



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Análisis y simulación computacional de la obra de
Eladio Dieste
La Iglesia de Cristo Obrero en Atlántida

Autor

Pedro Chamarro Pellejero

Director

Elías Cueto Prendes

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

AGRADECIMIENTO

Gracias Don Eladio, por enseñarme desde la distancia, que la ingeniería debe estar al servicio de la sociedad, de sus necesidades y por animarnos a encontrar la funcionalidad bella.

PROLOGO

Desde el inicio de los tiempos, los seres humanos han evolucionado satisfaciendo sus necesidades. Al principio, las básicas, más adelante, algunos soñaban con logros que sus descendientes iban cumpliendo. Se encontró el fuego, se inventó la imprenta, se dio la vuelta al mundo, sobrevolamos la tierra más rápido que el sonido, y pronto, alguien posará una bandera en el planeta Marte. Mucha ingeniería acumulada. La ciencia y la tecnología están al servicio de la sociedad y se apoyan continuamente una en la otra para aportar soluciones a todas nuestras necesidades. El error principal que no debemos cometer es olvidar los capítulos anteriores a medida que leemos los siguientes. Qué satisfacción redescubrir que con las herramientas y los materiales de nuestros abuelos y el conocimiento actual se puede seguir generando riqueza, con responsabilidad social, manteniendo o incluso mejorando el medioambiente y siendo más felices.

No en vano, los principales nichos de negocio aún residen en las necesidades básicas de la sociedad, subsistencia, relación social y protección, empresas de semillas, distribución de alimentos, materias primas energéticas, sistemas de salud, farmacéuticas y constructoras.

Eladio Dieste entendió ese proceso, vivió feliz, construyó con arcilla cocida, acero y su genialidad le permitió diseñar bóvedas de luces increíbles, soñadas, funcionales, baratas, integradoras y bellas. Hoy, con las técnicas computacionales, conseguimos validar esos diseños con más o menos fortuna. A mediados del siglo XX, nuestro genio, fue capaz de validarlos con el uso de matemáticas, experiencia y constancia.

Con humildad, desde la tierra, hasta el cielo.

“(...) La arquitectura así entendida es poesía; se dice que no todos somos capaces de hacerla, pero todos la necesitan (...)”

-Eladio Dieste

ELADIO DIESTE Y LA CERÁMICA ESTRUCTURAL EN URUGUAY

(Antonio J. Mas Guindal, Josep M^a Adell, Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 496, marzo-abril 2005)

PALABRAS CLAVE

Eladio Dieste

Cerámica armada

Construcción sin pilares

La iglesia de la Atlántida

Ensayo por método de elementos finitos

Bóveda de doble curvatura

Modelado estructural

METODOLOGÍA

Para realizar el trabajo que se resume en la presente memoria se ha recabado, ordenado y analizado toda la información disponible sobre la figura de Eladio Dieste y su obra. Se han utilizado los esquemas publicados de la Iglesia de Cristo Obrero en la ciudad uruguaya de Atlántida, como punto de partida para generar un modelo tridimensional e incluirlo en un programa de cálculo.

Se han planteado ensayos estructurales y se han analizado los resultados con el objetivo de dimensionar la armadura de acero que sería necesario incorporar para resistir, sobre todo, los esfuerzos axiales, tal y como dispuso el equipo de Eladio Dieste, poniendo en valor al genial ingeniero.

Estas conclusiones computacionales se han comparado rigurosamente con la metodología de trabajo que aparece en la información recogida durante la ejecución de la obra real, por la empresa de Dieste y Montañez.

La bibliografía recoge todas las publicaciones utilizadas, así como medios audiovisuales: vídeos, documentales, fotografías en artículos técnicos y entrevistas.

El programa de diseño utilizado ha sido TopSOLID, y el software de ensayos por elementos finitos: ANSYS.

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

En las siguientes páginas encontrará tres áreas diferenciadas:

- Una descripción técnica del proceso de modelado de esta edificación y el diseño de su ensayo computacional por elementos finitos
- El análisis de los resultados obtenidos del ensayo computacional y una comparación del proceso de diseño original, de mediados del siglo XX con el análisis realizado durante este trabajo, poniendo en valor los avances en cálculo diferencial y elementos finitos del tercer cuarto del siglo XX.
- Y finalmente, unos anexos con un resumen de la biografía de Eladio Dieste y su obra, incluyendo el contexto sociocultural, y un capítulo específico a la Iglesia de Cristo Obrero en Atlántida (Uruguay).

Concluyendo que Eladio Dieste y su equipo, pudieron adelantarse a su tiempo.

RESUMEN

Eladio Dieste (Artigas, UY, 1917 – Montevideo, UY, 2000), hijo de inmigrantes españoles en Uruguay, de carácter sólido y austero, destacó por ejecutar obras arquitectónicas en América del Sur y España. Ingeniero desde 1943, en 1952 diseña y en 1960 construye su obra más singular con cerámica armada: La Iglesia de Cristo Obrero, candidata a formar parte del patrimonio de la humanidad. A través del empirismo y el rigor científico del sistema constructivo, realiza una obra arquitectónica lejos de los avances tecnológicos del mundo desarrollado. El análisis de su figura y de su característica obra es el punto de partida para generar tridimensionalmente un modelo geométrico que contenga con detalle la sinuosidad de sus muros laterales y cubierta.

El modelado se realiza con el programa paramétrico de diseño TopSOLID. Con objeto de analizar la estructura, se diseña un ensayo por elementos finitos para aplicar cargas, evaluar esfuerzos y desplazamientos y tensiones principales con el programa ANSYS. Los resultados son expuestos asépticamente como uno de los objetivos de este trabajo.

La interpretación de los resultados se realiza con el privilegio de poder comprobar la obra ejecutada y “en pié” desde 1960, y con la información que fue quedando archivada de su proceso de construcción.

La conclusión de este trabajo permite poner en valor la técnica de la cerámica armada, exponer sus cualidades como material de construcción actual, recordar la figura de su máximo exponente, Eladio Dieste, y poner de manifiesto la evolución en las técnicas de cálculo.

ABSTRACT

Eladio Dieste (Artigas, UY, 1917 - Montevideo, UY, 2000), son of Spanish immigrants in Uruguay, strong and austere character, noted for performing architectural works in South America and Spain.

Graduated engineer since 1943, designs and builds his most unique work with armed ceramics: The Church of Christ Worker in 1960. This building is candidate to become part of the heritage of humanity.

Through empiricism and scientific construction system, he realizes an architectural work far from the technological advances of the developed world.

The analysis of his live and his characteristic work is the launching point to create 3D geometric model that contains in detail the sinuosity of its side walls and roof.

TopSOLID is used as parametric design program to model. In order to analyze the structure, a finite element test is designed to apply loads, evaluate stresses and displacements. We have done this with the ANSYS program.

The results are listed as one of the objectives of this work. The interpretation of the results is done with the privilege of being able to verify the work executed since 1960, and with the information that was being archived of its construction process. The conclusion of this work allows elevate the technique of the armed ceramics, to expose its qualities as material of current construction, to remember the figure of its maximum exponent, Eladio Dieste, and to show the evolution in the techniques of calculation.

SUMARIO

Índice de figuras.....	vii
Índice de planos.....	vii
Índice de tablas.....	vii
Índice de ecuaciones.....	vii
Índice de imágenes.....	vii
1.Introducción	
Motivación.....	2
Objetivos.....	2
Planteamiento y antecedentes.....	3
Estado del arte (trabajos recientes previos), antecedentes.....	3
Aportaciones.....	3
2.Planteamiento teórico	
Modelización de la estructura.....	5
Modelización del material: cerámica armada.....	13
Herramienta cálculo ANSYS.....	13
Descripción del ensayo.....	15
3.Análisis de resultados	
Limitaciones en la metodología.....	19
Resultados de los ensayos FEM.....	20
Evaluación e interpretación de resultados.....	22
4.Conclusiones y líneas futuras	
Conclusiones / Conclusions.....	27
Líneas futuras.....	27
ANEXO 1. Eladio Dieste	
Uruguay.....	29
Ingeniero, arquitecto y creador.....	29
ANEXO 2. La obra de Eladio Dieste	
Eladio y la cerámica armada.....	35
Eladio y los elementos finitos.....	37
La iglesia de Cristo Obrero en Atlántida.....	38
Referencias.....	42
Bibliografía.....	42

Índice de figuras

<i>Figura 01: Ondulación parametrizada de los muros laterales (Propia del TFG)</i>	7
<i>Figura 02: Croquis de los muros laterales (Propia del TFG)</i>	8
<i>Figura 03: Superficie y volumen de los muros laterales (Propia del TFG)</i>	8
<i>Figura 04: Volumen de los muros laterales (Propia del TFG)</i>	8
<i>Figura 05: Ondulación parametrizada de la cubierta (Propia del TFG)</i>	8
<i>Figura 06: Croquis de la cubierta (Propia del TFG)</i>	9
<i>Figura 07: Superficie de la cubierta (Propia del TFG)</i>	9
<i>Figura 08: Volumen de la cubierta (Propia del TFG)</i>	9
<i>Figura 09: Simetría de la nave (Propia del TFG)</i>	9
<i>Figura 10: Vista en planta del modelo (Propia del TFG)</i>	9
<i>Figura 11: Vista en perfil del modelo (Propia del TFG)</i>	9
<i>Figura 12: Vista en alzado del modelo (Propia del TFG)</i>	9
<i>Figura 13. Volumen de los muros interiores (Propia del TFG)</i>	10
<i>Figura 14. Volumen de la nave (Propia del TFG)</i>	10
<i>Figura 15. Volumen del campanario (Propias del TFG)</i>	10
<i>Figura 16. Modelo del complejo (Propias del TFG)</i>	10
<i>Figura 17. Importar geometría en ANSYS (Propia del TFG)</i>	15
<i>Figura 18. Mallado de la geometría (Propia del TFG)</i>	15
<i>Figura 19. Empotramiento de la cimentación (Propia del TFG)</i>	16
<i>Figura 20. Cargas exteriores (Propia del TFG)</i>	17
<i>Figura 21. Reacciones en los apoyos (Propia del TFG)</i>	20
<i>Figura 22. Desplazamientos máximos (Propia del TFG)</i>	20
<i>Figura 23. Tensión máxima equivalente (Propia del TFG)</i>	21
<i>Figura 24. Vector de tensiones principales (Propia del TFG)</i>	21
<i>Figura 25. Detalle vector de tensiones principales en cubierta (Propia del TFG)</i>	21
<i>Figura 26. Vector de tensiones principales en forma de óvalos (Propia del TFG)</i>	23
<i>Figura 27. Vector de tensiones principales en muros laterales (Propia del TFG)</i>	23
<i>Figura 28. Vector de tensiones principales en campanario (Propia del TFG)</i>	24

Índice de planos

<i>Plano 01: Nave con muros laterales (Propio del TFG)</i>	11
<i>Plano 02. Modelo de la Iglesia del Cristo Obrero (Propio del TFG)</i>	11
<i>Plano 03. Alzado de la Iglesia del Cristo Obrero (Propio del TFG)</i>	12
<i>Plano 04. Alzado según Dieste [3]</i>	12, 40
<i>Plano 05. Perfil del modelo (Propio del TFG)</i>	12
<i>Plano 06. Perfil según Dieste [3]</i>	12, 40
<i>Plano 08. Planta según Dieste [3]</i>	39

Índice de tablas

<i>Tabla 01. Datos de partida para el modelado de la arcilla ([8])</i>	13
<i>Tabla 02. Datos de partida para el cálculo de peso propio ([5] y propia del TFG)</i>	16
<i>Tabla 03. Determinación de cargas por peso propio (Propia del TFG)</i>	16
<i>Tabla 04. Capacidad mecánica en KN según el número de barras de acero B 400 S [10]</i>	22

Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 01. Determinación de cargas por viento (Norma 50:1984)</i>	17
--	----

Índice de imágenes

<i>Imagen 01. Panorámica de la Iglesia de Atlántida. Imagen extraída de wikiarquitectura</i>	2
<i>Imagen 02. Construcción de la cubierta ondulada con las piezas en retícula y el armado homogéneo ([02])</i>	24
<i>Imagen 03. Construcción de la cubierta ondulada con las piezas en retícula y el armado homogéneo ([02])</i>	24
<i>Imagen 04. Inicio de Obras. Imagen extraídas del archivo Dieste & Montañez.[02]</i>	24
<i>Imagen 05. Inicio de Obras. Imágen extraídas del archivo Dieste & Montañez.[02]</i>	24
<i>Imagen 06. Eladio Dieste frente a la Iglesia de Cristo Obrero en construcción, a fines de 1959. Fotografía de M. Sassón. Archivo privado de la empresa Dieste-Montañez</i>	25
<i>Imagen 07. Iglesia de Cristo Obrero. Imagen obtenida de wikiarquitectura https://es.wikiarquitectura.com/edificio/iglesia-de-atlantida/</i>	33
<i>Imagen 08. Construcción. Imágenes extraídas del archivo Dieste & Montañez.[02]</i>	40
<i>Imagen 09. Construcción. Imágenes extraídas del archivo Dieste & Montañez.[02]</i>	40
<i>Imagen 10. Iglesia de Atlántida. Imagen obtenida de wikiarquitectura https://es.wikiarquitectura.com/edificio/iglesia-de-atlantida/</i>	41

1. INTRODUCCIÓN

Motivación

Objetivos

Planteamiento y antecedentes

Estado del arte (trabajos recientes previos)

Aportaciones

1.INTRODUCCIÓN

Motivación

Acercarme como futuro graduado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, a la figura de Eladio Dieste ha supuesto encontrarme con un profesional despierto e innovador, y descubrir que lo fue, utilizando uno de los cuatro elementos básicos, la tierra: la arcilla.

Despierta en mí, en el ámbito personal, la curiosidad por saber más sobre su vida, su currículo y sus inquietudes. Poder afrontar este trabajo fin de grado me ha dado la oportunidad de cumplir todas estas aspiraciones, y poner en práctica mis conocimientos en Ciencia de Materiales, Teoría de Estructuras, Delineación, Dibujo 3D y utilizar paquetes comerciales de métodos de elementos finitos y todas las habilidades obtenidas en los estudios de grado y la experiencia profesional.

Objetivos

Al inicio del presente trabajo, los objetivos marcados son, por una parte, poner en valor una vez más, la figura de un “grande de la arquitectura”, desde nuestro centro, EINA, y concretamente desde una titulación de ingeniería y validar mediante técnicas modernas de análisis estructural, la cerámica aramada, una técnica artesanal, nacida del amplio conocimiento de la resistencia de materiales de su máximo exponente, Eladio Dieste, y de las limitaciones tanto técnicas como económicas del entorno sociocultural en que se realiza la obra. Poner en relieve al artífice que diseñó y construyó la Iglesia de Cristo Obrero, en la década de 1950, con una precisión tal que los modelos geométricos actuales y los tratamientos computacionales no aconsejan mover, ni un centímetro, ninguna de las piezas que componen una de sus obras más representativas.

La Iglesia de Cristo Obrero es la obra elegida para modelar y estudiar su comportamiento estructural, y validar la técnica utilizada (1958-1960) con métodos computacionales actuales (2019). Esta edificación se levanta en Atlántida, cerca de Montevideo, en la desembocadura del Río de la Plata.



Imagen nº01. Panorámica de la Iglesia de Atlántida. Imagen extraída de wikiarquitectura

Planteamiento y antecedentes

Desde la cátedra de Elías Cueto se han realizado numerosos estudios y publicaciones sobre diseños de insignes constructores como Rafael Guastavino o Félix Candela.

Desde el punto de vista biográfico, la figura de Eladio Dieste ha sido reconocida tanto desde el ámbito académico, arquitectónico, como social, por lo que existen numerosos libros publicados, artículos en revistas especializadas y homenajes a su figura. Así mismo, la existencia de su obra en Atlántida y una réplica en Alcalá de Henares, cerca de Madrid, con algunas diferencias, ha permitido acercarme al proceso constructivo de La iglesia de Cristo Obrero.

Estado del arte (trabajos recientes previos)

Destacar en este apartado, el reconocimiento del museo "J. Paul Getty", y su fundación (organización estadounidense), que en agosto de 2016 seleccionó la Iglesia de Atlántida para realizar un estudio exhaustivo. El programa fue dotado con 150.000 dólares y terminó en junio de 2017.

Aportaciones

Este trabajo permite disponer de un resumen bibliográfico sobre Eladio Dieste, así como el modelo tridimensional, parametrizado, de su obra: la Iglesia de Cristo Obrero, y la metodología para abordar el análisis estructural y la visualización de los diagramas de vectores de tensiones que marcan el trazado por el que disponer la armadura metálica que hacen resistir los esfuerzos a tracción que de otra manera colapsarían la cerámica desnuda.

2. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

Modelización de la estructura

Modelización del material: cerámica armada

Herramienta de cálculo ANSYS

Descripción del ensayo

2. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

Herramienta de modelado TopSOLID

CAD, (dibujo asistido por ordenador), es la herramienta tecnológica para el diseño y la documentación técnica que automatiza la metodología manual y tradicional. De uso extendido en arquitectura e ingeniería permite bosquejar documentación de construcción, exponer ideas de diseño, visualizar y analizar estas ideas mediante representaciones renderizadas (cuasi-foto-realistas), simular el funcionamiento de un diseño en su contexto real y representar los objetos de forma precisa en una pantalla mediante una serie de puntos, líneas, superficies y volúmenes de forma tridimensional. De esta manera podemos crear, modificar, analizar, discutir y documentar representaciones gráficas bidimensionales o tridimensionales (2D o 3D) de objetos físicos como una alternativa a los borradores manuales y a prototipos y maquetas. El CAD se utiliza a lo largo de todo el proceso industrial, desde el diseño conceptual, pasando por el análisis de ensamblajes y subconjuntos hasta la definición del método de fabricación. El CAD permite a los ingenieros y arquitectos probar de forma interactiva las variantes de diseño con el objetivo de:

- Reducir los costes de desarrollo de proyectos
- Mejorar la productividad de los medios y los recursos
- Asegurar la calidad de la obra o los productos
- Obtener una documentación más sólida y sencilla incluyendo dimensiones y listas de materiales
- Reutilizar fácilmente los datos de diseño y las mejores prácticas para otras metodologías

Podemos pensar en esta fase del trabajo fin de grado como el proceso por el cual se traza o delinea la concepción futura de una figura, un edificio o un objeto. Desde la cabeza del diseñador hasta su existencia en papel. En nuestro contexto, he utilizado la herramienta de modelado para pasar la idea de Eladio Dieste, documentada en planos desde la bibliografía [3], hasta el modelo informático. Los pasos que he seguido en el proceso de diseño son los siguientes:

- *Definición.* Consiste en especificar las propiedades y características relevantes del sistema que se desea diseñar, contestando ¿qué?, ¿por qué?, ¿para qué? ¿dónde?, ¿cómo?, etc. que suele contestar el ente cliente a modo de cuaderno de cargas o especificaciones del proyecto.
- *Modelado.* Es probablemente el paso más relevante del proceso de diseño. Consiste en crear un modelo del sistema/elemento/proceso a diseñar, que represente y satisfaga las necesidades y especificaciones requeridas en la definición. Es el ingeniero o arquitecto el que debe realizar la modelización. Puede ayudarse de modelos existentes y bibliotecas o basándose en técnicas de modelado conocidas para crear un nuevo modelo. Se requiere de sistemas informáticos y software comercial, y una gran pericia y experiencia en la técnica de delineación y dibujo.
- *Dibujos de detalle.* A menudo, después del modelo tridimensional que sirven para revisar y discutir la geometría entre ingenieros, se deben representar los objetos o estructuras de un modo que describa fácilmente la forma de construir o fabricar. Estos planos deben poseer el detalle suficiente como para que la realización del proyecto sea factible y sin ambigüedades. Por ese motivo, antes de comenzar las actividades de construcción, se debe generar una cantidad

importante de documentación que sirva para describir el modelo con el suficiente detalle (lista de materiales, elementos normalizados, procesos, proveedores, tratamientos térmicos, recubrimientos, detalles de montaje, etc.). A menudo, este paso puede suponer un porcentaje importante del esfuerzo de diseño.

