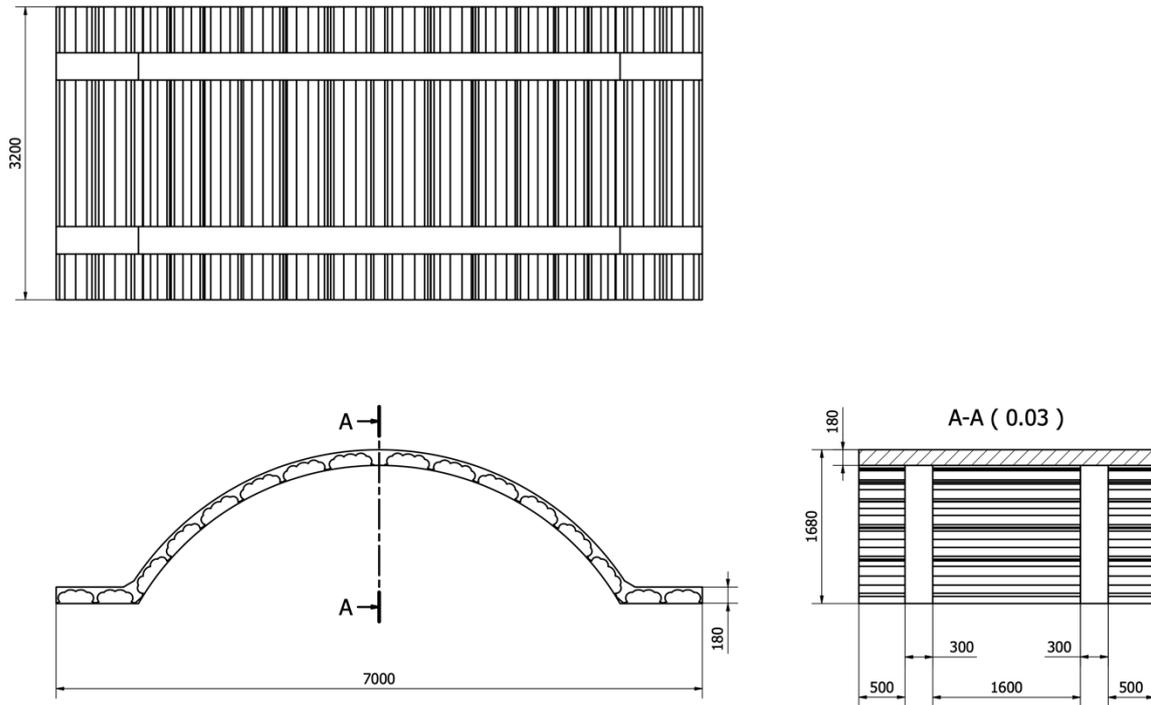
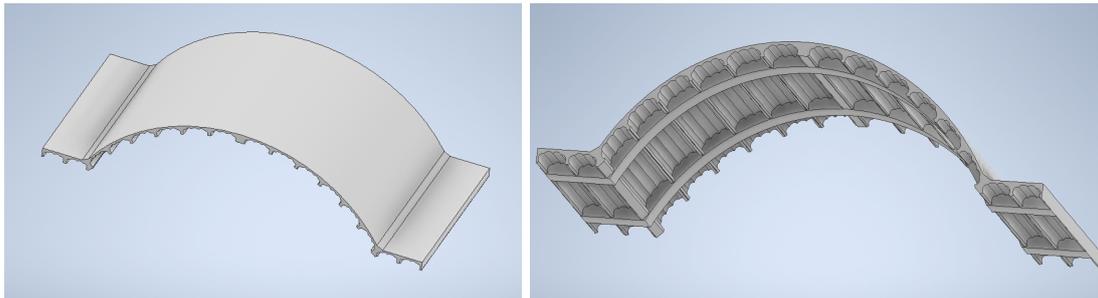


Figura 68 Plano de la dovela con nervios (modelo D), cotas en mm



Figuras 69 (a) y (b) Geometría de la dovela con nervios (modelo D)

