

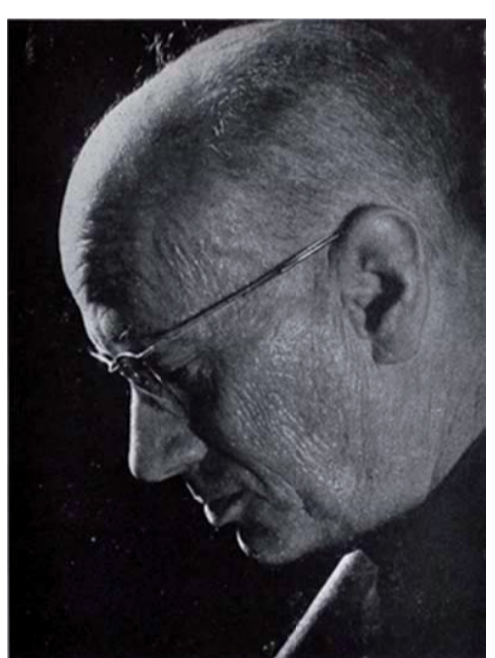
Fernando Arnau Paltor
Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje.
 Adolfo Alonso Durá
 Ernesto Fenolosa Forner
 Begoña Serrano Lanzarote
 Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.
 Universidad Politécnica de Valencia.

¿SE ACERCÓ EDUARDO TORROJA CON CÁLCULOS HECHOS A MANO AL COMPORTAMIENTO REAL DE UNA ESTRUCTURA COMPLEJA?

1. INTRODUCCIÓN.



Se pretende analizar la estructura de la Iglesia del Grau de Gandía mediante herramientas informáticas y los cálculos hechos a mano por el Ingeniero y compararlos.



EDUARDO TORROJA MIRET. INGENIERO DE CCYP.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.

Los muros laterales y la cubierta no se apoyan en el suelo sino que flotan apoyándose sólo en los testeros de la Iglesia. Se consigue mediante losas de hormigón armado que deben ayudarse con otros elementos estructurales:

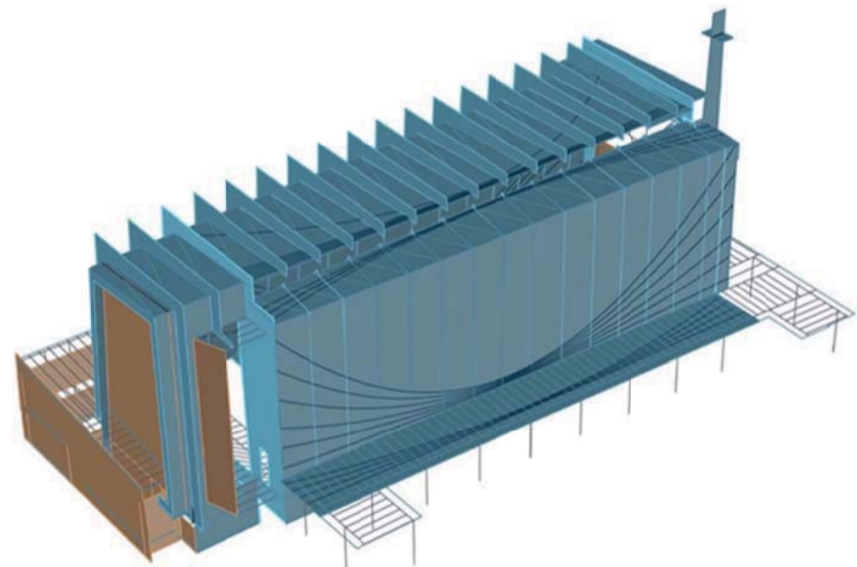


Fig. 1: Esquema de la estructura completa. Vista Norte.

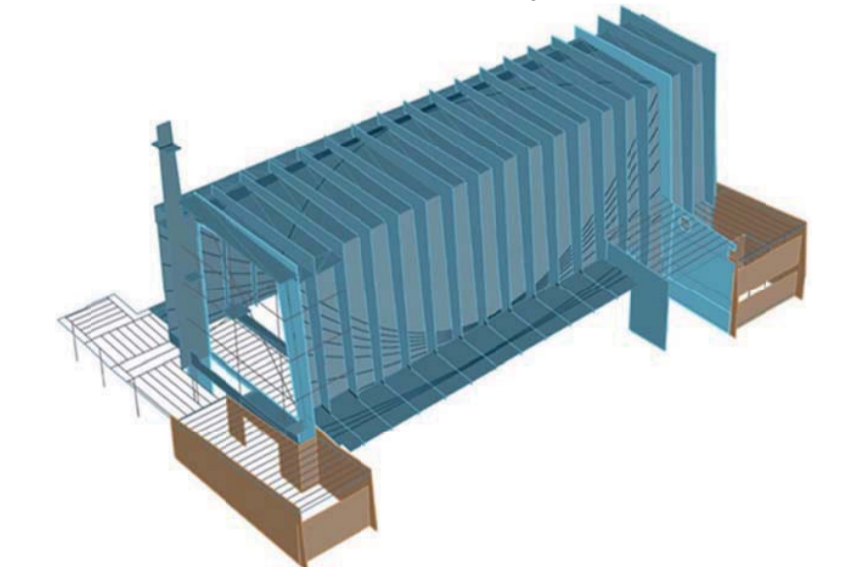


Fig. 2 Esquema estructura de la estructura completa: Vista Sur.

A. LAS LÁMINAS PLEGADAS Y LAS COSTILLAS.

-Láminas plegadas: **27 m de luz** con un espesor de **10-15 cm**
 -Las Costillas de refuerzo colaboran en resistir fenómenos de inestabilidad elástica, flexión esviada, torsión, voladizo y esfuerzos horizontales. Se encuentran en la lámina Sur por el exterior y en la Norte por el interior.