- *Elaboración de prototipos.* Muchas veces, se fabrican y construyen maquetas y prototipos antes de abordar la construcción o la fabricación. Los prototipos permiten detectar errores en el diseño, visualizar mejoras, realizar ensayos empíricos y sirven como demostración visual, para estudiar la resistencia de los materiales, el encaje entre componentes, durabilidad en uso, bajo atmósferas concretas, desgaste o roturas por fatiga, o incluso apreciaciones de uso estético con campañas de aceptación ante clientes potenciales objetivo. En este tfg no ha sido necesario realizar ninguna maqueta, pero con técnicas de fabricación aditiva, o impresión 3D hubiese sido posible hacerlo. Si en el transcurso de estas pruebas en las maquetas o prototipos se detectan fallos o elementos mejorables, se suele volver al paso de modelado, o incluso al de definición, si el problema es severo.
- *Documentación.* Una vez validado el diseño se pasa a documentarlo. En nuestro caso, esta fase se ha obviado, pero la documentación debe incluir toda la información para que no surjan dudas en la construcción (acopio de materiales, mecanizados, soldaduras, andamiajes, descripción de procesos, esquemas de instalación, diagramas temporales, proveedores preferentes, tratamientos superficiales, normativas aplicables, etc.

Los primeros sistemas CAD datan de la década de 1950. En los últimos años de los '60, y sobre todo a partir de los años 70, los primeros productos CAD empiezan a comercializarse. El desarrollo se inició en la industria aeronáutica y automovilística. Los precios de estos primeros sistemas CAD comerciales eran muy altos (en torno al millón de dólares americanos). En la década de 1980 es cuando empieza la difusión global de los sistemas CAD. En 1982 se crea AutoCAD, software de dibujo técnico a un precio "reducido" (unos \$1.000). Hoy sigue siendo el más utilizado en todo el mundo. A partir de ahí, gracias a la mejora de la tecnología, al avance de la informática gráfica y a la conectividad global, es posible dotar a los programas CAD de mucha mayor resolución, interactividad y realismo, permitiendo representar y almacenar piezas en 3D de forma rápida y en entornos colaborativos (varios diseñadores trabajando sobre un mismo modelo). Paquetes CAD como CATIA, Solid Works, Solid Edge, NX o TopSOLID que nos ocupa, son de uso habitual y de conocimiento imprescindible para los ingenieros y arquitectos actuales.

TopSOLID [01] es uno de los softwares que aborda la automatización global que acabo de describir. Permite realizar las funciones generales del proceso de modelado: definición interactiva del objeto, visualización múltiple, cálculo de propiedades y simulación, modificación del modelo y generación de planos y documentación. En cuanto al modelado geométrico, se utilizan técnicas jerárquicas de división del espacio utilizando un árbol de modelo donde se van interconectando parámetros, representaciones y sus restricciones geométricas (similar a otros paquetes comerciales competidores). Mi conocimiento sobre este programa lo he adquirido a través de mi experiencia personal previa como diseñador durante varios años en empresas del sector industrial, ligadas a piezas plásticas, moldes de inyección y utillajes de post-procesado de componentes.

La primera etapa de definición es el punto de partida de mi trabajo. Recopilé la información de los croquis constructivos y descripción minuciosa de la obra creada por Eladio Dieste, de modo que mi labor, fue la de aprovechar mi habilidad como usuario del sistema CAD – TopSOLID para trasladar toda esa información previa y generar el modelo tridimensional que posteriormente ensayaría en el software de elementos finitos ANSYS.

Cada uno de los parámetros que recoge la construcción de la Iglesia de Cristo Obrero, longitudes, alturas, flechas, curvaturas, las definí como variables, de modo que puedo actualizar el modelo, cambiando estos parámetros. De esta forma, podemos simular situaciones ficticias de distancia entre muros, alturas de la cubierta o espesores de láminas. Algo, que el insigne ingeniero habría hecho mediante multitud de cálculos matemáticos.

Para la generación del complejo arquitectónico, definí dos zonas modeladas, por un lado, la nave de la iglesia, y por otro lado el campanario. Respecto a la nave, realicé el modelado de los muros laterales con los croquis necesarios y posteriormente la cubierta. Por último, abordé el modelado de los cerramientos frontales y traseros según la documentación y fotografías.

De la bibliografía se desprende que los muros laterales se construyeron con un espesor de **27 cm y una altura de 7 metros**, partiendo con una geometría recta desde el suelo y finalizando con una directriz ondulada con cinco sinusoides y media, de 2.8 metros de amplitud. Gracias a esta minuciosa descripción [02, páginas 17 a 22] y [03, páginas 46 a 57], fue fácil abordar el proceso de modelado.

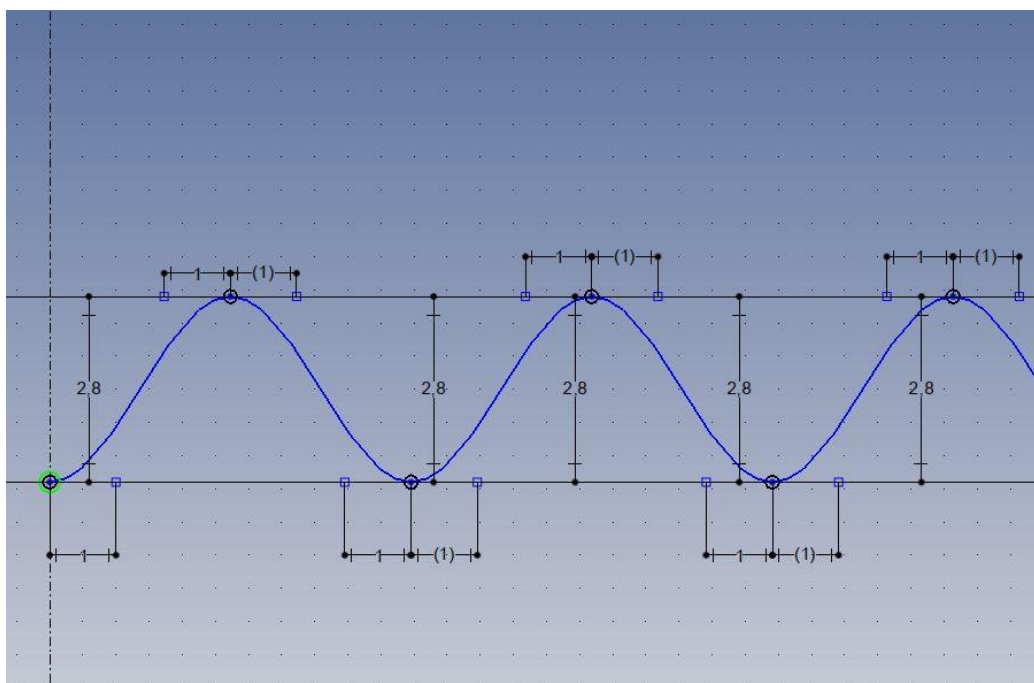
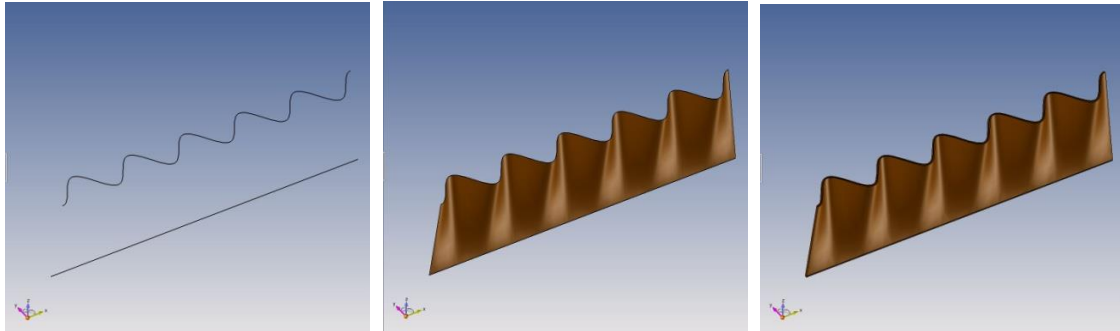


Figura nº01. Ondulación parametrizada de los muros laterales (Propia del TFG)

Con la ondulación parametrizada y la descripción previa se realizan los croquis espaciales, que servirán para generar la superficie media, y posteriormente, dando el espesor definido a esta superficie obtenemos el volumen correspondiente al muro lateral.



Figuras nº02, nº03 y nº04. Croquis, superficie y volumen de los muros laterales (Propias del TFG)

La segunda superficie principal es la que define la techada. Dieste la resuelve con una cubierta que cubre una **luz de 19 m** en su lado más ancho. Esta cubierta, de doble curvatura, es una lámina plegada, pretensada, de ladrillo de **8 centímetros de espesor y 32 metros de largo**. Con estas indicaciones, defino los croquis principales que permitirán modelar la superficie e incluirla en la geometría de los muros.

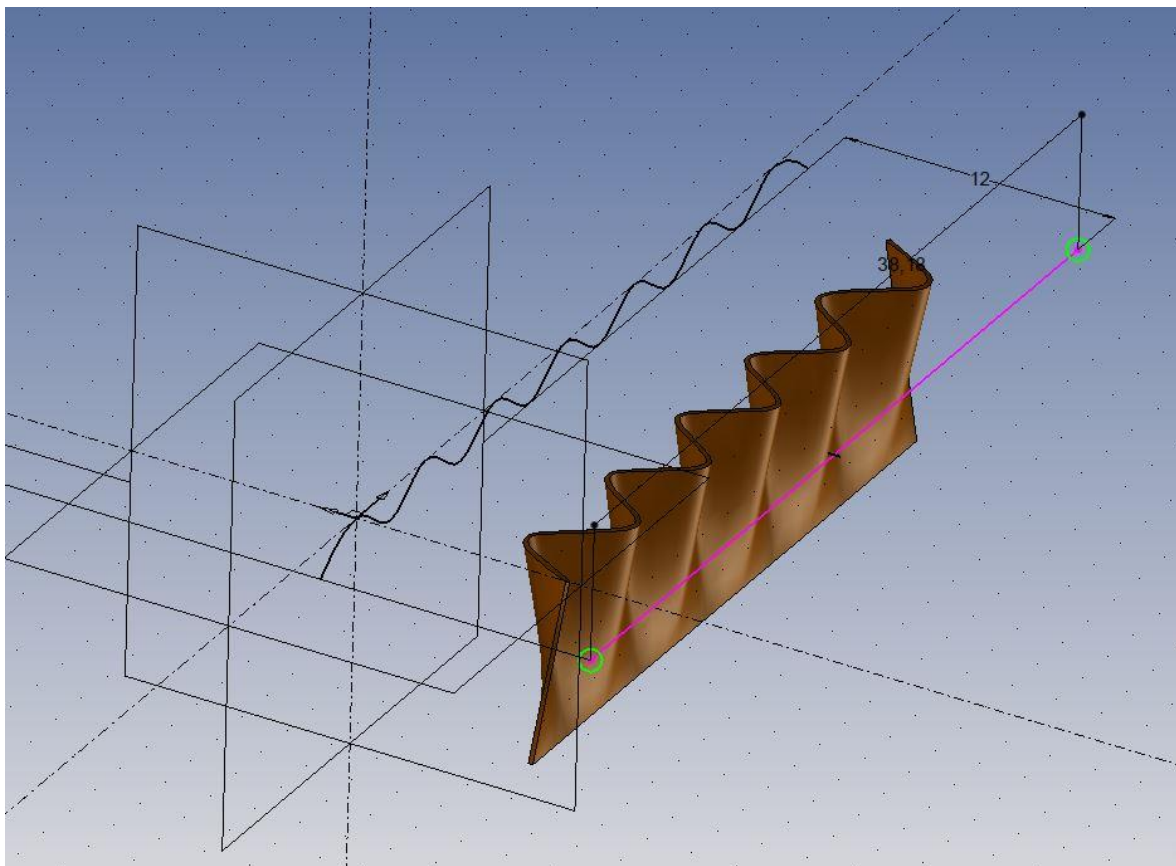


Figura nº05. Ondulación parametrizada de la cubierta (Propia del TFG)

El modelado de la nave principal continúa con el espesamiento de la superficie de la cubierta (80mm) y su ajuste en los muros laterales.

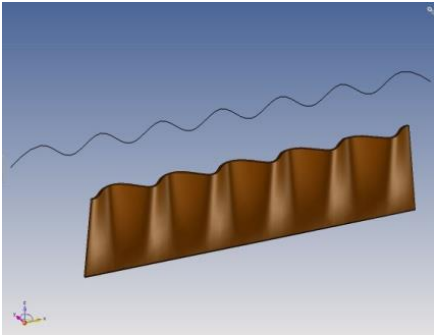


Figura nº06. Croquis de la cubierta (Propia del TFG)

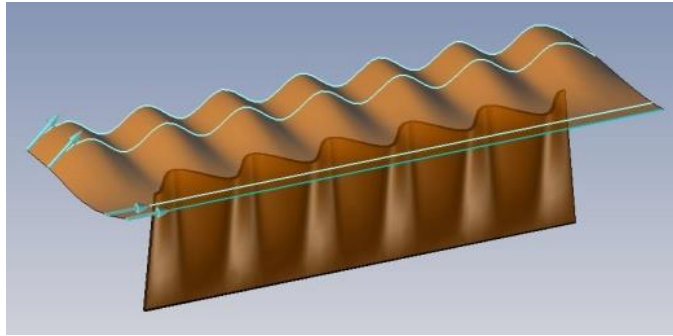


Figura nº07. Superficie de la cubierta (Propia del TFG)

A continuación, aprovecho la simetría de la construcción para terminar de modelar la estructura completa de la nave con los modelos realizados.

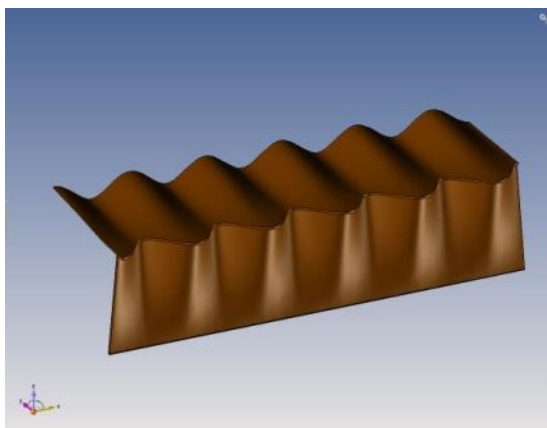


Figura nº08. Volumen de la cubierta (Propia del TFG)

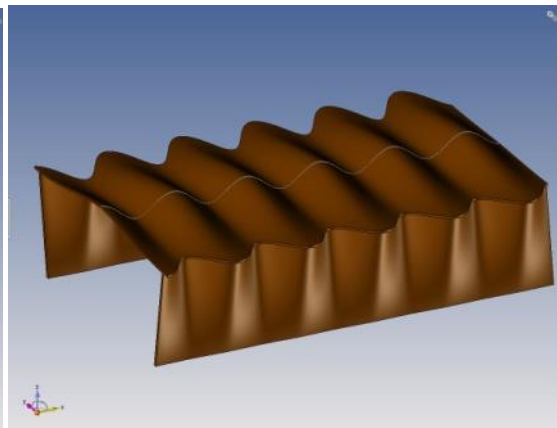
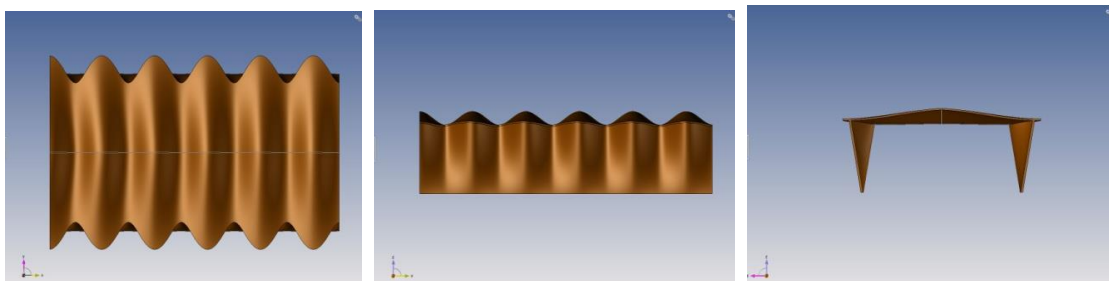


Figura nº09. Simetría de la nave (Propia del TFG)

En esta primera fase del desarrollo de la nave central, podemos ver tres figuras en representación planta, alzado y perfil de los muros laterales y la cubierta, que son los volúmenes característicos de la Iglesia de Cristo Obrero. Faltarán los muros frontal y trasero y el campanario.