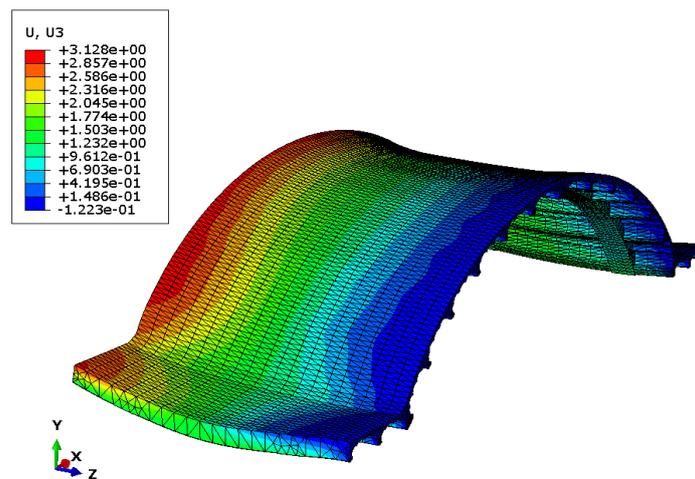
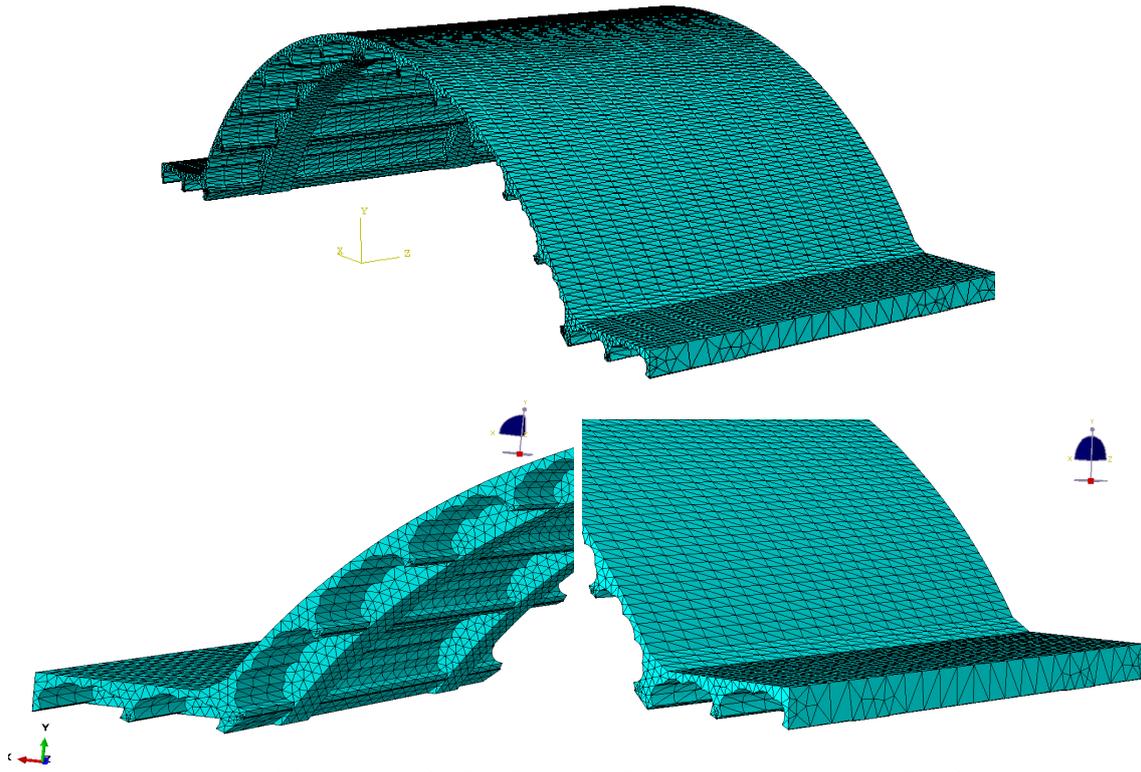


Figura 70 Desplazamientos en Z del modelo D



Figuras 71 (a), (b) y (c) Detalles de la malla de la dovela con nervios (modelo D)