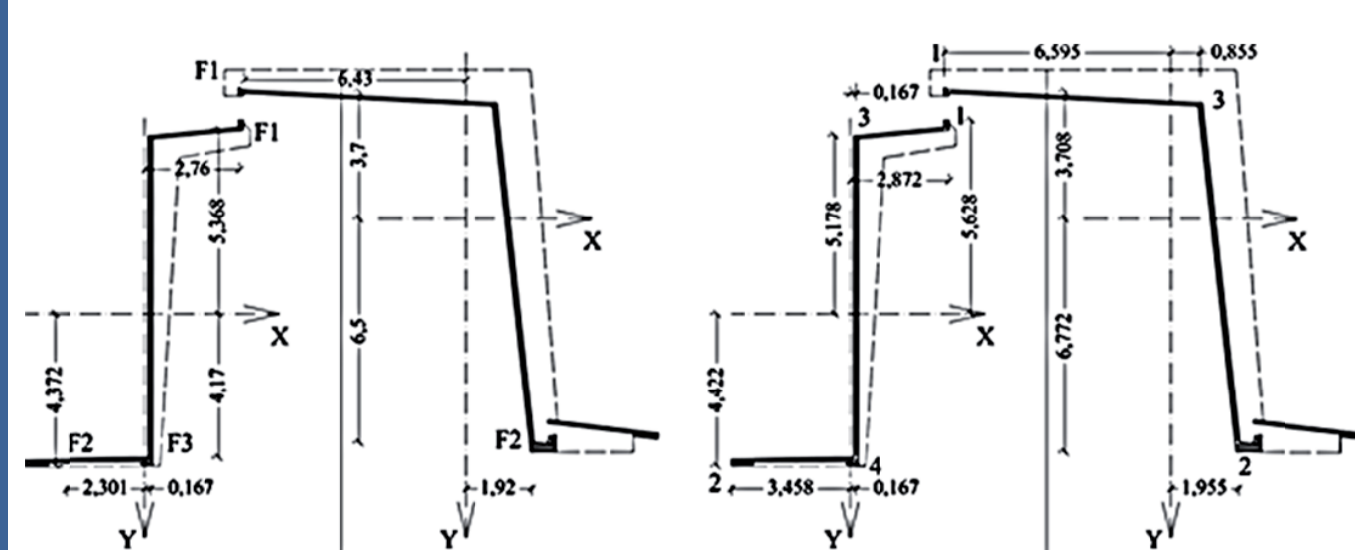


Fig. 3: a) Posición del centro de esfuerzos y de las fuerzas de tesado b) Posición de los puntos

B. POSTESADO DE LAS LÁMINAS.

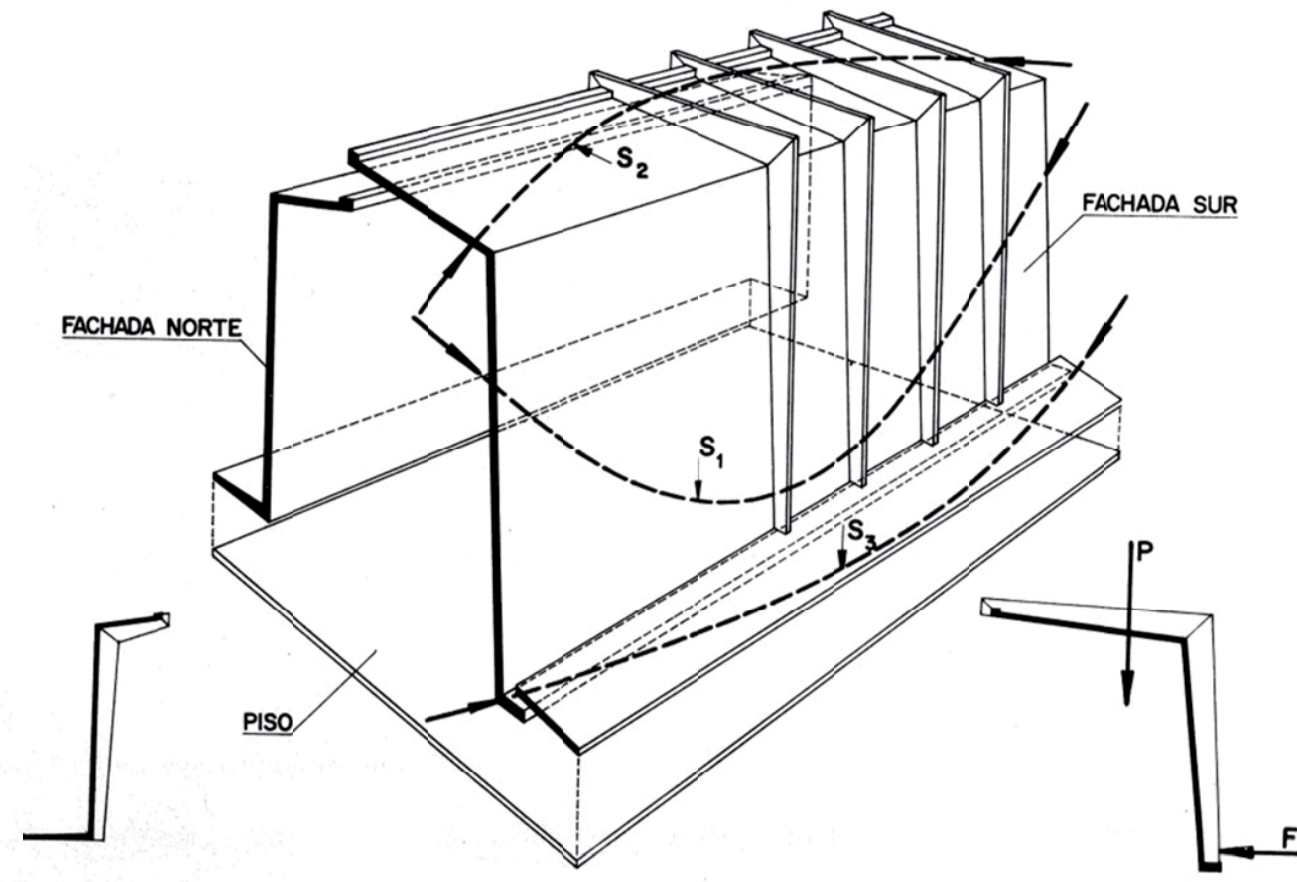


Fig. 4: Descripción del original sistema de postesado ideado por Torroja.