Figuras nº10, nº11 y nº12. Vistas en planta, perfil y alzado del modelo (Propias del TFG)

Para el modelado de los muros frontal y trasero, la entrada subterránea y el campanario se siguen los mismos croquis y bocetos de la bibliografía, y se escala alguna medida que no queda claramente descrita en los textos:

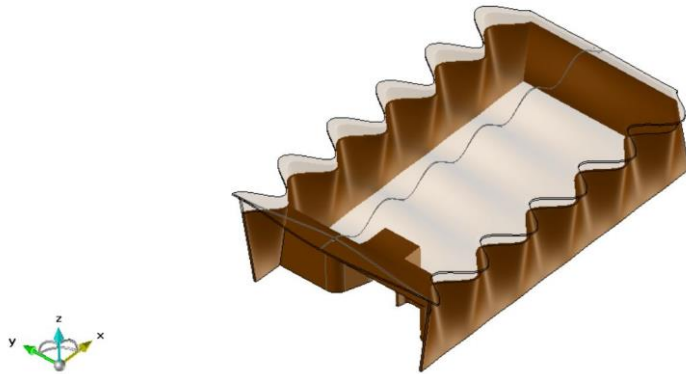
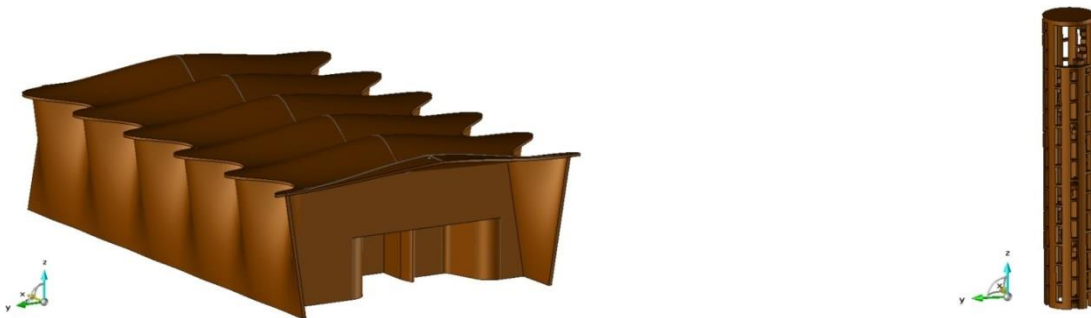


Figura nº13. Volumen de muros interiores (Propias del TFG)



Figuras nº14 y nº15. Volumen de la nave y del campanario (Propia del TFG)

Como resultado se obtiene un modelo nativo en programa TopSOLID, pero fácilmente exportable a ficheros de intercambio tridimensional y de uso público como son los archivos step o parasolid, con extensiones *.stp y *.x_t que permiten visualizar y editar esta geometría en cualquier software CAD del mercado. Incluido ANSYS que será utilizado en este trabajo para la simulación de ensayos estructurales y explicado en el siguiente capítulo.

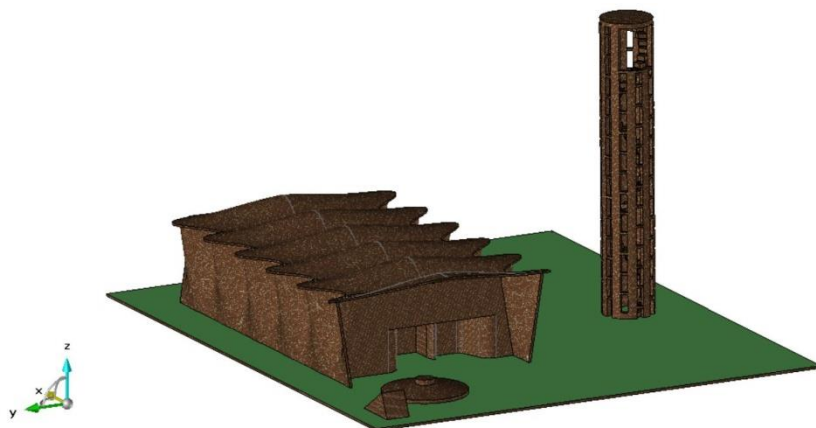
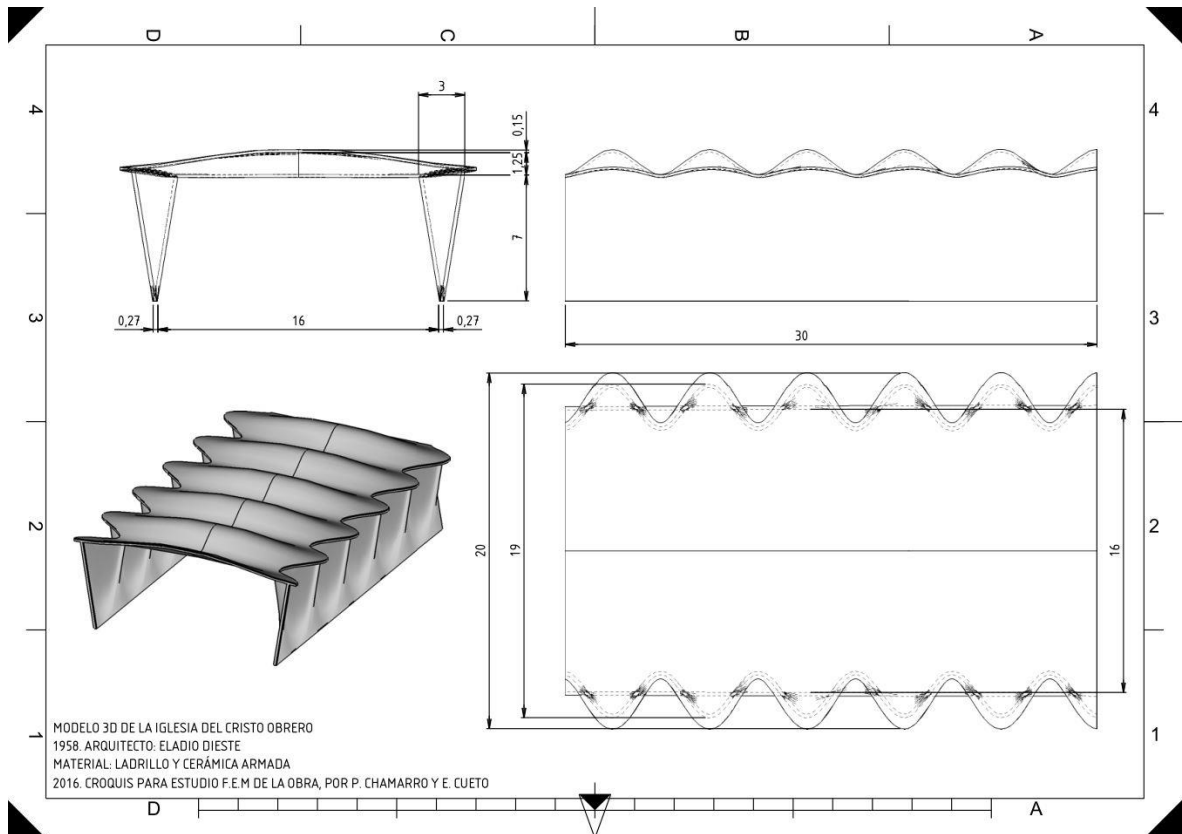
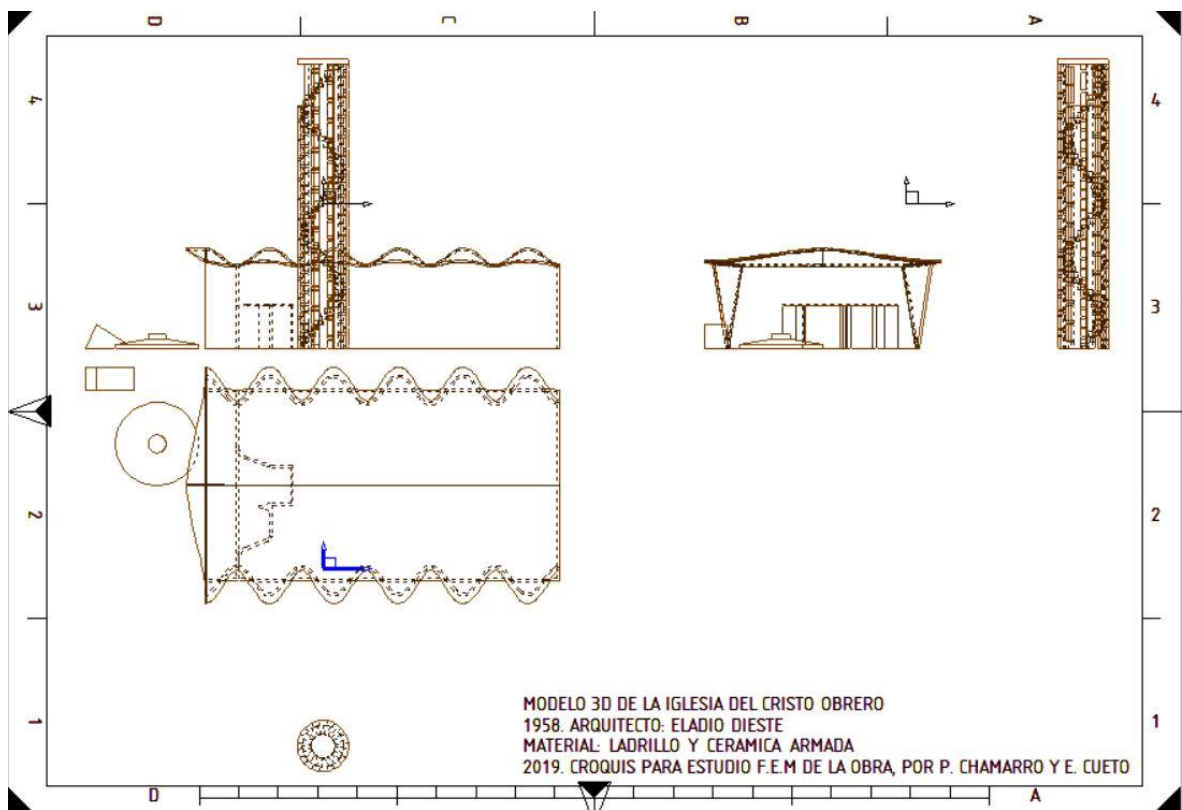


Figura nº16. Modelo del complejo (Propia del TFG)

También es posible obtener la documentación en planos 2D que se consideren oportunos, con anotaciones, cotas y secciones.

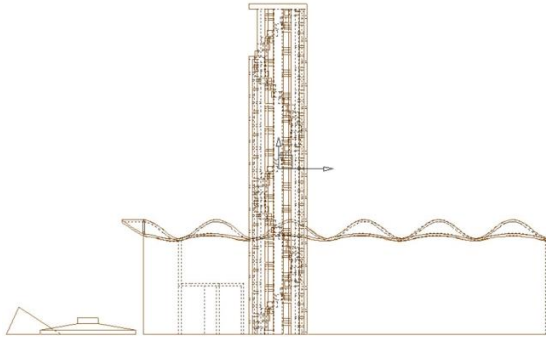


Plano nº01. Nave con muros laterales (Propio del TFG)

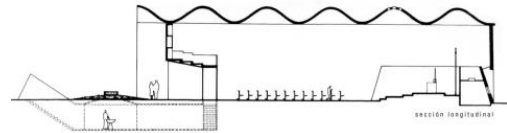


Plano nº02. Modelo de la Iglesia del Cristo Obrero (Propio del TFG)

Llegados al final del modelado, y con las representaciones de las proyecciones en planta, alzado y perfil del complejo, podemos comparar el resultado de nuestros modelos con los que aparecen en la bibliografía [02] y [03] y que hemos utilizado para esta primera parte del trabajo fin de grado.

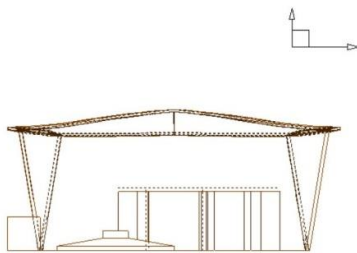


Plano nº03. Alzado del modelo (Propio del TFG)

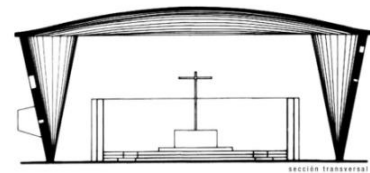
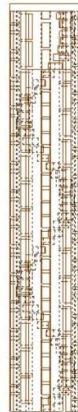


Plano nº04. Alzado según Dieste [3]

MODELO 3D DE LA IGLESIA DEL CRISTO OBRERO
 1958. ARQUITECTO: ELADIO DIESTE
 MATERIAL: LADRILLO Y CERAMICA ARMADA
 2019. CROQUIS PARA ESTUDIO F.E.M DE LA OBRA, POR P. CHAMARRO Y E. CUETO



Plano nº05. Perfil del modelo (Propio del TFG)



Plano nº06. Perfil según Dieste [3]

Existen diferencias sutiles entre las dos representaciones que provienen de simplificaciones geométricas que se comentarán en el apartado “Limitaciones en la metodología” del capítulo 3 de esta memoria, pero en general, no afectan al desarrollo del trabajo fin de grado y ponen de manifiesto la extraordinaria habilidad de Eladio Dieste para tratar las curvas catenarias y las cubiertas de doble curvatura. Para el modelado del campanario no se ha encontrado una representación croquizada, pero se ha modelado con la descripción técnica que aparece en [2] y [3] en la que nos definen la altura, el diámetro exterior y la anchura de los muros.

Modelización del material: cerámica armada

Una vez conseguida la geometría, modelada, el siguiente paso hacia el ensayo por elementos finitos es la definición matemática del material de construcción. Pese a su extraordinaria simplicidad, la cerámica empleada por Dieste posee características muy importantes, como su valor estético, propiedades térmicas, bajo coste de mantenimiento, longevidad y resistencia al fuego. Su resistencia a compresión es considerable, aunque en tracción, su comportamiento es muy pobre. Como consecuencia, las construcciones tradicionales con este tipo de material se idearon de tal manera que solo apareciesen fuerzas de compresión, limitando lógicamente, la libertad de expresión artística. Se evitaban geometrías que supusiesen solicitar tensiones de tracción en las obras. La mampostería reforzada la concibe Dieste con la intención de aprovechar las virtudes de la mampostería ordinaria sin que el dimensionado de ésta, esté tan estrechamente ligado a la geometría simple. La técnica constructiva utilizada por Eladio Dieste en la Iglesia de Cristo Obrero es la combinación de un plano de ladrillos encajados, unas juntas continuas de mortero con armaduras de acero y un plano superior de ladrillo encajado. La introducción de la armadura permite que la estructura sea capaz de soportar una serie de esfuerzos de tracción que, de otra manera, los muros de fábrica serían incapaces de absorber por sí mismos. De hecho, en el análisis estructural explicado en el apartado siguiente, se desprenden unos resultados que corroboran el modo de fallo y colapso de la estructura modelada con cerámica sin armar, y esos mismos resultados sirven para dimensionar las barras de acero (cantidad y diámetro) y distribuirlas de modo eficiente como marcan los vectores de tensión máximas.

Para poder utilizar la geometría modelada en el software ANSYS debemos parametrizar el material de la cerámica mediante los siguientes valores y simplificaciones [04, página 124] y [05, páginas 3 a 9], [8], que trataremos como un material elástico lineal isotrópico, y quedará definido con:

CONCEPTO	VALOR	UNIDADES
Módulo de Young	4,00E+09	Pa
Coefficiente de Poisson	0,28	adim.
Densidad	1900	Kg/m ³
Módulo de cizalladura	3,10E+08	Pa
Resistencia a compresión	2,39E+07	Pa
Resistencia a flexión	9,70E+05	Pa
Coefficiente de expansión	6,50E-06	1/K
Conductividad	0.8	W/m.K
Inercia térmica	1,67E+06	J/m ³ .degC

Tabla nº01. Datos de partida para el modelado de la arcilla ([8])

Estos datos provienen de la bibliografía consultada y son valores medios de ensayos realizados en laboratorios de Sudamérica y España ([04], [05] y [08]) sobre cerámica hueca y maciza.

Una modelización más exacta incluiría las líneas de mortero en las juntas de unión entre los ladrillos, y exigiría modelar también este material (la bibliografía lo recoge), pero la dificultad para considerar estas juntas de mortero en el modelo tridimensional excede de los objetivos de este trabajo fin de grado.

Herramienta de cálculo ANSYS

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales en diversos problemas de ingeniería y pensado para ser utilizado en equipos informáticos. Con el MEF obtenemos una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) en el que hemos definido las ecuaciones que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados “elementos finitos”. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados “nodos”. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama “malla”. Los cálculos se realizan sobre la malla de nodos, que sirven a su vez de base para la discretización del dominio en elementos finitos. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de algunos de estos problemas, con frecuencia, los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa efectiva de cálculo. Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. Aún así, la solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en los nodos. En el resto de los puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos.