6.4 Planos e imágenes del modelo del Paraguas Octogonal

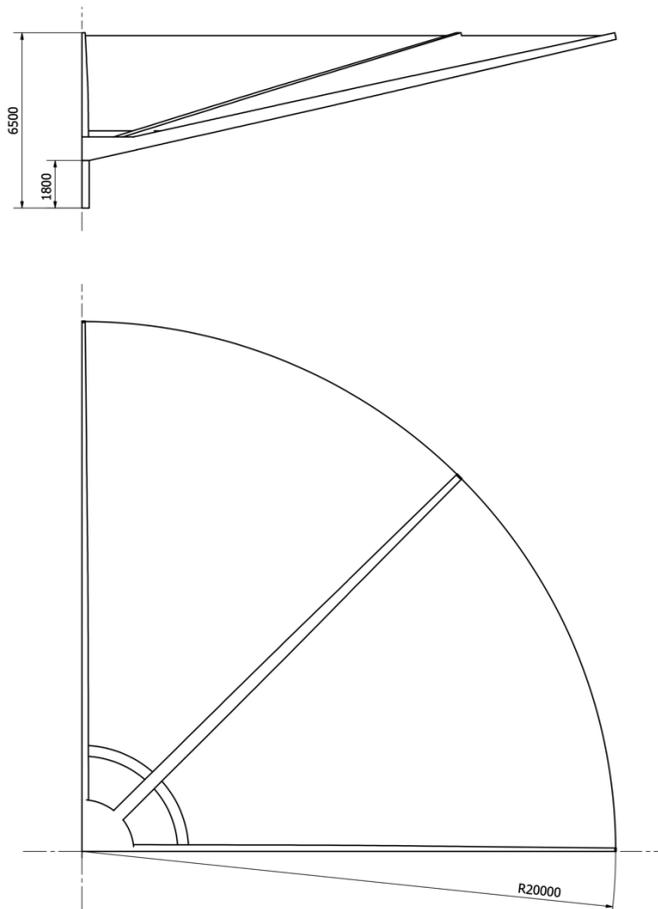


Figura 72 Plano del sector del paraguas octogonal, cotas en mm