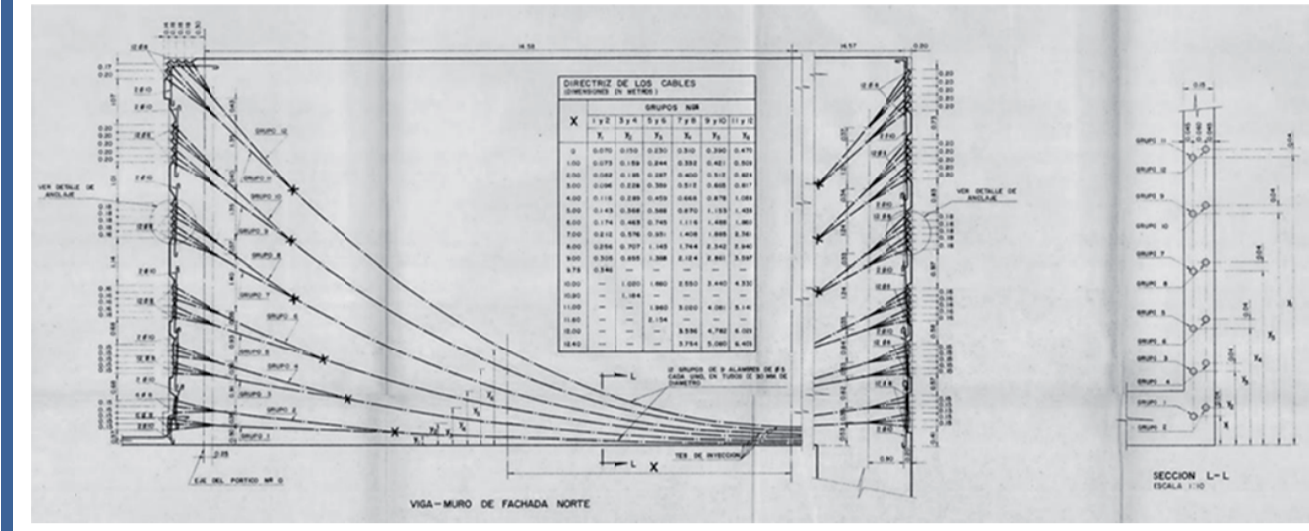


Fig. 5: Postesado Lámina Norte.

C. LOS PÓRTICOS TESTEROS.

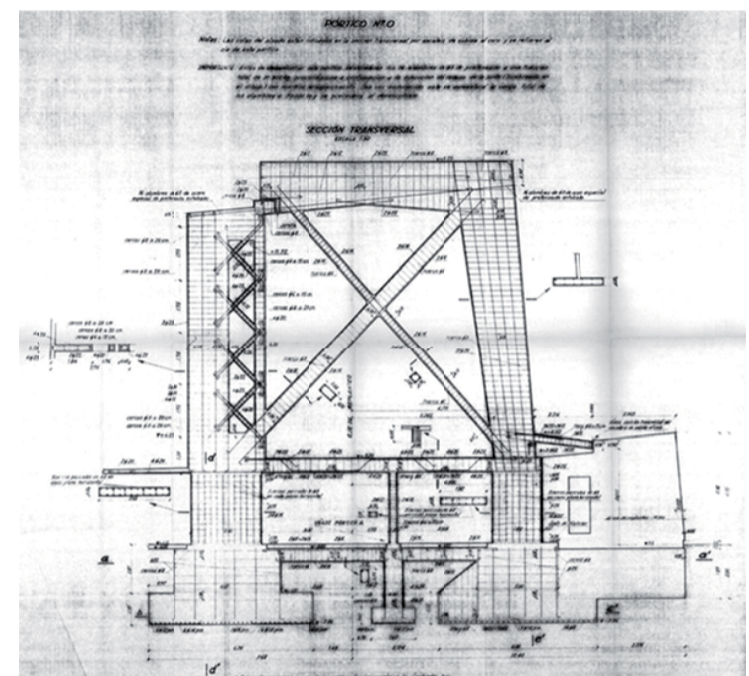


Fig. 6 Pórtico 0 de Apoyo al Oeste. Las rótulas Freyssinet en pies y cabeza de Planta Baja permite considerarlo un apoyo deslizante.

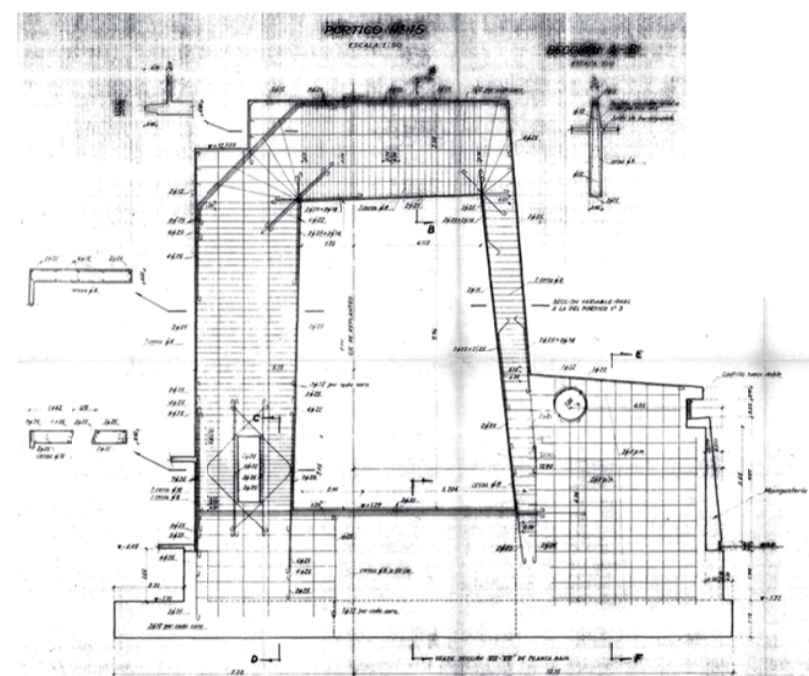


Fig. 7 Pórtico 15 de Apoyo al Este se considera apoyo por no tener rigidez la lámina en el eje longitudinal.