Existe multitud de software comercial que permite elaborar ensayos por el método de elementos finitos, más o menos especializados e integrados en paquetes de diseño gráfico, como son: Abaqus, ANSYS, Cosmos, Cype, Algor, Nastran, etc. aunque desde el punto de vista de la programación algorítmica modular, las tareas realizadas en este TFG para llevar a cabo el son tres:

- *Pre-proceso*, que consiste en preparar el modelo para el cálculo. Se define la geometría y se selecciona el tipo de elemento a utilizar. En este apartado se selecciona también el material a ensayar, que puede obtenerse de librerías, comerciales o libres, o definirse por el usuario. En este apartado se generará la malla y se definen las condiciones de contorno del modelo y la aplicación de las cargas exteriores.
- *Cálculo*. El resultado del pre-proceso es un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Esta parte del programa genera las soluciones al sistema, permitiéndonos modificar algunos parámetros para optimizar el proceso: definir el tipo de cálculo a realizar (transitorio, armónico, estático, etc.), norma del error, número de iteraciones, etc.
- *Postproceso*. El cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización. En el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos y se realiza una representación gráfica. En ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

Descripción del ensayo

El ensayo que se plantea es mantener empotrada la cimentación de la nave y del campanario, y aplicar una presión por peso propio en toda la edificación. Además, y de acuerdo a la legislación UNIT50:1984 vigente en Uruguay de cálculo de cargas estructurales, y al emplazamiento de la Iglesia de Cristo Obrero en Atlántida, se aplica también una presión equivalente en concepto de carga de viento. El proceso lo guiaremos con el programa ANSYS® [5] en las siguientes figuras:

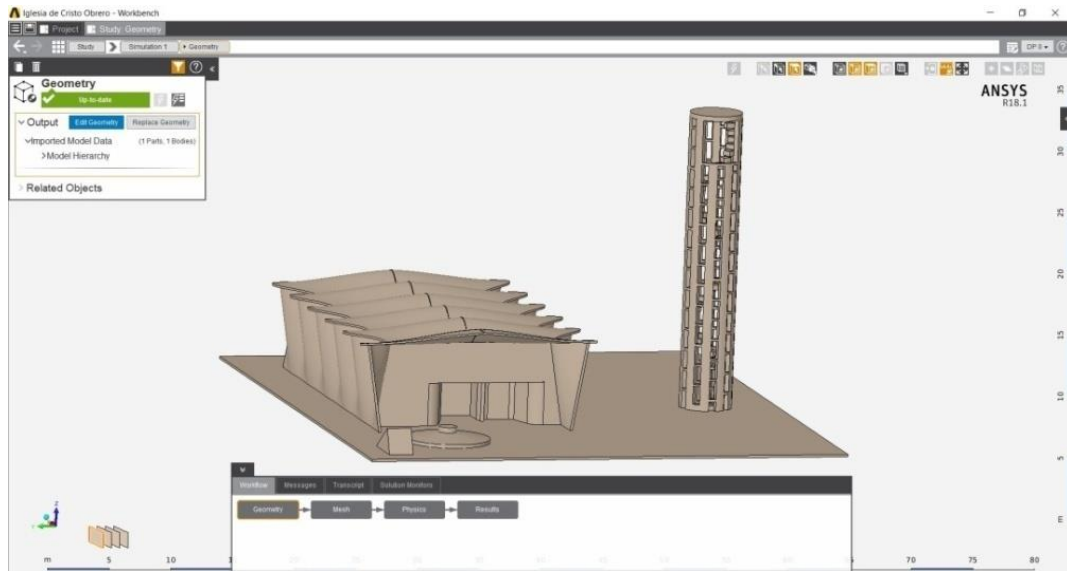


Figura nº17. Importar geometría en ANSYS (Propia del TFG)

La siguiente etapa es el mallado. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla), suelen ser puntos de fractura, entrantes, esquinas, detalles complejos o áreas de elevada deformación. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. El mallado se realiza de acuerdo a los estándares recomendados por el programa, con una resolución de malla media-baja, y obteniendo un total de 1.80×10^5 nodos y 1.83×10^5 elementos.

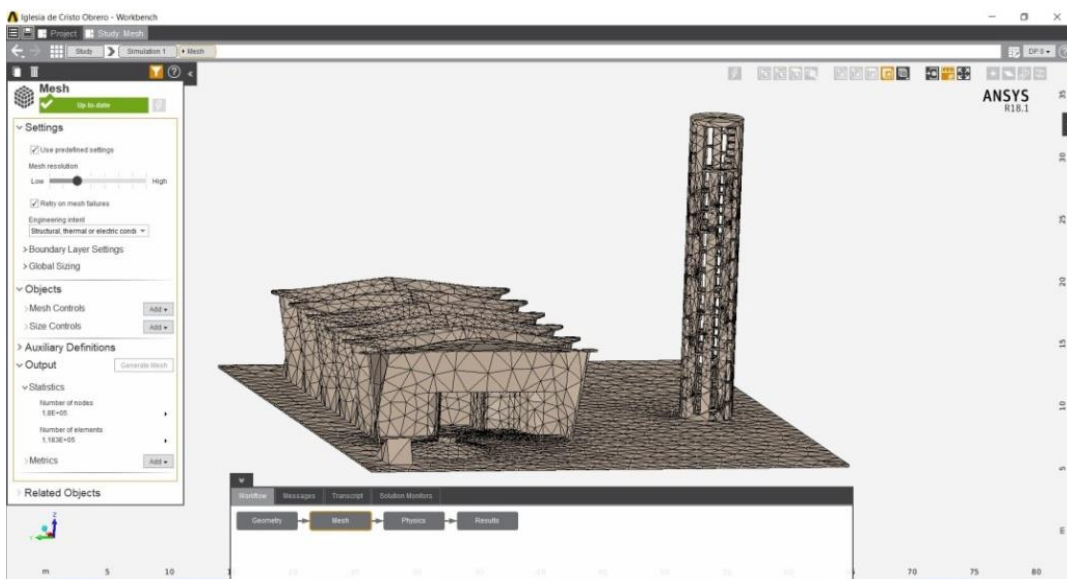


Figura nº18. Mallado de la geometría (Propia del TFG)

Las condiciones de contorno para el ensayo se han descrito anteriormente y se implementan de manera guiada en la consola de control del programa, en este caso, el empotramiento de la cimentación de la nave principal y del campanario, forzando desplazamientos nulos en todos sus puntos:

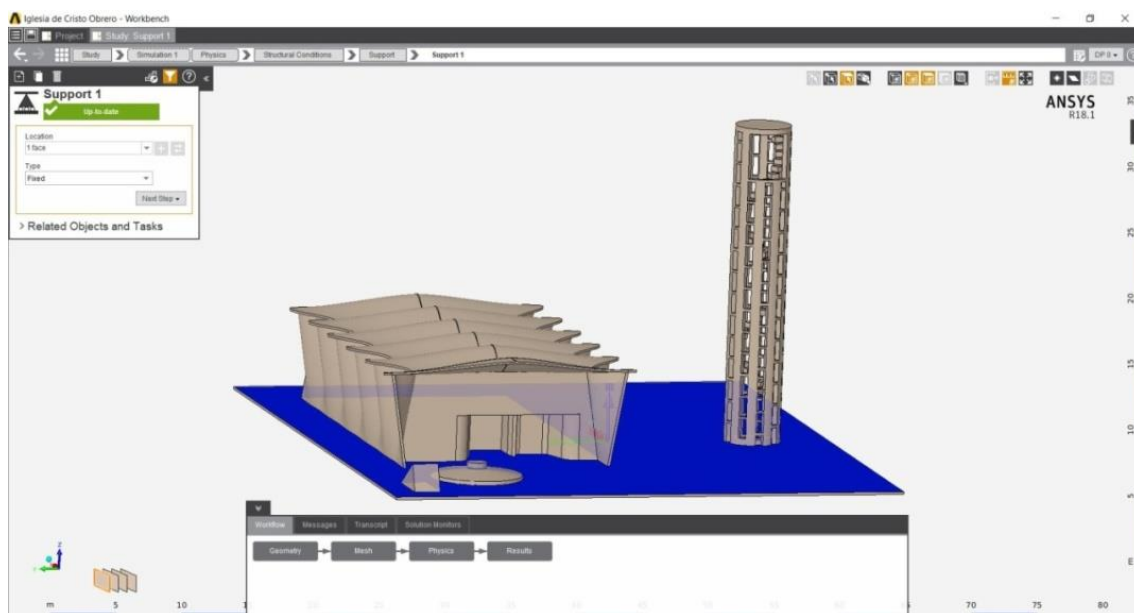


Figura nº19. Empotramiento de la cimentación (Propia del TFG)

Para definir las acciones exteriores sobre las estructuras se han estimado dos acciones, a modo de ejemplo típico de sollicitación, por un lado el peso propio de los materiales de construcción, y por otro la carga de viento sobre el muro de poniente (el izquierdo según la vista de las figuras).

La determinación de los esfuerzos de peso propio, tanto de la nave como del campanario se deduce con los siguientes valores, obtenidos de bibliografía y de nuestro propio modelo:

CONCEPTO	VALOR	UNIDADES
Densidad de la cerámica [5]	1900	Kg/m ³
Volumen de la nave (propio modelo)	180	m ³
Volumen del campanario (propio modelo)	83	m ³
Superficie de la cubierta de la nave (propio modelo)	278	m ²
Superficie de la cubierta del campanario (p. modelo)	14,5	m ²

Tabla nº02. Datos de partida para el cálculo de peso propio ([5] y propia del TFG)

Como resultado de aplicar estos datos, las presiones debidas al peso propio de la estructura se obtienen calculando el peso total (volumen x densidad) y dividiendo por la superficie proyectada:

CONCEPTO	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Presión por peso propio en la nave	1230,22	kg/m ²	12056,12	Pa
Presión por peso propio en el campanario	10875,86	kg/m ²	106583,45	Pa

Tabla nº03. Determinación de cargas por peso propio (Propia del TFG)

Para la estimación de la presión debida a la acción del viento, tomaremos la norma UNIT 50:1984 uruguaya y la localización exacta de la Iglesia de Cristo Obrero en Atlántida, que corresponde con una población en la desembocadura del Rio de la Plata, y con una altitud media de 15 metros sobre el nivel del mar. La acción de viento sobre nuestra estructura es, en general, una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o presión estática, P que puede expresarse como:

$$P_{\text{viento}} = p_d \cdot C_e \cdot C_p$$

Ecuación nº01. Determinación de cargas por viento (Norma 50:1984)

siendo:

- P (Pa) – la presión sobre la estructura causada por el viento
- p_d (kN/m^2) - la presión dinámica del viento que puede adoptarse en $0,5 \text{ kN/m}^2$ según norma
- c_e (adimensional) - el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, y dependiente del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción. A nivel del mar y con la altura de nuestra construcción (7 metros), podemos determinar este coeficiente como 2.8, según norma
- c_p (adimensional) - el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie, y su esbeltez, que para nuestro caso será de 0.8, según norma.

La acción de viento genera además fuerzas tangenciales paralelas a la superficie. Pero teniendo en cuenta que la superficie es ondulada y que la forma de construir de Dieste obligaba a sus capataces y empleados a que el mortero quedara enrasado con la cerámica, despreciaremos y no calcularemos estas fuerzas. En definitiva, la presión por carga de viento en nuestro caso es: $P_{\text{viento}} = 940 \text{ Pa}$

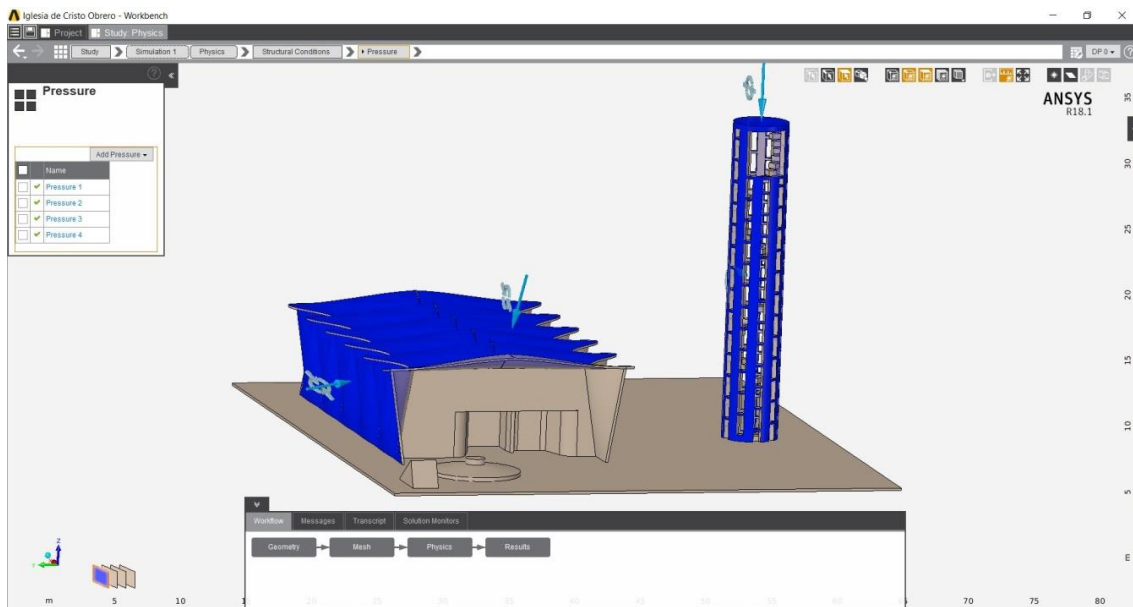


Figura nº20. Cargas exteriores (Propia del TFG)

En este momento queda correr el módulo de cálculo y esperar a que el algoritmo dote a cada nodo de la solución a cada variable, cosa que ocurre sin incidentes, en el transcurso de 9 minutos.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Limitaciones en la metodología

Resultados de los ensayos FEM

Evaluación e interpretación de resultados

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Limitaciones en la metodología

En general el proceso empleado en el desarrollo de este trabajo fin de grado, tal como se ha usado tiene algunas limitaciones.

Por un lado, la forma de modelar ha sido teórica en base a los bocetos recopilados en la bibliografía y tomando cotas y medidas a escala, de ellos, lo que no nos asegura que el edificio real corresponda con exactitud con el modelo generado. Alguna inexactitud en las representaciones utilizadas y la existencia de modificaciones posteriores a la construcción, como aplicación de lucernarios, hacen que se hayan cometido errores en el proceso de modelado. Métodos como el escaneado láser comercializado por FARO permitirían obtener representaciones del modelos real y validar el diseño realizado, pudiendo cuantificar el error cometido.

En cuanto a la parametrización de la cerámica como material de construcción y su simplificación para ser integrada en el programa de cálculo, tenemos también una limitación. La cerámica, arcilla cocida al fuego, es una mezcla de filosilicatos de aluminio hidratados a veces con cantidades variables de hierro, magnesio y otros metales alcalinos, procedentes de la descomposición de rocas. El hecho de fabricarla adicionando agua a la arcilla y la inevitable presencia de impurezas hace que, suponer un material homogéneo en toda la construcción sea otra de las inevitables aproximaciones, y difícil de evaluar. Así como no incluir la imprescindible carga de mortero que hace de unión entre las piezas de cerámica.

Además, el MEF calcula soluciones numéricas concretas y adaptadas a unos datos particulares de entrada, no puede hacerse un análisis de sensibilidad sencillo que permita conocer cómo variará la solución si alguno de los parámetros se altera ligeramente. Es decir, proporciona sólo respuestas numéricas cuantitativas concretas, no relaciones cualitativas generales. Además, el MEF proporciona una solución aproximada cuyo margen de error, en general, es desconocido, limitando la solución exacta a los nodos.

A su vez, usar este método para el diseño de una nueva edificación requeriría de mucho más tiempo para ajustar detalles de la geometría, existiendo frecuentemente problemas de mal condicionamiento de las mallas, desigual grado de convergencia de la solución aproximada hacia la solución exacta en diferentes puntos, etc. En general, una simulación requiere el uso de numerosas pruebas y ensayos con geometrías simplificadas o casos menos generales que el que finalmente se ha simulado, antes de empezar a lograr resultados satisfactorios.

Pero con todas las simplificaciones razonadas, y en las horas de modelado, simulación y cálculo dedicadas a este TFG (en torno a 200), el programa consigue mostrar imágenes y datos que son coherentes y lógicos, y que paso a exponer e interpretar.

Resultados de los ensayos FEM

Después de calcular el ensayo planteado, y utilizando el módulo de representación gráfica, podemos obtener imágenes con las principales variables de salida. Como primer resultado se muestra la representación de las reacciones en la cimentación tanto de la nave central como del campanario, con una tensión máxima de $1.6 \cdot 10^5 \text{ N}$:

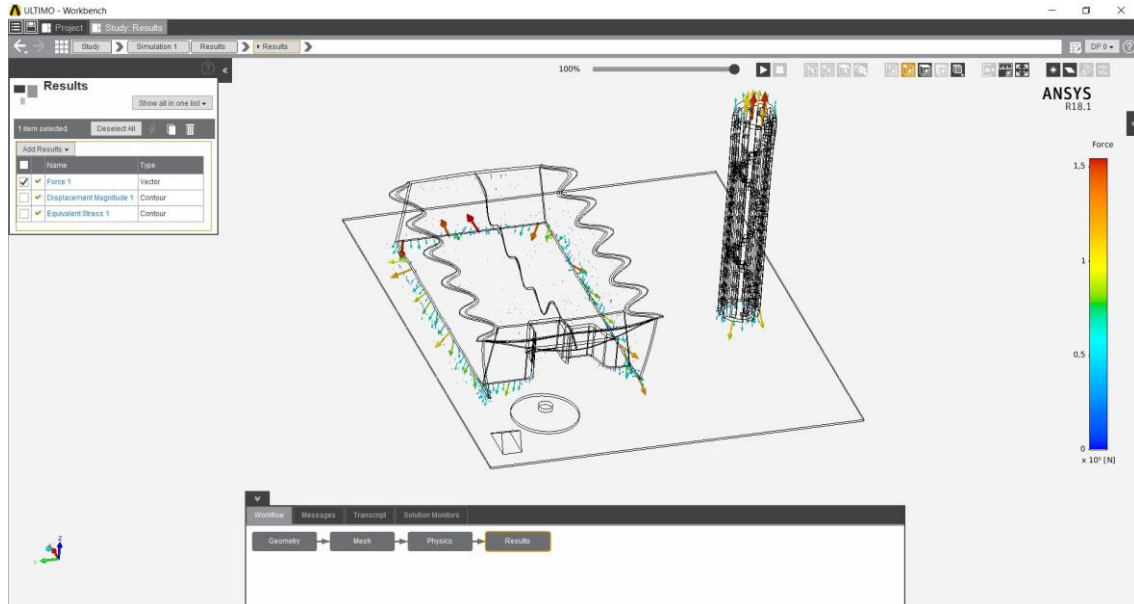


Figura nº21. Reacciones en los empotramientos de las cimentaciones (Propia del TFG)

Otra representación descriptiva del comportamiento de la estructura es la que obtenemos de los desplazamientos de cada uno de los nodos, con un desplazamiento máximo en la línea central de la cubierta de doble curvatura de **37.9 mm**

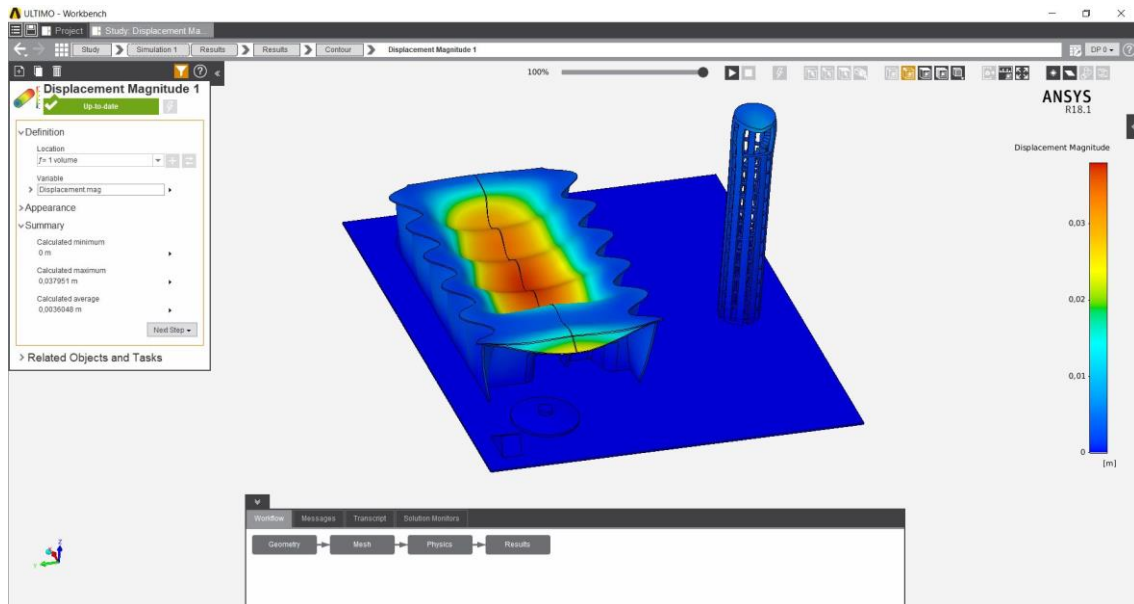


Figura nº22. Desplazamientos máximos (Propia del TFG)

Como el ensayo que se está analizando corresponde a la estructura de cerámica sin armar, las tensiones máximas ya nos denuncian el colapso de la estructura, y, además, por otro lado, intuimos las zonas de la edificación donde se concentran los valores más altos más bajos.