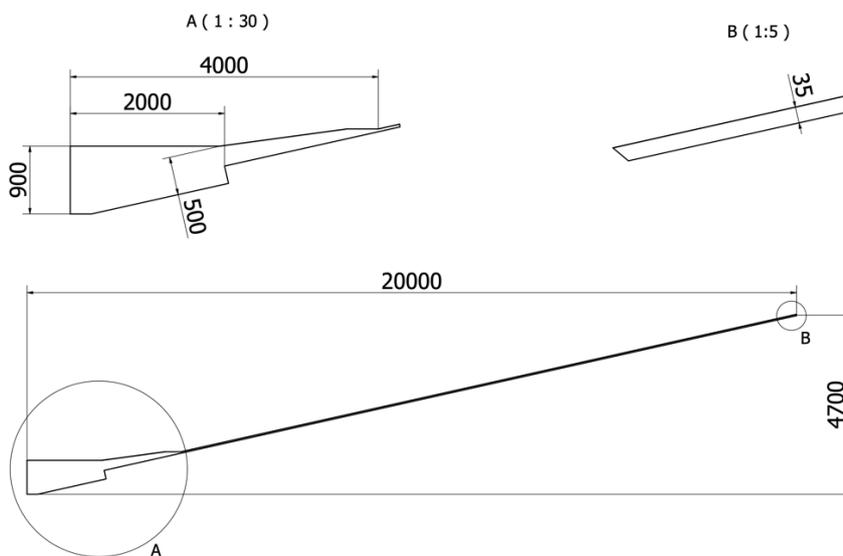
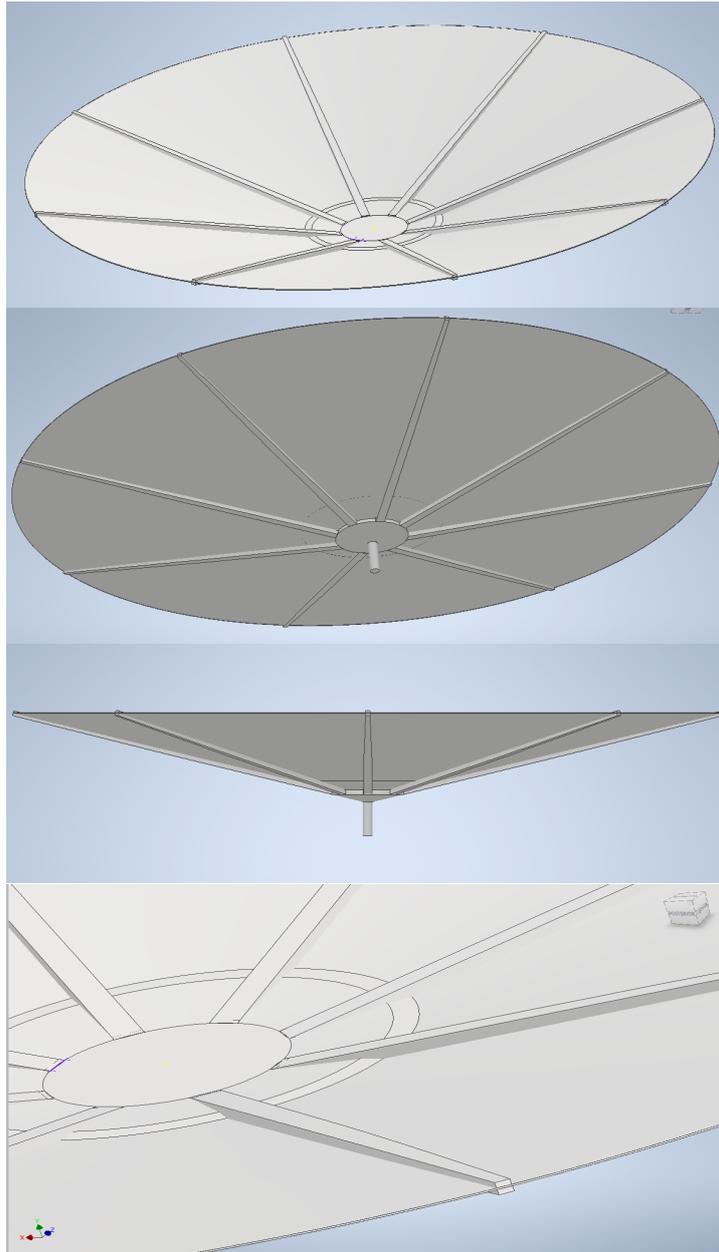
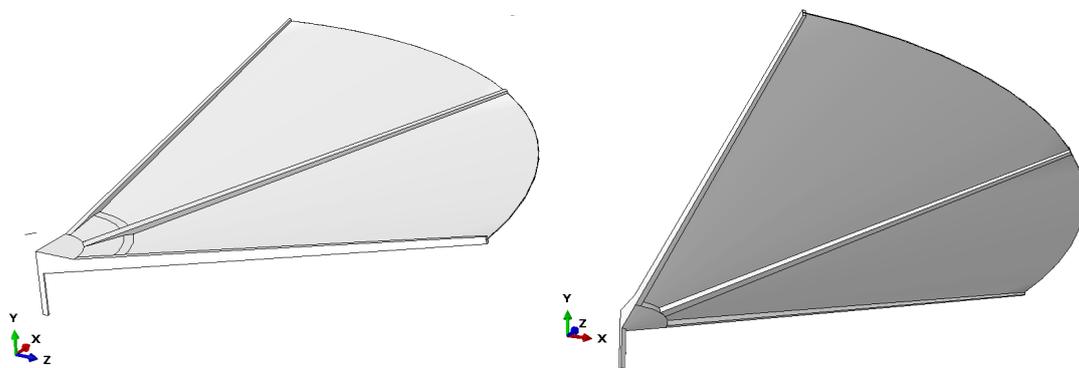