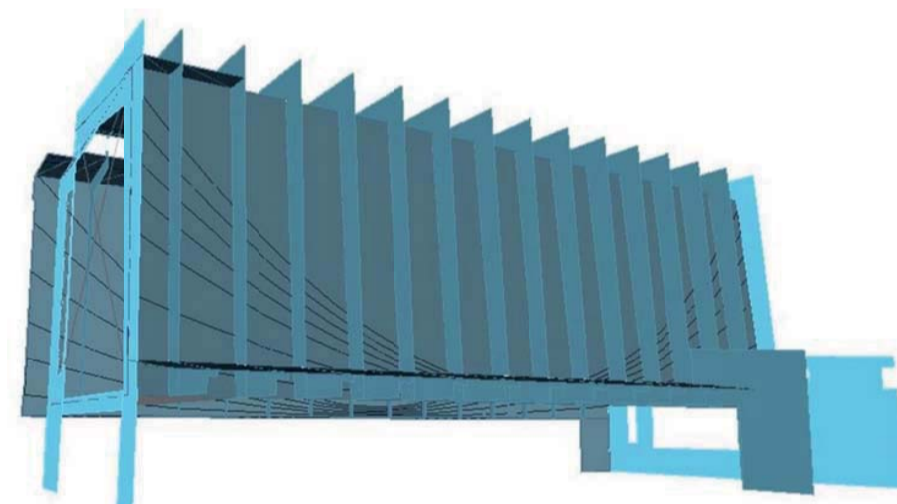


Fig. 8: Lámina Sur, costillas, y postesado

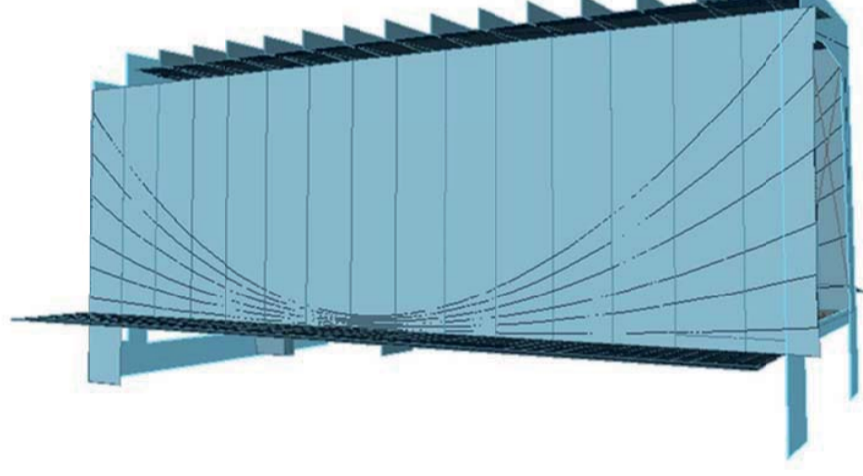


Fig. 9: Lámina Norte y postesado



Fig. 10: Pórtico 15. Apoyo al Este

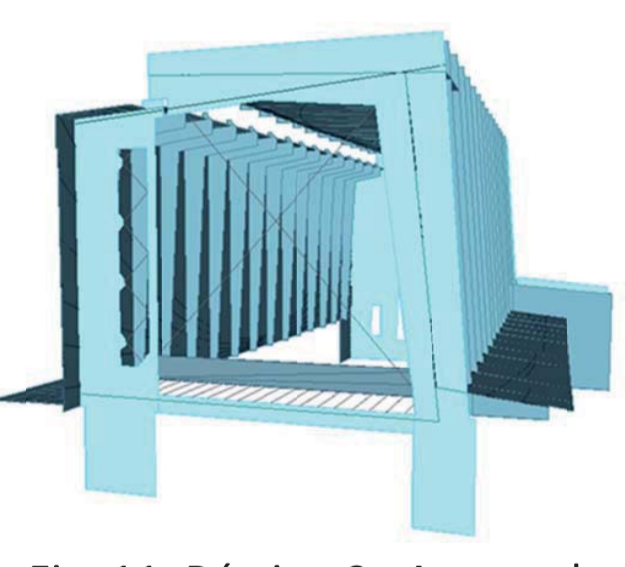


Fig. 11: Pórtico 0 . Apoyo al Oeste.

3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

A. CARGAS Y RESISTENCIAS

Tabla 1: Sobrecargas.		Tabla 2: Coeficientes de seguridad.	
Sobrecargas	Kg/m ²	COEFICIENTES DE SEGURIDAD	
Cubiertas (no pisables)	70	Elementos principales (Pórticos, vigas-muro, plantas de Coro y Altar, etc.)	1,58
Planta de Coro	250	Elementos secundarios (Forjados, vigas, etc. de plantas de cubiertas)	1,44
Planta de Altar Mayor	300	Efectos de viento	1,44
Zona de Sacristía	200		

Tabla 3: Resistencias.		Kg/m ²	
Resistencia característica Hormigón	R _{ck}	#	135
Resistencia básica Hormigón	R _{kd}	135 / 1,6 =	85
Límite de elasticidad acero normal	L _{yk}		2.400
Resistencia básica acero normal	R _{kd}	2400 / 1,2 =	2.000
Resistencia de acero pretensado	R _{yk}		15.000
Resistencia básica del acero pretensado	R _{kd}	(15.000 x 0,9) / 1,2 =	11.200
Tensión inicial del acero pretensado	t ₀		11.000
Tensión final del acero pretensado	t ₁	11.000 x 0,8 =	8.800

Tabla 4: Postesado.			
	ALAMBRES	Ø	ÁREA TOTAL
		(cm)	(cm ²)
CUBIERTA CLAUSTRO	24	0,50	4,71
VIGA-MURO NORTE	108	0,50	21,21
CUBIERTA NORTE	18	0,50	3,53
CUBIERTA CAPILLAS	27	0,50	5,30
VIGA-MURO SUR	126	0,50	24,74
CUBIERTA SUR	36	0,50	7,07
PÓRTICO 0	15	0,50	2,95
			FUERZA PRET. EN MEMORIA (Kg)
			FUERZA PRET. EN MEMORIA (Kg)

B. CÁLCULO SIMPLIFICADO DE TORROJA.

Viga biapoyada. No tiene en cuenta dilataciones térmicas.