A continuación, la representación de tensión máxima equivalente con un valor máximo de $6.03 \cdot 10^6$ Pa:

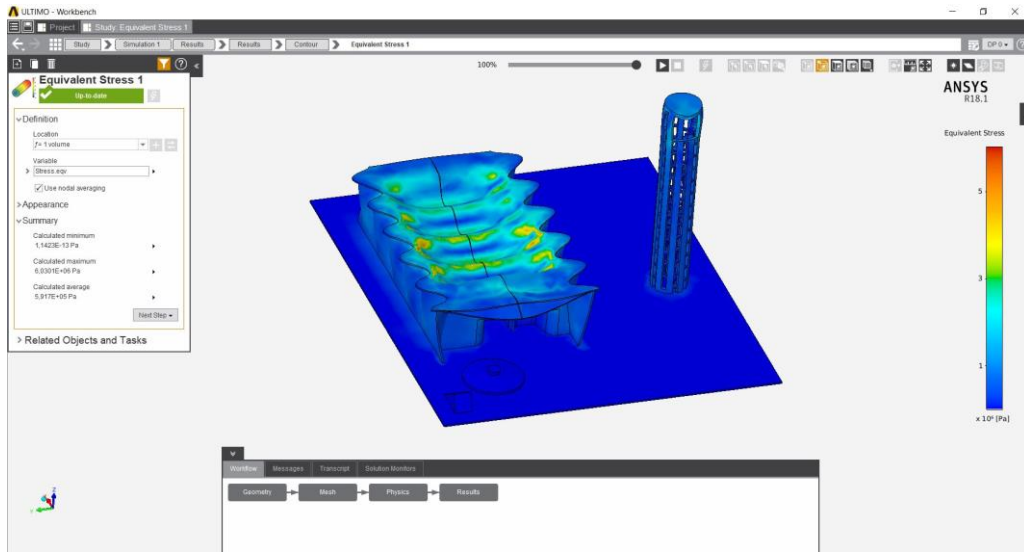


Figura nº23. Tensión máxima equivalente (Propia del TFG)

Por último, y como base del razonamiento y conclusiones que se ampliarán en el apartado siguiente, podemos obtener una gráfica de los vectores de tensiones principales, que dibujan el trazado para disponer la armadura ideal.

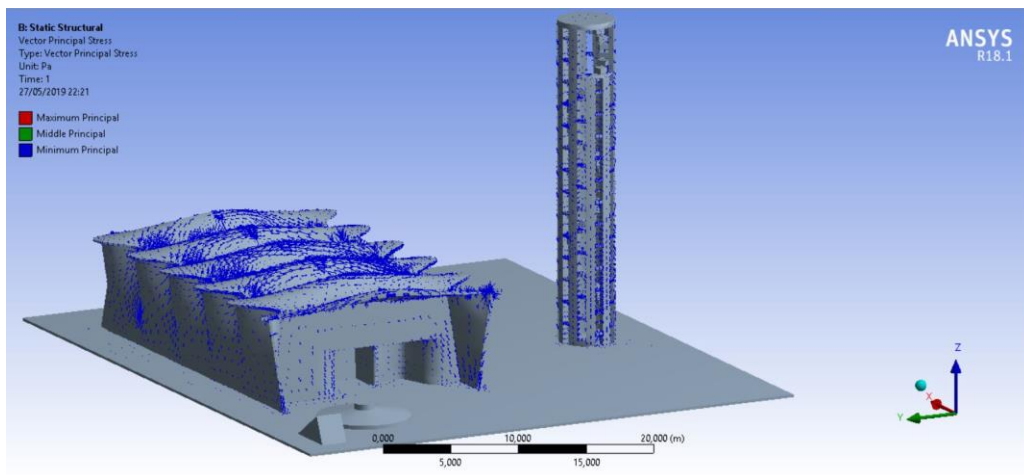


Figura nº24. Vector de tensiones principales (Propia del TFG)

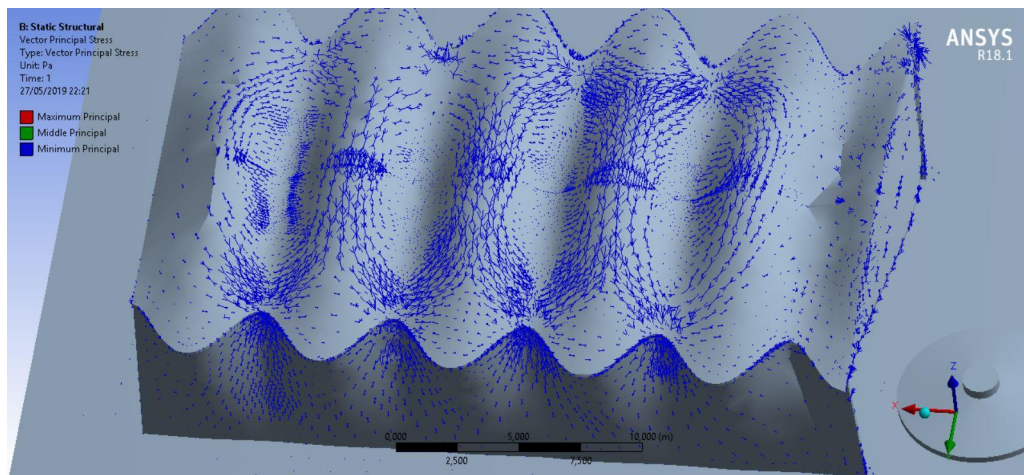


Figura nº25. Detalle vector de tensiones principales en cubierta (Propia del TFG)

Evaluación e interpretación de resultados

Volviendo a no de los objetivos de este trabajo, que es dimensionar la armadura aplicada a la Iglesia de Cristo Obrero, las tres primeras figuras, que representan reacciones en apoyo, desplazamientos y tensiones, no tienen una importancia en sí mismas, porque el diseño de Dieste nunca se pensó ejecutado en cerámica desnuda. De cualquier modo, los resultados son coherentes con el ensayo planteado, destacando que tienen mucha más importancia la carga de peso propio, que la carga de viento (es un orden de magnitud menor), y que la carga de peso propio, resiste mejor el diseño del campanario que de la nave central. No en vano, es uno de los razonamientos preliminares de esta memoria, cuando explicábamos que antiguamente se diseñaba buscando evitar esfuerzos axiales. El campanario es un claro ejemplo de viga-columna donde la cerámica pura o mampostería no tienen rival. Sacrificando la libertad de diseño por resistencia. La nave principal, y su diseño, sí exige disponer de armaduras de acero que resistan los esfuerzos axiales, que calcularemos con las tablas de capacidades mecánicas y secciones de acero

Como podemos considerar que el muro construido con cerámica tiene una resistencia máxima de $1,5 \cdot 10^6$ Pa, queda patente que la construcción, usando el ladrillo, por sí mismo no aguantaría las cargas planteadas. Observamos que aunque el campanario tiene una solicitud mayor, al tener más masa concentrada en menos superficie proyectada, está trabajando a compresión, y por tanto, la tensión máxima está dentro de los límites de comportamiento resistivo, ($9,87 \cdot 10^6$ Pa), mientras que la unión de la cubierta y los muros y el hundimiento de la cubierta provoca tensiones axiales.

Supongamos una franja de la cubierta de 1m de ancho y 80mm de espesor.

Tensión que resistir: $6 \cdot 10^6$ Pa = 6 N/mm²

La fuerza por unidad de longitud a resistir por la armadura es 480 N/mm, es decir 480 KN/m

Utilizando la tabla de la bibliografía [10, página11] siguiente:

ϕ mm	NÚMERO DE BARRAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	9,8	19,7	29,5	39,3	49,2	59,0	68,8	78,7	88,5	98,3
8	17,5	35,0	52,5	69,9	87,4	104,9	122,4	139,9	157,4	174,8
10	27,3	54,6	82,0	109,3	136,6	163,9	191,2	218,5	245,9	273,2
12	39,3	78,7	118,0	157,4	196,7	236,0	275,4	314,7	354,0	393,4
14	53,5	107,1	160,6	214,2	267,7	321,3	374,8	428,3	481,9	535,4
16	69,9	139,9	209,8	279,7	349,7	419,6	489,5	559,5	629,4	699,3
20	109,3	218,5	327,8	437,1	546,4	655,6	764,9	874,2	983,5	1092,7
25	170,7	341,5	512,2	683,0	853,7	1024,4	1195,2	1365,9	1536,6	1707,4
32	297,7	595,5	892,2	1188,9	1485,7	1782,4	2079,2	2375,9	2672,6	2969,4
40	437,1	874,2	1311,3	1748,4	2185,5	2622,5	3059,6	3496,7	3933,8	4370,9

Tabla nº04. Capacidad mecánica en KN según el número de barras de acero B 400 S [10]

Podemos deducir que, para cumplir con la solicitud mecánica, el número mínimo de barras por metro de paño sería de 2 unidades, utilizando Ø40mm, y en el lado opuesto, el conjunto de 10 barras de Ø14 también lograrían satisfacer nuestros esfuerzos máximos. Un punto de equilibrio, y optimizado de peso, sería utilizar un armado de 7 barras de Ø14mm por cada metro de bóveda y muro.

Para conformar la armadura (conjunto de barras), la metodología y el estudio de elementos finitos nos aporta información a través de la representación del vector de tensiones principales que hemos visto anteriormente.

A continuación, se muestran unas imágenes con detalle de cómo se orientan los vectores:

En la bóveda se deben armar una especie de óvalos concéntricos respecto a los puntos de doble curvatura, en los cinco puntos de máxima altura.

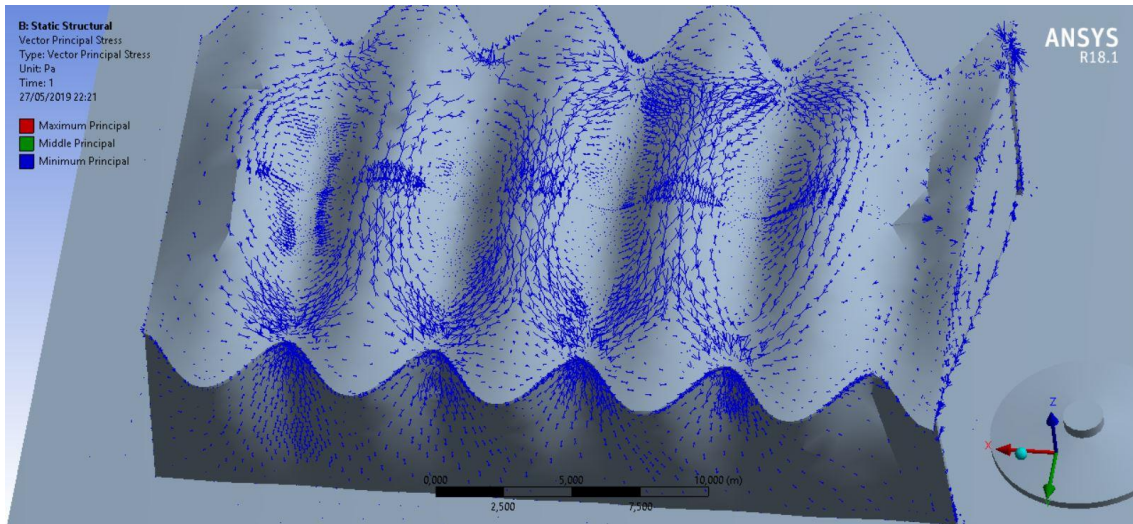


Figura nº26. Vector de tensiones principales en forma de óvalos (Propia del TFG)

Respecto a los muros laterales y el campanario, la disposición recomendada es colocar armados verticales, perpendiculares al suelo concentrados en las zonas de unión con la cubierta y siguiendo la sinuosidad de la geometría en los muros.

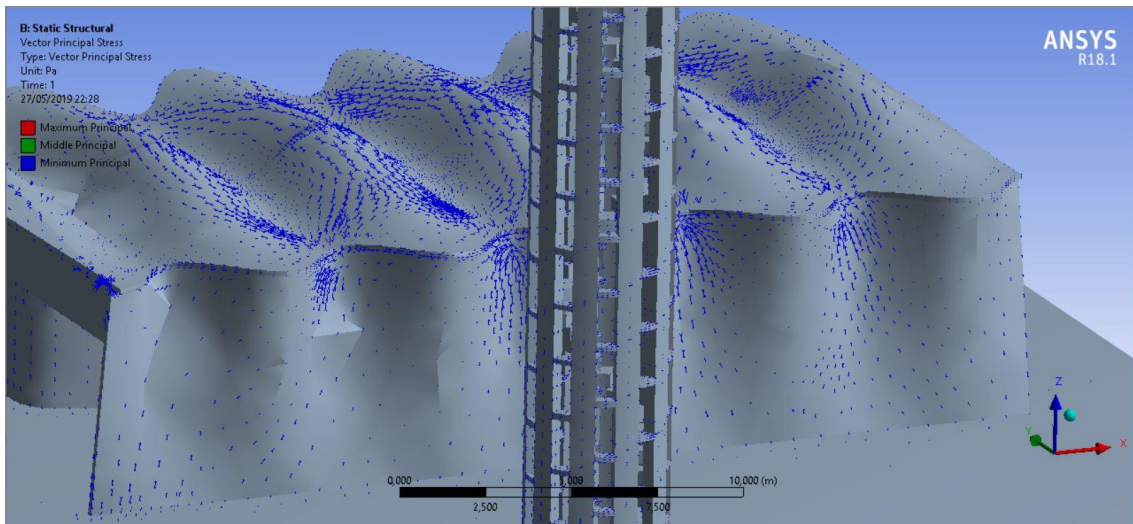


Figura nº27. Vector de tensiones principales en muros laterales (Propia del TFG)

En el campanario, aún no haciendo falta colocar armadura porque los esfuerzos principales son a compresión, los resultados recomendarían plantear un armado reticular vertical y concéntrico:

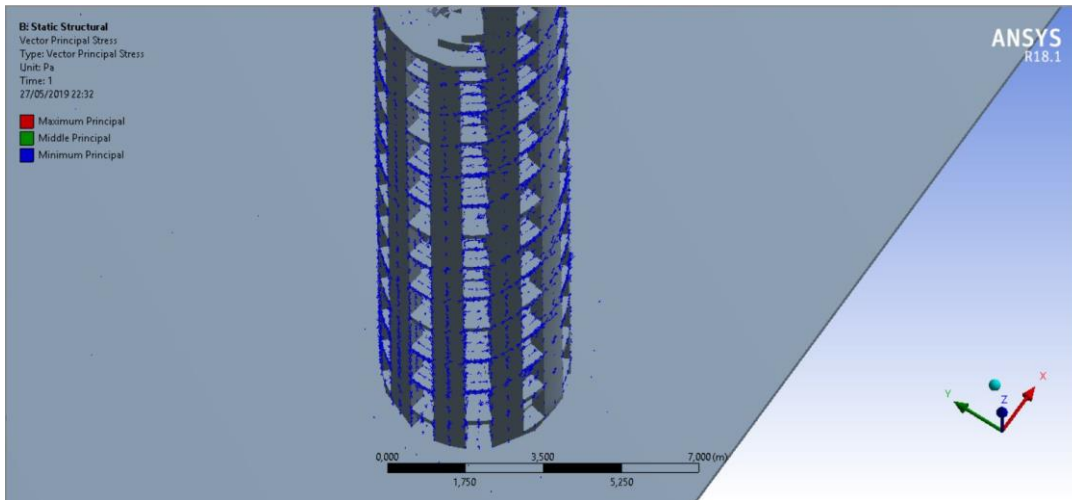


Figura nº28. Vector de tensiones principales en campanario (Propia del TFG)

Revisando fotos de la construcción de Dieste, y aunque no se aprecian los diámetros ni la cantidad de barras utilizadas, sí se observa cómo se conformaban antes de colocar, y los esfuerzos de trabajo empleados en la época.

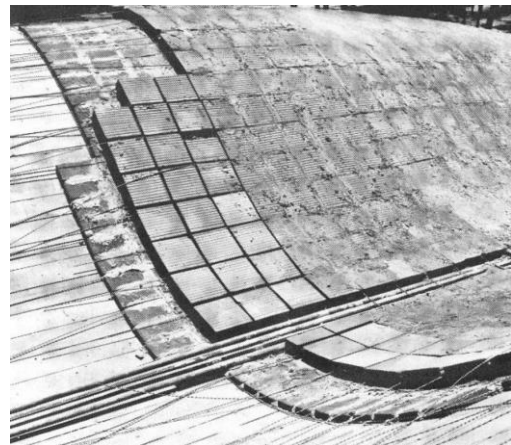


Imagen nº02 y nº03. Construcción de la cubierta ondulada con las piezas en retícula y el armado homogéneo ([02])



Imagen nº04 y nº05. Inicio de Obras. Imágenes extraídas del archivo Dieste & Montañez.[02]



Imagen nº06. Eladio Dieste frente a la Iglesia de Cristo Obrero en construcción, a fines de 1959.
Fotografía de M. Sassón. Archivo privado de la empresa Dieste-Montañez.