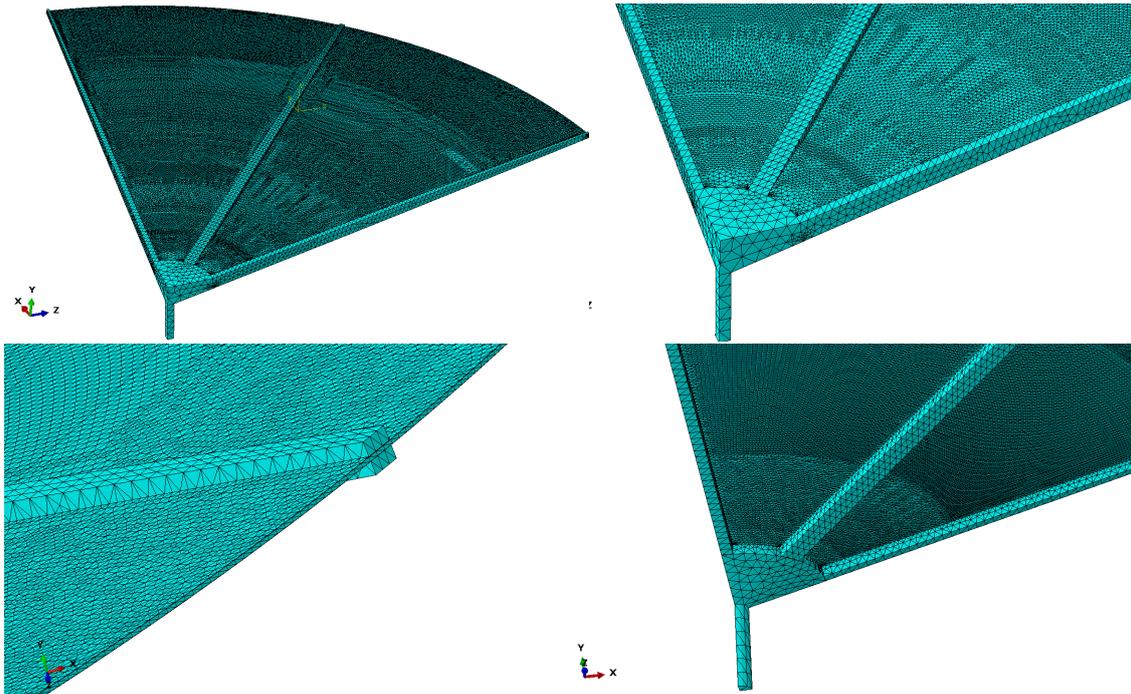
Figura 73 Plano de la sección de revolución del capitel más la lámina, cotas en mm



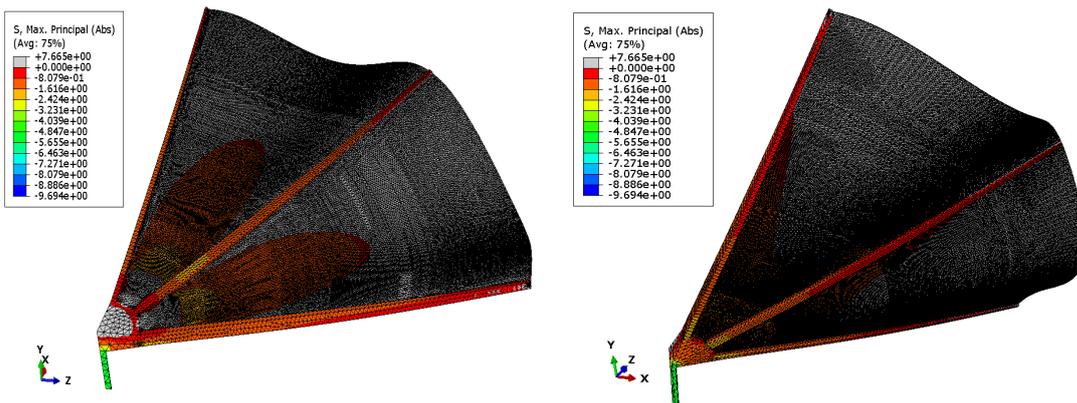
Figuras 74 (a), (b), (c) y (d) *Imágenes de la geometría del modelo de Paraguas Octogonal*