Comportamiento elástico y lineal de las láminas.

Hipótesis Navier-Bernouilli. Ecuación clásica para ejes no principales de inercia. Sobre esta base se dedujeron las fórmulas para hallar las tensiones de la estructura en los puntos no calculados por Torroja.

$$\sigma = \frac{1}{I_x I_y - I_{xy}^2} \begin{pmatrix} I_x & -I_{xy} \\ -I_{xy} & I_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix} + \frac{N}{A} \quad (1)$$

Muro Norte:

$$\sigma = \frac{(M_x - 4,17 F_1)(y - x I_{xy}) + (M_y - 0,167 F_1)(x I_{xy} - y I_x) + F_1 + F_2}{I_x I_y - I_{xy}^2} \quad (2)$$

Muro Sur

$$\sigma = \frac{(M_x - 3,70 F_1 - 6,50 F_2)(y - x I_{xy}) + (M_y + 6,43 F_1 - 1,92 F_2)(x I_{xy} - y I_x) - F_1 + F_2}{I_x I_y - I_{xy}^2} \quad (3)$$

C. MODELO CON ELEMENTOS FINITOS.

Comparación con un modelo con elementos finitos mediante computadora con el Programa ANGLE. Máxima aproximación a la realidad en la introducción de Geometría, Vínculos y Cargas en especial en lo referente al postesado.

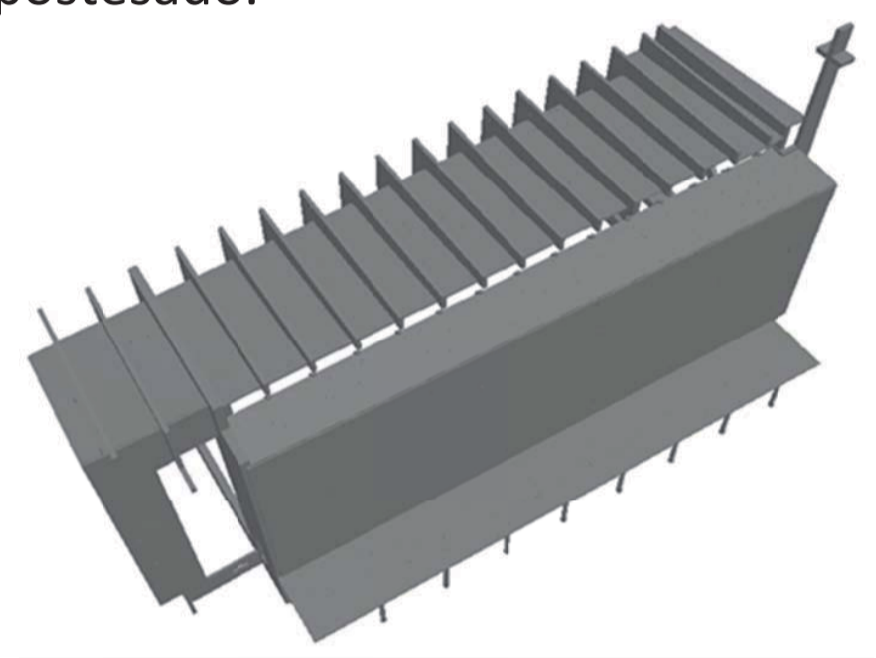


Fig. 12: Modelos estructural visualización "sólida"

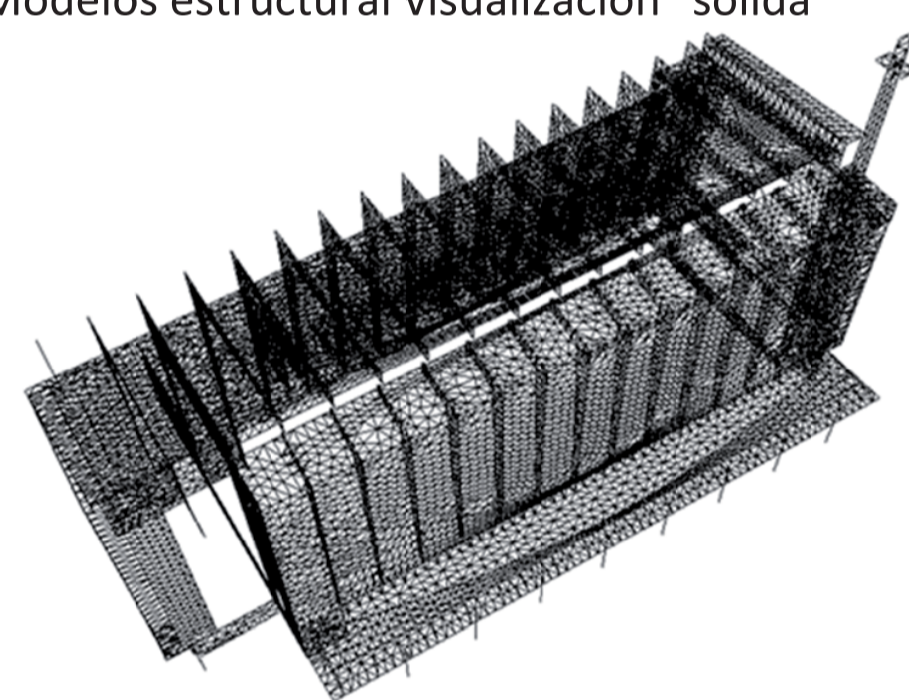


Fig. 13: Modelo estructural visualización mallado de E.F.