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Conclusiones

Líneas futuras

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Conclusiones

La conclusión principal de este trabajo es poner en valor, una vez más, la figura de Eladio Dieste y su equipo, en cuanto que fueron capaces de utilizar todo el conocimiento técnico de su época para calcular magníficas estructuras, y cómo, con la ayuda de técnicas y conocimiento actual, aunque podría ser más simple, los resultados llegan a coincidir.

También, gracias a este trabajo, podemos disponer de un resumen bibliográfico sobre Eladio Dieste, así como el modelo tridimensional, parametrizado, de la Iglesia de Cristo Obrero.

Líneas futuras

Como continuación de este trabajo, se pueden plantear simulaciones de diseño cambiando la curvatura de las bóvedas, con el objetivo de llevar al límite la propia resistencia del acero, y calcular la máxima luz, que por ejemplo, podríamos cubrir con un mallado de acero determinado. O variar la parametrización de las curvaturas empleadas por Dieste para reducir tanto los esfuerzos axiales, que nos permita replantear la obra, en miniatura, como lo habría hecho un constructor en la era románica.

Otra línea abierta para el uso de la cerámica armada, la muestran J. Trias de Bes y P. Casariego en su artículo de 2016 [07] donde explican como aunar la técnica tradicional con los procesos industriales para conseguir prefabricar hormigón armado en el que se incorpora, en el proceso constructivo, un tejido cerámico. El artículo, entre otras conclusiones, nos muestra que es el humanismo, el que aporta la concordia y solución de compromiso entre prefabricados constructivos y ordenamiento dentro del proceso proyectual arquitectónico.

El uso cada vez más extendido del acero y del hormigón armado plantea en la arquitectura moderna una diferenciación entre estructura, cerramiento y acabado. En nuestros tiempos (principios del siglo XXI), la cerámica ya no se usa para resolver ninguna estructura, pero es casi imprescindible en las otras dos tareas, tanto como revestimiento y como acabados. Por no decir de su uso industrial (filtración, tratamiento de residuos, papeleras, herramientas de corte, etc.) y formando parte de materiales compuestos.

La metodología usada en este trabajo de fin de grado puede usarse para analizar otras obras de Eladio Dieste o de otros arquitectos como Robert Maillart (1872-1940), Rafael Guastavino Expósito (1873-1950), Eugène Freyssinet (1879-1962), Pier Luigi Nervi (1891-1979), Eduardo Torroja (1899-1961), Luis Barragán Morfín (1902-1988), Félix Candela Outeriño (1910-1997), Heinz Isler (1926-2009), Rogelio Salmons (1929-2007) o Vicente Sarrablo Moreno (1964-), todos ellos, grandes genios que supieron conjugar las ciencias matemáticas, física, arquitectura e ingeniería.

ANEXO 1. ELADIO DIESTE

Eladio Dieste, uruguayo

Eladio Dieste, ingeniero, arquitecto y creador

ANEXO 1. ELADIO DESTE

Eladio Dieste, uruguayo

Uruguay es nación de América del Sur, ubicada entre otras dos grandes naciones, Brasil y Argentina. Un territorio de tan sólo 176.000 km², relativamente despoblado con unos tres millones de habitantes y cuya geografía está signada por una pampa ondulada que cae suavemente sobre el Océano Atlántico y sobre el Río de la Plata. Uruguay tuvo una temprana modernización a principios del siglo XX, con una importante inmigración europea, crecimiento económico y redistribución social. La segunda mitad del siglo XX estuvo marcada por crisis estructurales.

La familia Dieste provenía de Rianjo, un pueblo de La Coruña. Su bisabuelo fue ministro de la Alta Corte de España y su abuelo estudió para Oficial de Estado Mayor. Su padre, Eladio Dieste (1880 - 1972), fue profesor de historia y masón. Su madre, Elisa Saint Martin (1884 -1974), profesora de francés. Se establecieron primero en Salto donde nació Ariel (1913) y luego en Artigas. Allí nacieron Eladio (1917) y Saúl (1921). El hogar paterno se puede caracterizar como de clase media, muy intelectual y de pensamiento liberal.

Don Eladio Dieste nació en Artigas, el 1 de diciembre de 1917.

Se casó con Elisabeth Friedheim, fundamental apoyo familiar y fueron padres de 11 hijos.

El Montevideo previo a la segunda guerra mundial era un ambiente realmente interesante. En Europa se presentaba que la primera guerra no había sido suficiente demostración de crueldad humana y muchas de las heridas no habían quedado cerradas. La década de 1930 fue una década de muchos emigrantes hacia el Uruguay, un país de futuro, una economía rica, un lugar para emigrar. La personalidad de Eladio Dieste se entiende con su obra. Es sólida, segura y amigable. Los que le conocieron dicen que se sintieron iluminados por su forma de vivir, crear y comprender la esencia de las cosas. Era capaz de trascender lo puramente técnico para conectar cualquier estructura con su trasfondo útil para la sociedad y rayando el contexto espiritual. Sus alumnos dijeron que acudía a clase con un aspecto entre catedrático y obrero de la construcción.

Eladio Dieste, ingeniero

En 1936 Eladio Dieste se matricula en la Facultad de Ingeniería de Montevideo. En 1943 termina sus estudios, y ese mismo año ingresa en la facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. ¿Qué sucedía en la Facultad de Ingeniería? En 1934 se gradúan los primeros ingenieros industriales. El premio Nobel en Física, Enrico Fermi (1901,-1954), visita la facultad. En 1936 Julio Rey Pastor (1888,-1962) dicta importantes cursos de matemática. También llegó Tulio Levi-Civita (1873,-1941) y Esteban Terradas (1883,-1950), y otros destacados científicos e ingenieros. La guerra civil en España y la segunda guerra mundial contribuyeron a que muchos físicos y técnicos europeos visitaran y hasta residieran en el Río de la Plata. En la Facultad de Ingeniería había universitarios entusiastas e inquietos, que creaban planes de estudio, nuevas carreras y modernos laboratorios. Mejoraban las ciencias básicas y contrataban a profesores extranjeros. Este fenómeno posiblemente se deba a la extensa y fecunda dirección de Eduardo García de Zúñiga (1867, 1951). Lógicamente, ésta fue la razón por la que todos los ingenieros salidos de la facultad durante esta época quedaron marcados con idéntico cuño: solidez de formación básica, respeto por la matemática y la física y un profundo espíritu innovador.

En esta generación se formó Eladio Dieste (y también Eugenio Montañez, compañero de promoción). Enamorado de la cerámica como material, la siente y la estudia para sacar de ella todo lo que un análisis esencial pudiese dar. Y así crea procedimientos constructivos de gran ingenio técnico y proyecta en sus primeros años, estructuras de grandes luces para los más variados usos.

Sus estructuras para usos industriales son sobrias, usa el ladrillo y plasma siempre el anhelo de salvar importantes luces con sencillez constructiva, y siempre creando un ambiente de trabajo y una luz que respeta el sentimiento humano por la belleza, y por la funcionalidad del edificio.

Años después, el mundo de Dieste se llena de catenarias, sinusoides, conoides, superficies regladas y otras formas matemáticas, allí donde los demás trazaban rectas y planos. Más de 25 años después de matricularse en la Facultad de Ingeniería, estudió con apasionamiento el problema del pandeo y no vaciló en utilizar ecuaciones diferenciales, integrales elípticas y calculadoras.

Fue profesor de matemáticas. Varias veces decano de la Facultad de Ingeniería y adquirió una importante colección de obras clásicas de la ciencia y la tecnología para la biblioteca de la Facultad.

Académico Ad Honorem de la Academia Nacional de Ingeniería de Uruguay. Académico correspondiente de las de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y de la Academia Nacional de Bellas Artes de la República Argentina. Nombrado profesor Honoris Causa de la Universidad de la República. Reconocido ganador de premios por su obra en Ecuador, Chile, Argentina, Estados Unidos y España. Realizó ciclos de conferencias en casi todos los países de América, y de Europa.

El 9 de diciembre de 2001, la Universidad de Montevideo le confirió el Doctorado Honoris en una ceremonia presidida por el Doctor Mariano Brito, Rector de la Universidad de Montevideo.

Desde el punto de vista profesional, en 1945 comenzó a trabajar en la constructora danesa Christiani y Nielsen, siendo también, jefe de la Oficina Técnica en la Dirección de Arquitectura del Ministerio de Obras Públicas. En este periodo construyó la bóveda para la tejeduría de algodón MAUSA, (1947) y la de IPUSA, (1948). Estos diseños empleaban directriz elíptica, eran autoportantes y de hormigón. Todavía estamos lejos de la cerámica armada. En 1948 dejó a Christiani y Nielsen para convertirse en ingeniero director de la empresa Viermond S.A. En 1955, Dieste, asociado con Eugenio Montañez, ganó la licitación para construir un depósito para ANCAP en Capurro. Sobre pórticos de hormigón de 40 metros de largo, se construyeron las bóvedas cilíndricas, de ladrillo armado, de 8 metros de luz. Comenzaba aquí la larga aventura de las bóvedas de cerámica armada. También en 1955 construyeron los depósitos Frugoni, en Montevideo: 22 metros de luz y 3.500 m² techados. A éste siguió, en 1956, el depósito para el diario El País y en 1957 los graneros para el BROU en Cardona y Tarariras. El año siguiente Dieste abandonó Viermond.

En el periodo entre 1958 y 1971 realizó un desarrollo completo de las bóvedas de cerámica armada. Primero de forma experimental y luego profundizando el estudio teórico, Dieste y Montañez refinaron esta tecnología hasta convertirla en una nueva manera de construir. De hecho, esta memoria trata de cerrar el ciclo de las tres fases de estudio: EMPIRICO – TEORICO – COMPUTACIONAL.

En 1963 la tecnología ya está madura y se publica el primer artículo teórico sobre el tema. Encontramos aquí todos los elementos de la obra posterior de Dieste: bóvedas de doble curvatura, bóvedas autoportantes, tanques de agua, diafragmas, etc. También en 1963, en el Gimnasio del Liceo de Montevideo, aparece una de las primeras bóvedas de gran tamaño. Al año siguiente, para Auto Palace, también en Montevideo, llegó a 30 metros de luz con otra bóveda autoportante. Dieste continuó explorando las posibilidades de las cáscaras autoportantes hasta límites difíciles de creer, como ocurre en la Estación de Omnibus o en Refrescos del Norte, ambas realizadas en la ciudad uruguaya de Salto.

Otra línea diferente de aplicación de las grandes bóvedas se dirigió hacia la construcción de silos y depósitos de materiales en polvo. Si bien obedecen a la misma teoría básica, estas estructuras poseen una gran flecha y se apoyan directamente en el suelo, sin pilares ni vigas. Además, deben soportar los esfuerzos laterales que les aplica el material almacenado. En 1965 construyeron Fosfato Thomas, en Montevideo: una impresionante bóveda de 30 metros de luz, 15 metros de flecha, con una gran curvatura. Estas dimensiones no fueron sobrepasadas por las obras posteriores de 1974: el Silo de Vergara, el de Young o los de Nueva Palmira.

Eladio Dieste, arquitecto

Resulta sorprendente el respeto y la admiración que Dieste despierta entre los arquitectos. Y esto no es nada frecuente en un ingeniero. Debe entenderse que los primeros, menos inhibidos y asustadizos que los segundos, no han vacilado en declararlo maestro de la arquitectura hace mucho más tiempo que los ingenieros. En 1978, Mariano Arana le pregunta, literalmente, si se considera arquitecto y la respuesta de Dieste es clara y elocuente: “No. Para ser arquitecto se necesita una formación académica que no tengo. Podría encarar, como mucho, algunos problemas muy simples de arquitectura.”

Según el propio Dieste: *La Iglesia de Atlántida fue su Facultad de Arquitectura.*

Por esta razón y por el papel fundamental que posee dentro de toda su obra, ha sido elegida en este trabajo fin de grado para analizar computacionalmente su diseño y construcción. No he conseguido información completa a modo de diario, con todos los acontecimientos que llevaron a realizar esta obra, pero sí he podido leer relatos parciales:

Decía Dieste: “ (...) Para este lugar me encargaron, allá por 1952, una bóveda que después de un proceso realmente novelesco y divertido, que sería interesante contar si pudiera hacerse sin herir a nadie, se transformó en la iglesia (...) La iglesia me fue encargada por un hombre que tenía allí una obra de tipo piadoso, una obra de catequesis. Me acuerdo de que me vino a ver porque quería una bóveda. Le dije que se dirigiera a un arquitecto, pero él insistía conmigo y con la bóveda. Nos peleábamos más o menos una vez por año. Cuando discutíamos, lo hacíamos por el aspecto formal de la iglesia. Él argumentaba que no debía preocuparme tanto por esa cuestión ya que, después de todo, la gente del lugar era muy ignorante y no tenía ningún discernimiento estético. Entonces le contesté: Mire, si nuestra clase, si usted y yo, les sacáramos por un momento el pie de encima, ellos serían capaces de hacer de nuevo la catedral de Chartres. Yo a veces me asustaba, cuando me daba cuenta de las cosas que le decía. Pero no solo lo hacía provocado por él –que era de todos modos una persona excelente– sino que estos estallidos me conmovían a mí mismo. Finalmente, allá por el 1956, principios del 1957, acepté hacer la iglesia. Me comprometí a construirla por el precio de un galpón. (...) Fueron casi dos años de locura. Tenía que pasar en el sitio prácticamente más de medio día y ganarme la vida después de las cinco de la tarde. Sí, fue una locura, pero... lo tenía que hacer, no tenía alternativa, se me había vuelto una verdadera obsesión. (...) “

Al decir de Karl Ludwig Diehl: “a partir de Atlántida se revolucionó todo un continente”.

Los arquitectos de toda América Latina comenzaron a utilizar el ladrillo. José Ignacio Díaz en Argentina, Rogelio Salmons en Colombia, Barraco Barrios en Perú. A partir de este comienzo extraordinariamente exitoso, se suceden otras obras arquitectónicas. En 1961 realiza el proyecto de la Iglesia de Nuestra Señora de Lourdes en Malvín. En 1967 restauró la Iglesia de San Pedro de Durazno. El trabajo de Eladio Dieste se incorpora a una arquitectura uruguaya de una alta calidad media, distinguiéndose por emplear una geometría inusual y un diseño racional y él mismo agregaría una tercera característica propia: el principio de economía al que le daba una importancia asombrosa.

La obra de Dieste posee la triple característica de ser espectacular por su forma, tratarse de soluciones arquitectónicas muy simples, y simultáneamente de bajo coste. Creo que la respuesta a la pregunta de Arana resumía perfectamente las aspiraciones de Dieste.

Eladio Dieste, creador

Un genio de la talla de Dieste, además de una enorme cultura técnica, posee una visión del mundo muy precisa. Dieste es un pensador católico. Todos sus pensamientos, hasta los más increíbles detalles, descansan sobre una base teológica. Es muy interesante descubrir que su concepción adelantaba a lo que serían reformas del Concilio Vaticano II, algunos años después.

La base del pensamiento de Dieste se encuentra en lo que él llamaba “economía cósmica”, una visión del orden en el universo, principio por el cual, todo lo que hagamos debe estar de acuerdo con un orden honesto. A modo de ejemplo, Dieste citaba un pasaje de una novela de Knut Hamsun. (1859, - 1952) premio Nobel de literatura en 1920, que reproduzco a continuación:

La acción sucede en un balneario de lujo en el norte de Noruega a la que los suministros llegaban cada día por ferrocarril. Un día se quedan sin carne y el gerente, enterado de que un campesino de los alrededores tiene un ternero, se lo quiere comprar. El campesino le dice que no se lo puede vender porque es muy pronto para su sacrificio. El gerente le contesta que se la pagará como si estuviera criado y fuese el momento, cubriendo todos los gastos extra, pero el campesino no se aparta de su postura, que en el fondo expresa que hay un orden independiente del dinero y de cualquier otro interés. El granjero le pide que regrese en el mes de mayo y que entonces le venderá la ternera a su precio justo, haciendo una excepción, termina diciendo, si no tuvieran ustedes otra cosa que comer, sería suya.

De la economía cósmica nace la concepción estética de Dieste. Las grandes obras del pasado (pirámides, catedrales, puentes, etc..) nos conmueven y atraen no sólo por sus dimensiones o su audacia constructiva, sino porque resultan misteriosamente expresivas y abren un canal de comprensión y comunicación con el mundo. De aquí nace la incesante búsqueda de estructuras cada vez más simples, más esbeltas y más sutiles. No es otra cosa que la búsqueda de la economía cósmica. En dirección contraria, el pensamiento de Dieste aborrece el despilfarro y critica a las sociedades opulentas del Primer Mundo. Dieste protestará una y otra vez contra el servilismo tecnológico y científico.

En el acto para ser investido Doctor Honoris Causa de la Universidad de la República, el 10 de septiembre de 1993 en la Iglesia de Atlántida, su exposición se centró en el tema del diseño de útiles de desencofrado y de precompresión. Los tornillos usuales tienen un rendimiento muy bajo, dijo, se aprovecha el 25% del trabajo realizado para apretarlos y no le parecía lógico perder tanta potencia. Todos esperaban una lección magistral sobre la cerámica armada, comentarios sobre la independencia tecnológica o temas similares. Hubo ahí un mensaje muy propio de su pensamiento: la consideración básica de que el diseño debía conseguir el ahorro de trabajo humano y la tecnología debía estar al servicio de este fin.

En 1971 comenzaron algunos cambios. Por un lado, Dieste hizo una breve incursión en la actividad política, por otro lado, Montañez, su socio, se radicó en Brasil y comenzaron las grandes obras para su empresa. Dos años después se implantaría la dictadura de Bordaberry en Uruguay (1973, -1985) y entre otras medidas, se incrementó la presencia militar en la conducción del estado, se prohibieron las ideas y agrupaciones marxistas, se eliminó la democracia representativa y se intervino la universidad. Se terminaría de este modo la extensa actividad universitaria de Eladio Dieste.

En este oscuro periodo del país, tuvo una activa tarea como profesor visitante en diversas universidades, como consultor en la Represa de Salto Grande y manteniendo su prolífico espíritu creador en nuevas obras.

En España, se le concedió en 1988 el premio de la I Bienal Iberoamericana de Arquitectura e Ingeniería Civil. En Ecuador, el de la Bienal de 1990. Ese mismo año el premio Gabriela Mistral de la OEA y en 1991 el Premio América al conjunto de su obra.