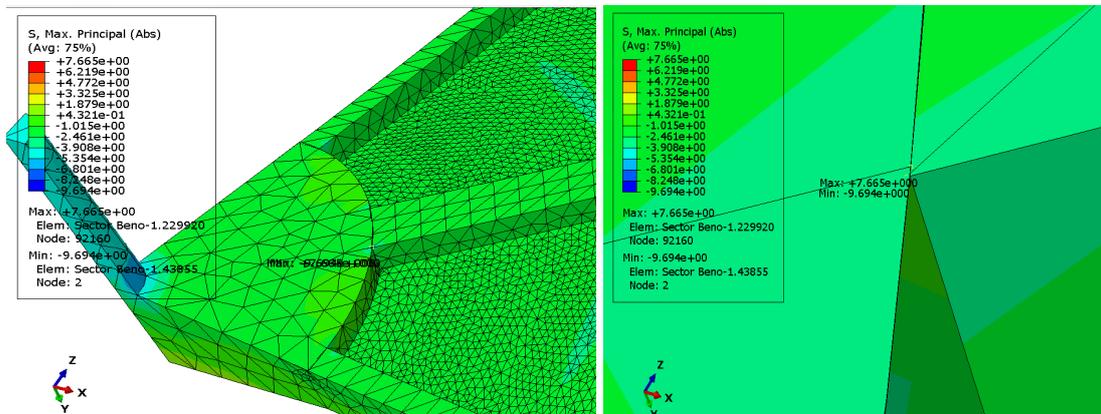
Figuras 75 (a) y (b) *Modelo del sector del Paraguas Octogonal*



Figuras 76 (a), (b), (c) y (d) Detalles de la malla del paraguas octogonal



Figuras 77 (a) y (b) Tensiones máximas absolutas generadas en el paraguas, con malla



Figuras 78 (a) y (b) Puntos de máxima y mínima tensión, error geométrico

6.5 Currículum profesional

1924	Proyecto del puerto de San Esteban de Pravia, en colaboración con García Ovies. Proyecto de ampliación de abastecimiento de aguas de la ciudad de Oviedo.
1925	Paraguas de hormigón para puesto de venta de leche en Oviedo.
1926	Tercer Depósito de Aguas de Oviedo.
1926-1928	IV Depósito de Aguas de Oviedo.
1927-1928	Proyecto de autovía "Príncipe de Asturias", de Oviedo a Gijón.
1928-1930	Depósito de agua para Pola de Siero.
1928-1932	Redacción del Plan de Ensanche de Pola de Siero.
1929	Puente sobre el río Narcea en Soto de los Infantes, Asturias. Puente de hormigón armado de 80 metros de luz sobre el río Nalón, Asturias.
1930	Puente sobre el Narcea en Laneo, Asturias.
1930-1931	Mercado cubierto de Pola de Siero.
1930-1932	Cubierta del Estadio de Buenavista en Oviedo.
1931-1932	Depósitos de agua de Villapendi y La Rebollada, Turón-Mieres.
1932	Proyecto de fábrica para la Firestone Hispania, S.A.
1934	Palomar helicoidal en Oviedo. Proyecto de carretera de Limanes a Tiñana en el concejo de Pola de Siero.
1935	Puente de hormigón armado sobre el río Navelgas (Concejo de Tineo). Reconstrucción tramo del acueducto La Belmontina sobre el río Pigüña, con aplicación de rodillos de fibrocemento en los apoyos.
1940	Naves para fabricación de cañones de la Fábrica de Armas de Oviedo.
1940-1941	Adjudicación del proyecto para la construcción del Dique del Oeste de Palma de Mallorca, y constitución de la sociedad Dragados y Construcciones, S.A., de la que Sánchez del Río es consejero-fundador. Nave para la fábrica de Anís La Asturiana en Oviedo. Tolvas de hormigón armado para mineral de hierro de la Sociedad Duro Felguera.
1941	Reconstrucción del Teatro Campoamor de Oviedo. Arquitectos: Enrique R. Bustelo y Francisco Casariego.
1942	Estructura del edificio de la Caja Asturiana de Previsión Social. Proyecto del arquitecto Joaquín Vaquero Palacios en 1934. Dañado en la guerra y finalizado en 1942. Primera utilización de forjados nervados.
1943	Proyecto de torre de refrigeración de 34 metros de altura para Duro Felguera, S.A.
1944	Estructura del Teatro Filarmónica de Oviedo. Arquitecto: Ramón González Villamil. Proyecto de nave para la fábrica de Anís de la Asturiana en Quintanar de la Orden. Estructura del Edificio Gran Vía, en Madrid. Arquitecto: Germán Álvarez de Sotomayor.
1944-1946	Hangar-taller para el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en Torrejón de Ardoz. Con Carlos Fernández Casado. Arquitecto: Luis Cabrera. Ingenieros colaboradores: Ignacio Vivanco y José Manuel Fernández Oliva.
1950	Puente de Santo Domingo de la Calzada en Haro. Ingeniero: Vicente Roglá Altet.
1955-1956	Nave con cubierta ondulada de 20 metros de luz para PRACESA, en Llanera (Asturias)
1956-1957	Naves con cubiertas onduladas de 20 y 30 metros de luz para FEFASA, en Miranda de Ebro (Burgos).
1957	Nave con cubierta ondulada de 35 metros de luz para Río-Cerámica en Madrid. Anteproyecto de hangar de 40 x 30 metros para la Dirección General de Aeropuertos, por encargo de Constructora Hispánica, S.A. Estudio de nave con bóvedas onduladas de 28 metros de luz para taller de calderería en Oviedo.
1958	Proyecto de nave con bóvedas onduladas de 20 metros de luz para Hijos de Melchor Martínez, León.
1958-1960	Nave con bóvedas onduladas de 25 metros de luz para fábrica de ladrillos refractarios en Viella, Asturias.
1959-1960	Almacenes de pulpa en Carrión (Palencia) y Veguellina (León) para la Sociedad General Azucarera Española, con bóvedas de 35 y 32,5 metros de luz, construidas con dovelas-onda.
1961-1975	Palacio de Deportes de Oviedo. Arquitectos: F. Cavanilles, F. Muñoz Uribe y J. Suárez.
1971-1972	Cubiertas del Mercado de Ganado de Pola de Siero.