4. RESULTADOS.

A. CARGAS PERMANENTES

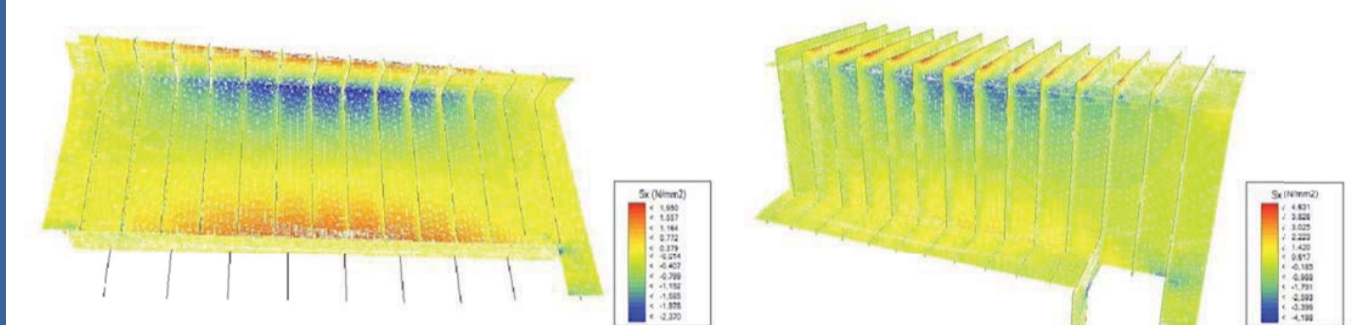
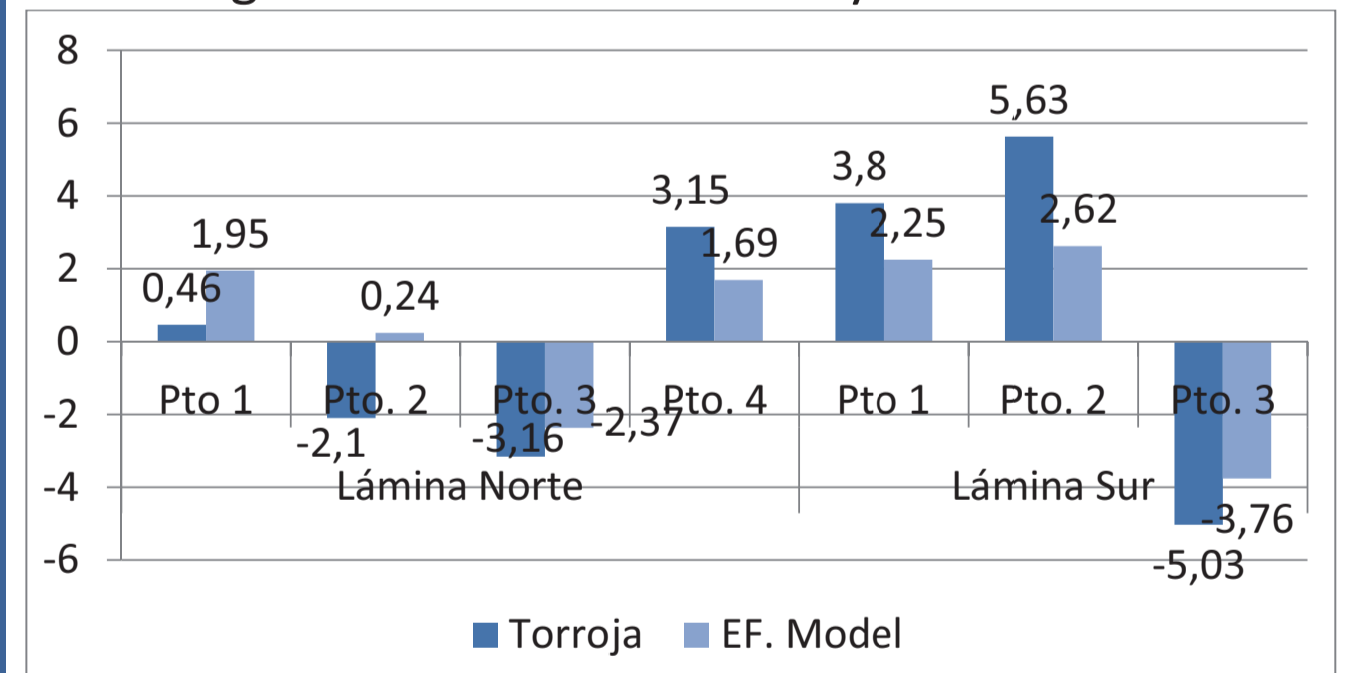


Fig. 14: Tensiones normales a) Lámina Norte. b) Lámina Sur.

Fig. 15: Los resultados de la Comparación entre Torroja y el Modelo para Tensiones normales (MPa). Para Cargas Permanentes son muy similares



Debido a las cargas permanentes se observa un comportamiento propio de viga biapoyada con tracciones en la parte inferior y compresiones en la superior. También se debe destacar el funcionamiento de las costillas en voladizo para la sujeción de la cubierta observando su cabeza traccionada.