Don Eladio Dieste muere en Montevideo, el 20 de Julio del 2000, a los 82 años.

El año 2005 fue designado como “año Eladio Dieste” por parte del Museo de Arte Moderno de Nueva York, la universidad de Princeton y el MIT de Massachusetts. Entre el 7 y 8 de octubre de 2006 se celebró en Uruguay el Día del Patrimonio bajo el lema “Tradición e Innovación. Eladio Dieste: el señor de los ladrillos”. En 2011 se publicó el libro “Escritos sobre arquitectura. Eladio Dieste”, por Laszlo Erdelyi y Graciela Silvestri.

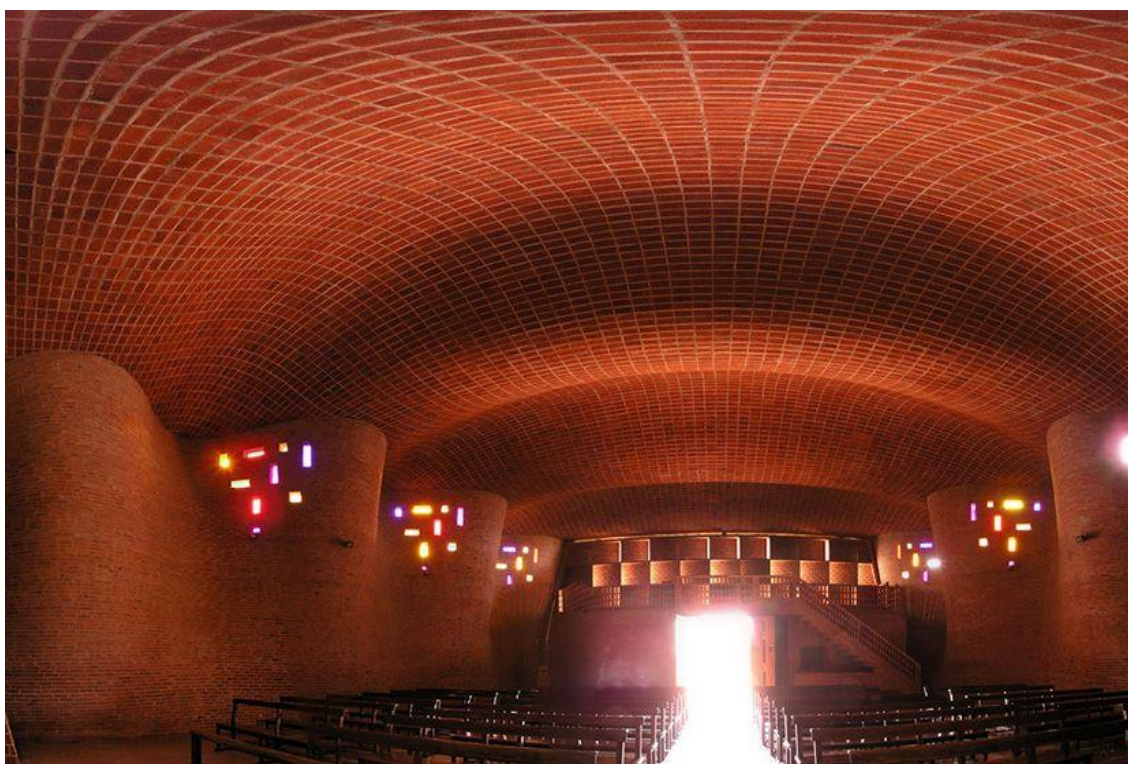


Imagen nº07. Iglesia de Cristo Obrero. Imagen obtenida de wikiarquitectura
<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/iglesia-de-atlantida/>

ANEXO 2. LA OBRA DE ELADIO DIESTE

La cerámica armada
Eladio y los elementos finitos
La iglesia de Cristo Obrero en Atlántida

ANEXO 2. LA OBRA DE ELADIO DIESTE

La cerámica armada

La cerámica armada, como hemos comentado, consiste en la colocación de armadura de acero en la unión de dos filas de ladrillos. El número de hiladas en las que se coloca la armadura es en función de la luz que se debe vencer. Al mortero de estas hiladas de ladrillos se le incrementa la dosificación de cemento. La armadura colocada debe ser de una aleación resistente a la corrosión

La cerámica armada es una tecnología de construcción de jerarquía comparable al hormigón armado, no se trata solamente de una tecnología caprichosa, subdesarrollada o curiosa. La tierra cocida, el ladrillo, posee una relación resistencia/peso muy alto. Si bien la idea de armar la cerámica es una idea que prolonga de modo natural la técnica de construcción del cemento armado, los campos de acción son diferentes.

El atractivo básico de resolver las cubiertas con cerámica armada es, básicamente, su costo material reducido (a los bajos precio/hora de mano de obra de aquellos tiempos). La cifra mencionada para el costo por metro cuadrado de la Iglesia de Atlántida fue de 30 dólares por metro cuadrado (de 1959). El precio de construcción (2017) se encuentra entre 180 y 200 dólares por metro cuadrado de estructura y cubierta. Es una forma de construcción intensiva en capital, correspondiente al tipo de actividades industriales de las economías desarrolladas. Hoy en día, con altos costes de mano de obra, se queda relegada por detrás de hormigón armado, y de uso exclusivo a construcciones singulares.

Desde el primer momento quedó claro que la cerámica armada permitía construir estructuras muy esbeltas. Se observaba que en un arco de catenaria de 100 metros de luz y 10 metros de flecha, la tensión máxima sobre las piezas de cerámica es de solamente 27 kilos por centímetro cuadrado. Cualquier buen ladrillo resiste con holgura esta cifra. Esta observación muestra que es posible construir cáscaras armadas de luces enormes (se han llegado a construir hasta con 50 metros de luz) siempre que sean elásticamente estables, es decir, que resistan al pandeo. Pero el problema del pandeo de las bóvedas esbeltas estaba lejos de estar resuelto. Si se comprime una varilla esbelta en la dirección axial, se llega a una fuerza límite en la cual la situación de compresión conduce a una situación inestable: a partir de este momento la única condición de equilibrio estable es con la varilla flexionada. El bastón de caña de Chaplin es una demostración, conocida por todos, del fenómeno de pandeo. El fenómeno del pandeo es uno de los raros fenómenos físicos donde parece violarse el sentido común, la causalidad y la simetría de la naturaleza. Aquí ocurre que en un fenómeno simétrico –la carga axial de la varilla– conduce a una consecuencia asimétrica, la desviación lateral hacia una forma curva, estable. En forma intuitiva, parecería existir un principio general que establecería que causas simétricas provocan resultados simétricos. Sin embargo, no es así. Causas simétricas a veces producen efectos simétricos y la respuesta estable es asimétrica. La otra característica especial del pandeo es violar la ley lineal entre fuerzas y deformaciones y, por lo tanto, las leyes de superposición de cargas. En efecto, si existe una carga crítica por encima de la cual la configuración es inestable, entonces ni la deformación ni la superposición de cargas o deformaciones correspondientes serán válidas.

La existencia del fenómeno del pandeo fue advertida por Daniel Bernoulli (1700, -1782) y resuelta en una primera versión matemática por Leonhard Euler (1707, -1783) en 1744. Poincaré (que dominó todo el pensamiento del análisis matemático del siglo XX) ya hablaba también de puntos de bifurcación en las ecuaciones del equilibrio. En los tratados de elasticidad el tratamiento que se da al tema es esencialmente matemático y de escaso uso técnico. La literatura –aún lamás especializada, por ejemplo, el clásico *Theory of Elastic Stability* de S. Timoshenko, 1936, como observó Dieste, dan escaso tratamiento a los problemas que pueden ser de aplicación a las bóvedas.

El tema del pandeo de los arcos de catenaria y de las bóvedas de cerámica armada ocupó durante mucho tiempo a Dieste. Hacia 1963 la respuesta que daba era experimental pura: carga de la bóveda o construcción de un arco experimental. El problema del pandeo es atacable por diversos caminos y todos ellos fueron transitados por Dieste.

En primer lugar, debemos considerar la solución analítica exacta (esto es, sin aproximar la ecuación de la curvatura de la elástica), propia de la formación que daba la Facultad de Ingeniería durante la primera mitad del siglo XX. Este camino, aún en casos simples, conduce muy rápidamente a dificultades analíticas enormes. En su trabajo sobre el pandeo, Dieste considera la solución analítica del problema de la barra comprimida en forma excéntrica o con una fuerza transversal.

Las expresiones analíticas le muestran que la carga crítica calculada por Euler representa una frontera para todos los casos (el punto de bifurcación de Poincaré): a medida que nos acercamos a la carga crítica, aumentan mucho los esfuerzos sobre la barra. En la medida que se emplee un generoso coeficiente de seguridad (5 por ejemplo, como no es raro en las construcciones civiles) se está muy lejos de llegar a la zona de comportamiento peligroso, aún con cargas excéntricas o laterales.

Una segunda metodología que se pudo emplear es usando la ecuación de la energía elástica. Esta ecuación permite calcular la energía una vez conocida la elástica. Las situaciones de equilibrio estable ocurren en la solución de este problema de cálculo de variaciones. Resulta entonces que no es demasiado importante la curva elegida para calcular la carga crítica, en todo caso se obtendrá un valor peor.

La importancia de la metodología de la energía es que permite introducir una tercera metodología: las aproximaciones sucesivas.

Esta metodología consiste en suponer una elástica plausible, calcular el diagrama de momentos correspondiente y luego volver a calcular la elástica. Este proceso converge muy rápidamente.

Cuando se pasa de la barra a los arcos y las bóvedas de doble curvatura, todos los métodos se vuelven más laboriosos. Las soluciones analíticas son imposibles, solamente los métodos de aproximaciones sucesivas tienen viabilidad práctica. Estos métodos llevaron a Dieste a calcular mediante la (recién llegada) computadora de la Universidad las tablas necesarias para el cálculo de las bóvedas catenarias. El cálculo de las bóvedas fue algo que se desarrolló de modo progresivo, desde simples argumentos intuitivos, hasta una teoría completa, donde los problemas de pandeo se pueden calcular con buena precisión.

Las singulares obras en cerámica armada de Dieste solo pueden entenderse a partir de los saltos técnicos que realiza en el proceso de construcción. La forma de colocar ladrillos que plantea Dieste ya no es el tradicional contrapeado ni aparejado. Al incluir barras y alambres de acero de forma regular y homogénea en el proceso de construcción se genera una retícula bidireccional entretejiendo la superficie en todo su conjunto con un material dúctil. Todo ello permite a Dieste crear la que él denomina “cerámica estructural”, donde varía la proporción de armado en función de la ductilidad conjunta que desee generar en la obra.

La ventaja de la “cerámica estructural” frente al hormigón armado, está en que al existir muy poco mortero de relleno en la retícula de las juntas entre los ladrillos se disminuye el tiempo del “tirado”, pudiendo desencofrar en solo 14 horas (no días, como se pudiera pensar), agilizándose con ello enormemente la velocidad de ejecución de las obras, e incidiendo positivamente en la economía global de la edificación.

Así mismo, al no tener que emplear el aparejo en estas obras, donde el armado está dispuesto en retícula generando la trabazón entre las piezas de ladrillo, ofreciéndoles ductilidad, se añade la posibilidad de poder generar superficies regladas debidamente armadas bidireccionalmente, siguiendo las ondulaciones propias de las curvaturas de este tipo de superficies, y con mucha mayor ligereza que si fueran macizas de hormigón.

La aportación constructiva de Eladio Dieste, con sus bóvedas de ladrillo y formas modernas, sigue la línea de Gaudí y Guastavino, que también se aprecia en Torroja, Candela y Calatrava. El sistema permite grandes luces (hasta 160 metros), amplias superficies diáfanas y bajos costes (por ejemplo, varias iglesias encargadas a Dieste por Alcalá de Henares, Madrid, con capacidad de 500 personas y a un coste de entre 270.000 y 420.000 euros del año 2000.

Eladio y los elementos finitos

Hacia 1985 las técnicas de cálculo de bóvedas, mediante elementos finitos, están a punto. Además, como resultado especializado, surge lo que Dieste llama el teorema básico. Dieste considera que la bóveda se puede pensar como bandas (a lo largo de la generatriz) o como franjas (a lo largo de la directriz). Dentro de estos elementos, considera la franja de apoyo en los extremos de los pilares, las franjas genéricas que corresponden a una sección cualquiera y la franja básica, al medio de la luz, con propiedades especiales.

Algunas consideraciones físicas le permitirán simplificar el estudio de los flectores y elásticas al pasar de la franja básica a la franja central y obtener resultados que tienen un error pequeño. Dentro de este estudio surge un teorema, llamado teorema básico que vincula la integral de los momentos a lo largo de una directriz de la bóveda con el momento en cada punto.

No cabe duda de que la complejidad de los problemas de pandeo condujo a Dieste a emplear en forma temprana calculadoras y computadoras electrónicas de su época. En 1964, Dieste ya colaboraba programando tablas para bóvedas catenarias en el Centro de Computación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo. La empresa Dieste y Montañez fue de las primeras en adquirir computadoras. Por todo esto no deja de ser interesante la evolución del pensamiento de Dieste acerca de los ordenadores, que pasó de pensar en ellos como una calculadora rápida y potente, pero inerte, en 1980, a pensar en ellos como una herramienta importante de su “economía cósmica”, capaz de aligerar la carga de trabajo humano.

Con todo lo mejorable de los métodos de cálculo de la época, en toda la dilatada carrera de Dieste y de su empresa de construcción solamente conoció dos accidentes, ninguno de ellos provocado por fallas de la tecnología de la cerámica armada ni de su cálculo. El primero ocurrió el 20 de enero de 1978 cuando se desplomaron las bóvedas de Refrescos del Norte S.A. en Salto, en el momento de quitar el apuntalamiento. Se debía a unas barras de hierro omitidos en una losa del borde de la construcción. El segundo accidente fue un desastre y afectó a Dieste de un modo imborrable. El 25 de mayo de 1987 la obra de la planta de zumos de Azucitrus S.A. en Paysandú se desplomó y murieron algunos de sus hombres. Este fue un doloroso episodio que culminó en un juicio y un expediente técnico y judicial. Después de las inspecciones y el trabajo pericial, quedó demostrado que el cemento Portland que ANCAP había suministrado a granel no correspondía a la velocidad de fraguado solicitada. No existía responsabilidad técnica de la empresa constructora ni de sus técnicos. Fue un error en el proveedor del cemento. El fallo judicial aparecería años después, cuando la empresa ya había construido nuevamente la obra, pero ninguno de los daños más importantes podía ser verdaderamente reparado. El dinero de la indemnización fue destinado por Dieste para las familias de los hombres fallecidos.

La Iglesia de Cristo Obrero en Atlántida

Una iglesia pensada para los habitantes del lugar, Cristo Obrero, en 1952, y ejecutada entre 1958 y 1960. Se encuentra cerca de Atlántida, una de las ciudades balnearias más turísticas del litoral de Uruguay.

“(...) Las primeras consultas para la posible construcción de una iglesia en la Estación Atlántida, me las hicieron hacia 1952 o 1953, cuando aún estaba trabajando en la empresa Viermond. Me proponían que me encargara del cálculo y de la construcción de la estructura, quedando el proyecto arquitectónico a cargo del donante. Aduje que construir una iglesia era un compromiso muy serio y que debería conseguirse un arquitecto con el que colaboraría con gusto en el aspecto estructural. Incluso proporcioné una lista de arquitectos posibles. Pero el donante insistió en su idea, año tras año. Recuerdo que en una ocasión me dijo que en una iglesia lo importante era lo que sucedía dentro; que el edificio no importaba. Le contesté que la Iglesia siempre tuvo la sabiduría de rodear el oficio religioso de una dignidad capaz de expresar visualmente lo sagrado. (...)”

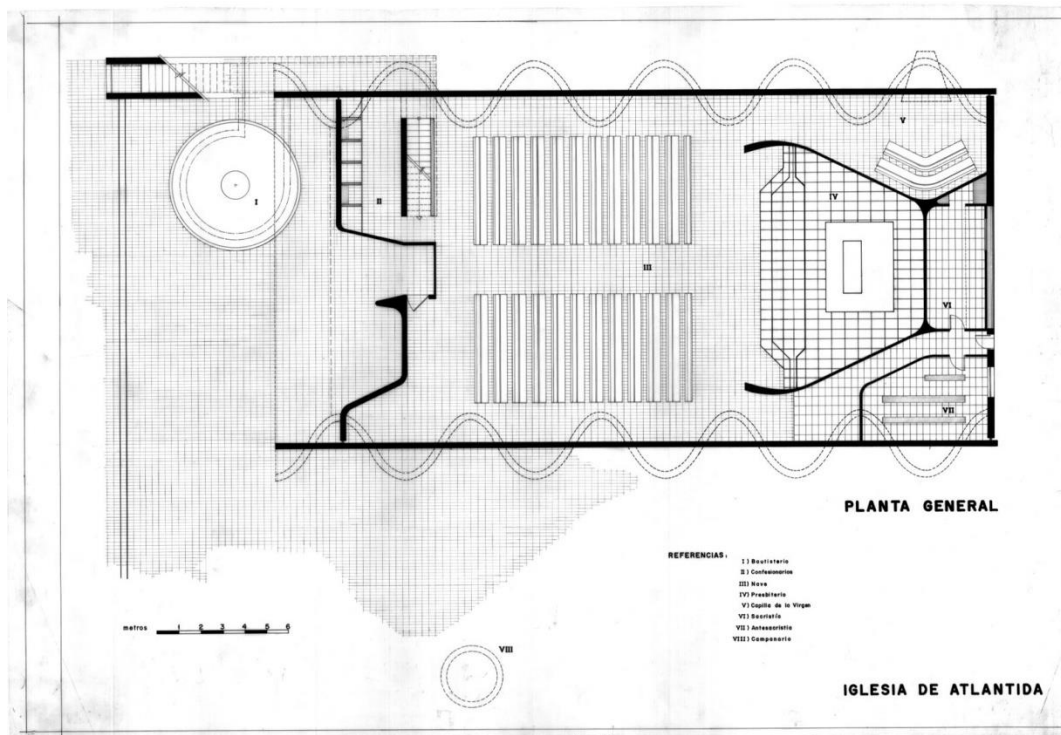
Es de toda justicia mencionar primero al impulsor de esta obra. Este protagonista se llamaba Alberto Giudice. Un acaudalado señor de la localidad, que es descrita por el mismo Dieste, como *“una de esas pedanías que no llegan a ser una aldea y que muestran, con un vistazo a su urbanismo, el desorden y la injusticia de nuestras sociedades. Es un pueblo de obreros y campesinos que surten el balneario de lechugas, de albañiles y de muchachas de servicio”*. El promotor quería una pequeña edificación, cerca de su casa, para poder escuchar misa sin tener que ir a Atlántida.