Fundación Janelo Turriano, El Ingenio de un Legado

6.6 Listado de patentes propias

1931	Patente nº 122178. 18-marzo-1931. <i>Un nuevo procedimiento de construcción de tubería continua para conducciones forzadas de agua.</i>
	Patente nº 124710. 11-noviembre-1931. <i>Un sistema de amortiguador y estabilizador hidráulico para automóvil.</i>
1935	Patente nº 138249. 30-mayo-1935. <i>Nuevo procedimiento de construcción de pisos de hormigón armado.</i>
	Patente nº 140108. 07-noviembre-1935. <i>Un nuevo procedimiento de construcción de pisos huecos de hormigón armado.</i>
1936	Patente nº 141905. 8-abril-1936. <i>Mejoras en el objeto de la patente principal nº 140108.</i>
1940	Patente nº 149931. 11-julio-1940. <i>Un nuevo procedimiento de entibación en las galerías de minas, mediante el empleo de formas especiales de hormigón armado.</i>
	Patente nº 146444. 3-octubre-1940. <i>Memoria descriptiva del segundo certificado de adición solicitado a favor de D. Ildefonso Sánchez del Río Pisón, de Oviedo, por "mejoras" en el objeto de la patente principal nº 140108.</i>
	Proyecto del Servicio Municipal de Transportes de Mieres.
1944	Patente nº 166304. 30-mayo-1944 <i>Procedimiento perfeccionado para la construcción de forjados nervados de hormigón armado, aplicable a toda clase de pisos y bóvedas.</i>
1951	Patente nº 196177. 18-enero-1951. <i>Nuevo procedimiento perfeccionado para la construcción de forjados de hormigón armado.</i>
	Patente nº 200749. 03-diciembre-1951. <i>Nuevo procedimiento de encofrado rápido para la construcción de forjados planos y curvos de hormigón armado.</i>
1952	Patente nº 203956. 11-junio-1952. <i>Nuevo procedimiento para la fabricación de grandes piezas para la construcción de forjados de pisos y cubiertas.</i>
1954	Patente nº 216670. 23-julio-1954. <i>Nuevo procedimiento de construcción de bóvedas de hormigón armado.</i>
1956	Patente nº 226097. 14-enero-1956. <i>Nuevo procedimiento de construcción de superficies onduladas de hormigón armado.</i>
1958	Patente nº 245897. 11-diciembre-1958. <i>Nuevo procedimiento de construcción de forjados de pisos.</i>
	Patente nº 246268. 29-diciembre-1958. <i>Nuevo sistema perfeccionado de construcción de forjados de pisos.</i>
1961	Patente nº 266782. 21-abril-1961. <i>Sistema perfeccionado de construcción de forjados de hormigón.</i>
1967	Patente nº 338282. 21-marzo-1967. <i>Procedimiento perfeccionado para la construcción de forjados de hormigón normal y pretensado.</i>

Fundación Janelo Turriano, El Ingenio de un Legado