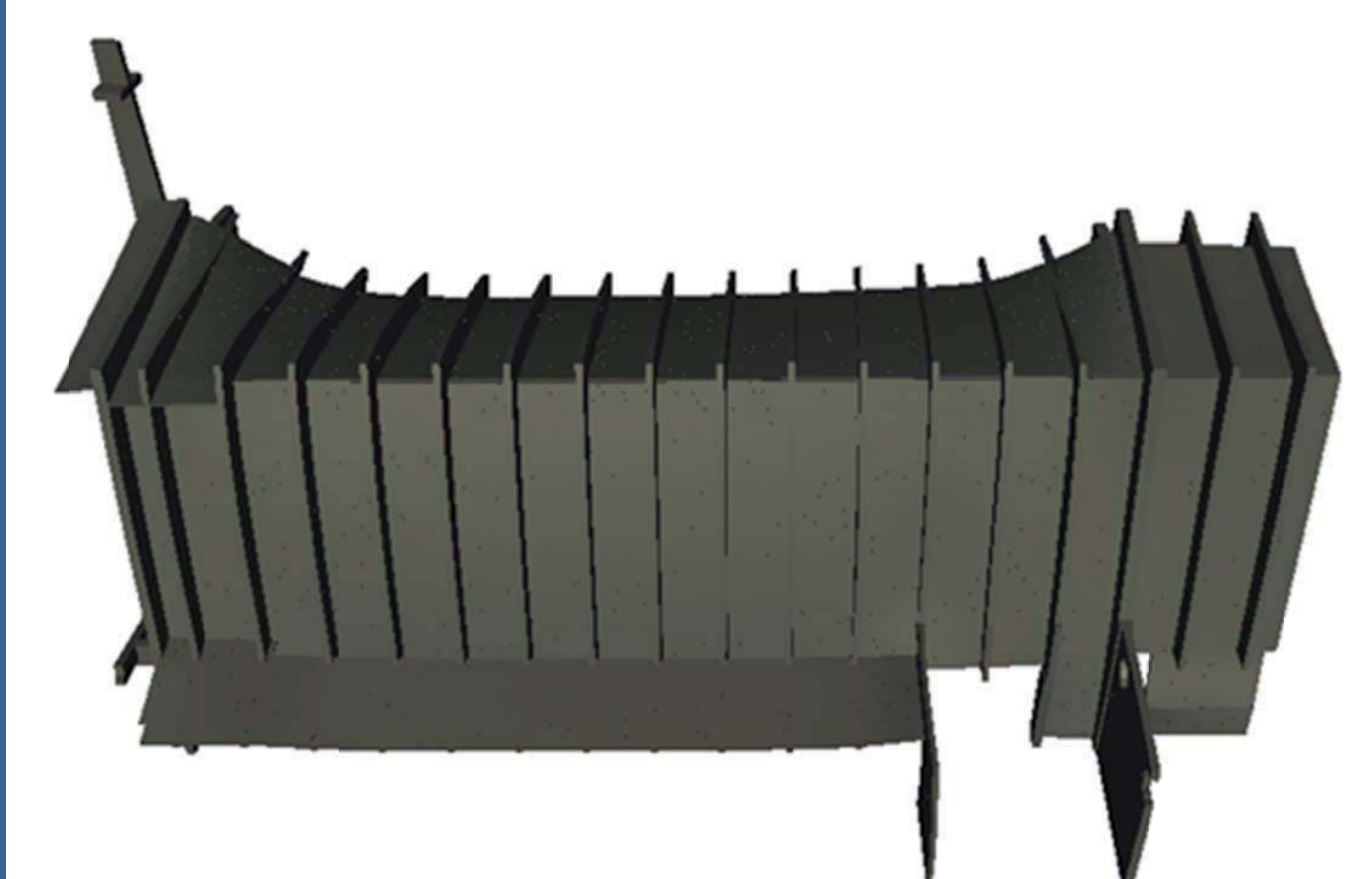


Fig. 16: La deformación máxima del extremo del voladizo de las costillas alcanza un valor de 18,4 mm. en la hipótesis de carga considerada.

B. CARGAS PRETENSADO.

El comportamiento debido al pretensado es el inverso al debido a las cargas permanentes. Gracias a lo detallado del modelo informático apenas se observan concentración de tensiones en los extremos de la losa debido al postesado.

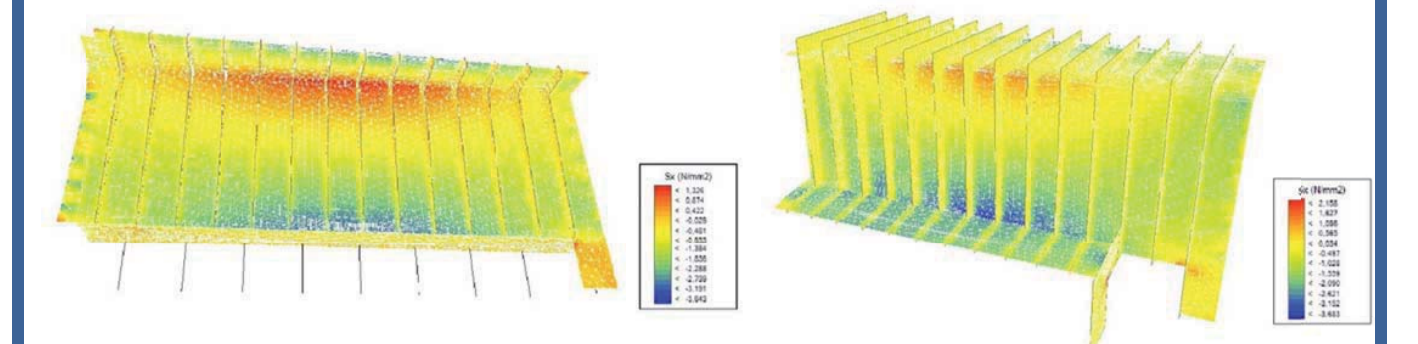
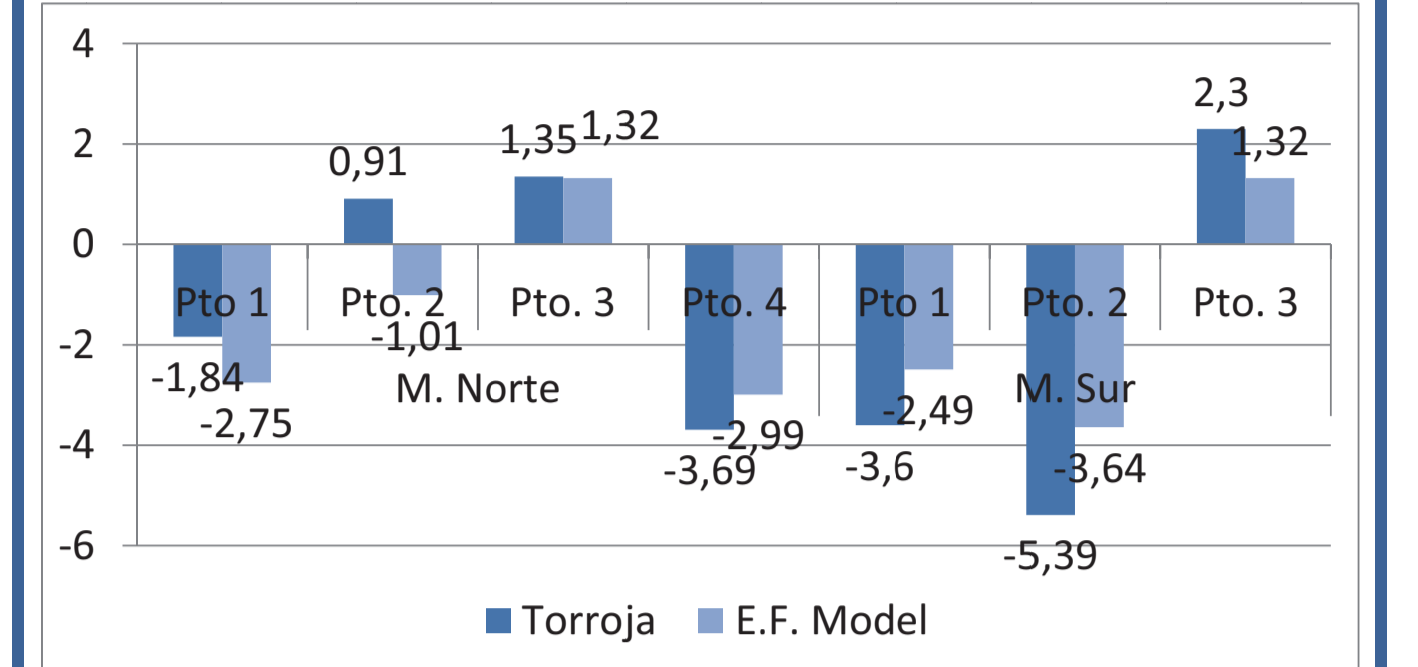