El compromiso adquirido resultó ser la fusión perfecta entre el genio ingenieril reconocido y un aspirante a arquitecto que asomaba en las inquietudes de Eladio Dieste. Realmente fue la primera exploración que realiza en la disciplina arquitectónica, pero involucra todos sus estudios en cuanto a sistemas constructivos se refiere y le servirá para publicar el desarrollo de lo que se denominaría “cerámica armada”.

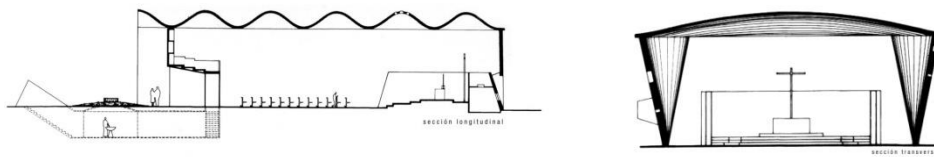
Eladio tenía gran admiración por la construcción en la Edad Media, por cómo se hicieron las catedrales, donde cada uno llevaba su piedra y la ponía en su sitio. El quería hacer eso, ladrillo a ladrillo, y al igual que en el resto de sus obras, el concepto de diseño se basó en la racionalidad constructiva, construyendo un volumen innovador y acorde al lugar.

Dieste diseña un edificio de planta rectangular de 16 x 30 m y una cubierta que cubre una luz de 19 m en su lado más ancho. Esta cubierta es una lámina plegada, pretensada, de ladrillo de 8 centímetros de espesor y 32 metros de luz. Las curvas de la cubierta se repiten en las fachadas laterales, amplificándose, como si fuera una sucesión de conos, con una altura de 7 metros, partiendo con una geometría recta desde el suelo y finalizando con una directriz ondulada. La unión de los muros redondeados y la cubierta genera a la vista de los bocetos una sensación de inestabilidad, y tensión, que hacen del proyecto una Iglesia muy llamativa. El diseño de muros redondeados y perforados hacen prever que la luz del exterior inunde el interior, a través de vidrios y puedan generar ese clima eclesial y la sobriedad de una catedral.

El cálculo de una construcción como la de la Iglesia de Cristo Obrero es prácticamente inabordable analíticamente y la expresión matemática de sus superficies es complejísima. Pero, sin embargo, es intuitivamente evidente que hay en la bóveda dos zonas; una que trabaja francamente como bóveda gausa y otra zona que prácticamente cuelga de la anterior. La parte que trabaja como bóveda de doble curvatura tiene una rigidez enorme. No es necesario un pleno dominio del régimen tensional para tener garantía de su estabilidad. La distancia de cresta a cresta de la ondulación es de 6 metros y 4 metros trabajaban como bóveda. Detrás del diseño, lógicamente, hubo un intenso cálculo matemático y geométrico.



Plano nº08. Planta según Dieste [3]



Plano nº04 y nº6. Planta según Dieste [3]

Según Dieste “una arquitectura sana no puede producirse sin un uso racional y económico de los materiales de la construcción”. Esta liviana estructura, tuvo el coste de una nave industrial, “un galpón”, pero el resultado fue un objeto arquitectónico de elevada proeza estructural, llevando a su máximo esplendor las posibilidades expresivas del ladrillo.

Se terminó de construir en el año 1960, y en su interior todavía se encuentra un Cristo tallado en madera y en color dorado, creado por el artista catalán Eduardo Díaz Yepes. Al fondo de la iglesia se encuentra la sacristía y la capilla de la Virgen de Lourdes, apoyadas con un muro curvo que no llega al techo.

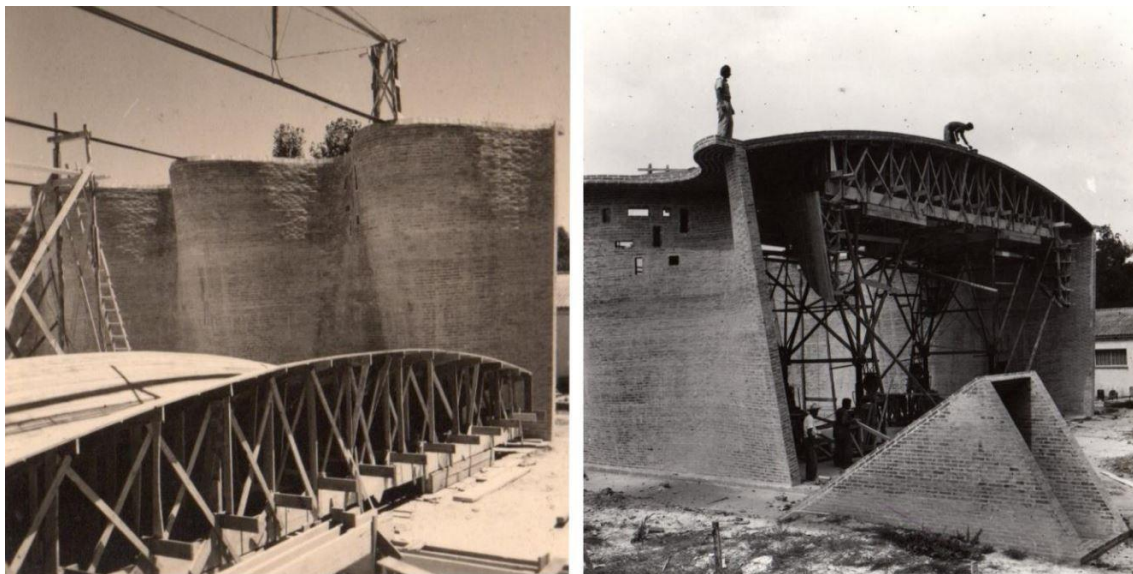


Imagen nº08 y nº09. Construcción. Imágenes extraídas del archivo Dieste & Montañez.[02]

En el exterior, los muros laterales van generando un ritmo, debido a su repetición, revelando las posibilidades tecnológicas y expresivas del material conformador de esta obra. Junto a la nave se eleva una torre/campanario que en su escala parece ser muy esbelta y que da una idea de la altura que el ladrillo puede llegar a alcanzar.

Según descripciones de las personas que la han podido visitar, al momento de acceder a la iglesia, se encuentran con la inmensidad de la obra, todo a la vista, un gran espacio abierto y comunitario que mediante sus ondulaciones logran impresionar al visitante, y le muestran la capacidad constructiva y el desarrollo intelectual que la obra posee. La nave central daría acogida a la comunidad, y al final se encuentra el altar, resguardado por un pequeño muro curvo de ladrillo. Describen el interior de la iglesia como una sensación de comunicación entre las formas, las luces, y la armonía de los materiales usados.

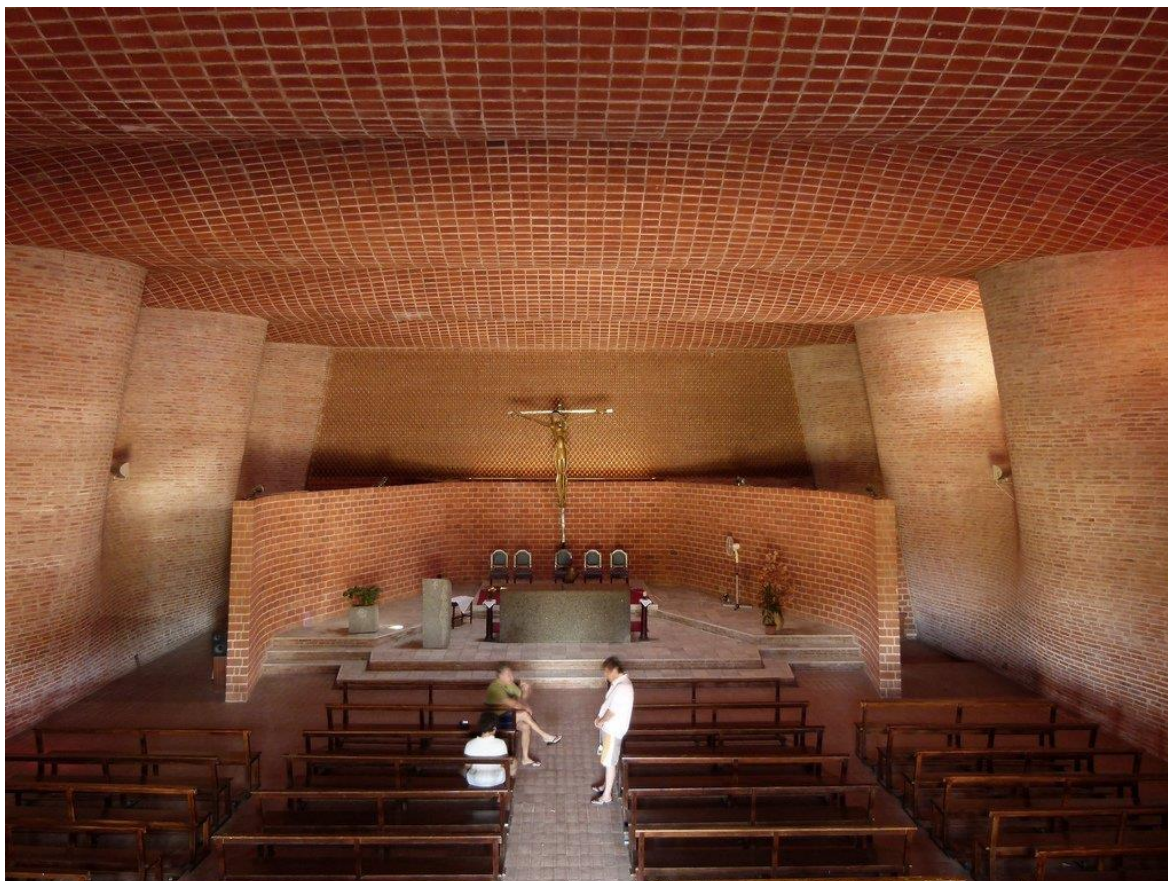


Imagen nº10. Iglesia de Atlántida. Imagen extraída de wikiarquitectura

Estas características se repetirán en todas sus obras, aún las que no se desarrollan en un ambiente religioso, porque ese carácter se obtiene en el momento de la concepción de la obra y no durante la funcionalidad, ni su uso, ni su destino.

La capacidad constructiva que logra con el ladrillo llega a ser comparable con las exploraciones que grandes íconos de la arquitectura como Le Corbusier o Félix Candela sólo habían logrado hasta ese momento con el hormigón. La estructura logra un espesor mínimo, haciendo trabajar al material como una gran lámina que se pliega de modo simple, otorgando una sensación de liviandad casi gótica.

Concluida la obra, fue publicado un primer artículo, al cual siguió una verdadera catarata internacional de publicaciones, pero en Uruguay tardó en ser considerada en todo su valor (tal vez por aquello de ser profeta en su propia tierra). Estuvo años sin funcionar. Pero hoy en día, la Iglesia de Cristo Obrero en Atlántida, es famosa en todo el planeta, forma parte del patrimonio histórico nacional uruguayo e integra el selecto listado de construcciones que aspiran a transformarse en patrimonio de la humanidad.

REFERENCIAS

- [01] User's manual TopSolid 2010 Missler Software © 2010, 7, Rue du Bois Sauvage F-91055 Evry, FRANCIA <http://www.topsolid.com>
- [02] Josep J. Mas Guindal, Josep M^a Adell, (2005)
ELADIO DIESTE Y LA CERÁMICA ESTRUCTURAL EN URUGUAY
Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 496, marzo-abril 2005 – ESPAÑA
- [03] F. Álvarez (1999)
DPA - Documents de Projectes d'Arquitectura. Publicación del Departament de Projectes Arquitectònics de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
©1999 DPA y Fernando Alvarez, ISBN 84-8301-331-2, Depósito Legal B-32.610.99
- [04] E. Vázquez Vicente, J. Sánchez Sánchez, (2015)
Tesis Doctoral, Aplicaciones del análisis modal a la peritación de edificios civiles con estructura de fábrica. El caso de la edificación civil sevillana.
Presentada por: Enrique Vazquez Vicente, Arquitecto
Dirigida por: José Sanchez Sánchez, Doctor Arquitecto
Departamento de Estructuras de Edificación, e Ingeniería del Terreno, Universidad de Sevilla
- [05] G. Carballo, A. Navas Carro (2005)
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA CON BLOQUES SÓLIDOS DE ARCILLA
Ing. Goering Carballo Rodríguez, Ingeniero de Dean Steel Buildings, Inc., Consultor independiente.
Ing. Alejandro Navas Carro, MSc, Coordinador General de Laboratorios, LANAMME, Escuela de Ingeniería Civil, UCR.
VIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica, San José, Costa Rica
- [06] User's manual (2019)
Academic Research Mechanical, Release 18.1, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc. © 2019 ANSYS, Inc.
- [07] Trias de Bes, J., Casariego, P. (2016).
DE LA TÉCNICA A LA TECNOLOGÍA: CONSTRUCCIÓN DE FORJADOS DE CERÁMICA ABOVEDADA MEDIANTE SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS
Informes de la Construcción, Vol. 68, nº544: e169, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.168.m15>.
- [08] N. Afanador García, G. Guerrero Gómez, Monroy Sepúlveda, (2019)
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LADRILLOS MACIZOS CERÁMICOS PARA MAMPOSTERÍA. Ciencia e Ingeniería Neogranadina [en línea] 2012, 22 (Junio-Sin mes) :
[Fecha de consulta: 27 de febrero de 2019]
Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91125275003>> ISSN 0124-8170
- [09] EAE – Instrucción de acero estructural
Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado
<http://publicacionesoficiales.boe.es>
I.S.B.N.:978-84-98-0912-5
- [10] S. Invers i Barriga, P. Alavedra Ribot (2006)
PFC - Comparativo en la utilización de hormigón armado tradicional frente a la utilización de hormigón armado con alta dosificación de fibras de acero
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona - Enginyeria Industrial

BIBLIOGRAFÍA

- [11] J. M. Adell Argilés (1992)
LAS BÓVEDAS DE LA ATLÁNTIDA
© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>
- [12] D. Baldassari, G. Cueto, M. Fadigati, N. González, M. Keuerk, L. Papa
CONSTRUCCION III – EJERCICIO 2 / CERAMICA ARMADA – E. DIESTE – FABRICA TEM
Empresa TEM S.A. Montevideo. Uruguay - ELADIO DIESTE
- [13] Código técnico de la edificación
Documento básico SE-AE seguridad estructural: acciones en la edificación
- [14] J. Estévez Cimadevilla, J. A. Vázquez Rodríguez (2003)
CONSTRUCCION DE UN ESPACIO DEPORTIVO CON PAREDES DE SUPERFICIE REGLADA
DE CERÁMICA ARMADA
Revista INFORMES, número 484 pp. 5-14
- [15] J.M. G. de Churtichaga (2001)
ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA RECONSTRUCCIÓN DE VILLANUEVA DE LA CAÑADA
El uso de los sistemas de bóvedas tabicadas y su perspectiva histórica
- [16] J. Grompone (1996, revisado en 2011)
ELADIO DIESTE, MAESTRO DE LA INGENIERÍA
- [17] A. Ibañez, L. Malcuori, A. Pérez, C. Quintero, y otros. (2003)
Revista DISPAROS SOBRE LA ARQUITECTURA, número 4: Eladio Dieste
- [18] M. E. Maciá, A. Rolando (2011)
VARIACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE UN ELEMENTO DE FÁBRICA DE LADRILLO
SOMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS
Mater. Construcc., Vol. 63, 309, 105-116, ISSN: 0465-2746. doi: 10.3989/mc.2012.02311
Persona de contacto/Corresponding author: memacia@ceu.es
- [19] A. M. Marín, G. Barluenga (2014)
ELADIO DIESTE Y LA CERÁMICA ARMADA, LA FORMA DE LO RESISTENTE
Arquitecturas del Sur / Vol XXXII / Nº 45 / 2014 / ISSN 0716-2677
- [20] A. Sivak (2016)
GETTY FOUNDATION ANNOUNCES 2016
KEEPING IT MODERN GRANTS THAT SPAN THE GLOBE
- [21] A. Sequeira, F. Cisnero, A. Cencio, V. Lucas (2006)
Revista TRADICIÓN E INNOVACIÓN
Publicación EL PAIS, Depósito Legal: 337.680
Ministerio de Educación y Cultura

PAGINAS WEB

- http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Iglesia_de_Atlantida (consulta noviembre2018)
<http://www.viajearuguay.com/cultura/biografia-y-obras-de-eladio-dieste.php> (consulta noviembre2018)
<http://www.dieste.com.uy/empresa.html> (consulta diciembre 2018)
http://es.wikipedia.org/wiki/Eladio_Dieste (consulta diciembre 2018)
<http://www.hispalyt.es> (consultada enero 2019)

VIDEOS

- [V1] M. Arana (1990)
DIESTE: LA CONCIENCIA DE LA FORMA
<https://vimeo.com/291558822>
- [V2] M. Borteiro, M. Payssé (2006) - Documental
ELADIO DIESTE: TRADITION AND INNOVATION
<https://youtu.be/h7VVbD7-uMw>
<https://youtu.be/NyDUuRZdSu0>
- [V3] A. M. Marín Palma, P. Chías Navarro, I. Oteiza (2017) - Seminario
SEMINARIO TORROJA
ELADIO DIESTE Y LA CERÁMICA ARMADA
<https://youtu.be/naoM6QMOJc>
- [V4] A. Montagu (2002) - Documental
ELADIO DIESTE, IGLESIA DE ATLANTIDA
<https://youtu.be/KDS-0QxGOig>
- [V5] A. Ribeiro, M. Rosencof, J. Grompone y D. Delgrossi (2017) – Programa radiofónico
VIDA Y OBRA DE ELADIO DIESTE A 100 AÑOS DE SU NACIMIENTO
Programa radiofónico
https://youtu.be/FEZ38pTZ_wg
- [V6] S. Santa Cruz (2019) - Documental
ELADIO DIESTE, LA SIMPLEZA DEL INGENIO
Gobierno de Canelones, Secretaría de Comunicaciones, ©Intendencia de Canelones
<https://youtu.be/E77WvazdqAs>