Fig. 17: Tensiones normales. a) Lámina Norte. Vista interior b) Lámina Sur. Vista exterior.

Fig. 18: Los resultados son muy similares en la comparación de resultados para Tensiones normales (MPa) en Cargas de pretensado entre Torroja y el Modelo.



C. CARGAS HORIZONTALES DE VIENTO

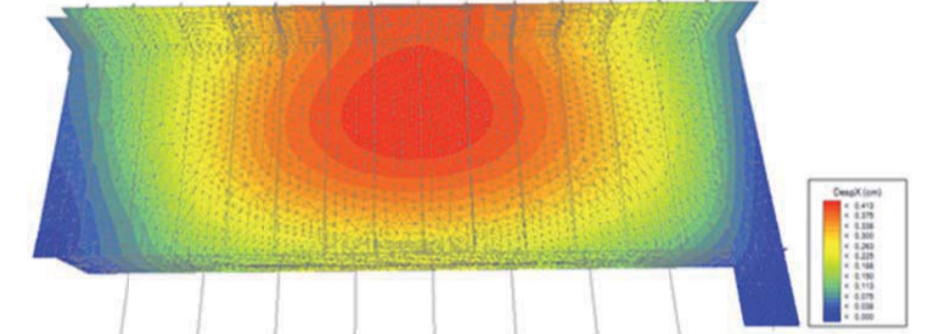


Fig. 19: Desplazamientos horizontales lámina Norte.

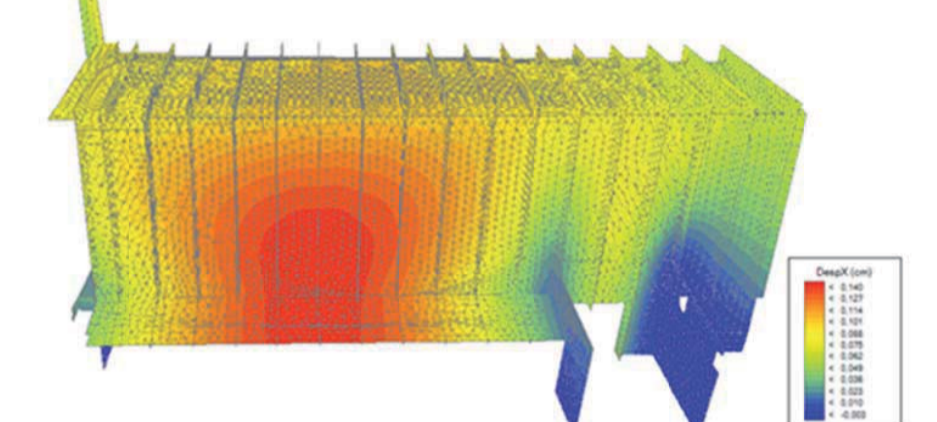


Fig. 20 Desplazamientos horizontales lámina Sur. Tabla 5: Desplazamientos horizontales (mm). Hipótesis de viento.

Direcc. Viento	Sección	M. Norte				M. Sur		
		Pto. 1	Pto. 2	Pto. 3	Pto. 4	Pto. 1	Pto. 2	Pto. 3
N-S	Pórtico 0	0,84	0,30	0,82	0,27	1,03	0,38	0,99
	Central	4,44	2,43	4,47	2,44	1,16	1,39	1,19
	Pórtico 15	0,88	0,17	0,87	0,19	0,87	0,02	0,85
S-N	Pórtico 0	-0,91	-0,31	-0,89	-0,27	-1,03	-0,37	-1,00
	Central	-3,23	-1,84	-3,24	-1,84	-1,33	-1,76	-1,39
	Pórtico 15	-0,85	-0,15	-0,85	-0,17	-0,85	-0,02	-0,83

5. CONCLUSIONES.

Los comparación para la combinación pésima de hipótesis evidencian que Eduardo Torroja se aproximó bastante mediante sus cálculos al comportamiento real de la estructura. Queda patente su genio no sólo en los los cálculos sino en los conceptos utilizados en su diseño.

En fases posteriores se hará un análisis estructural exhaustivo de la Iglesia para su mayor conservación e investigarán otras estructuras de láminas de hormigón en la Comunidad Valenciana.

Fig. 21: Los resultados entre Torroja y Modelo son muy similares como puede verse en la comparación de Tensiones normales (MPa) en la combinación más desfavorable.

