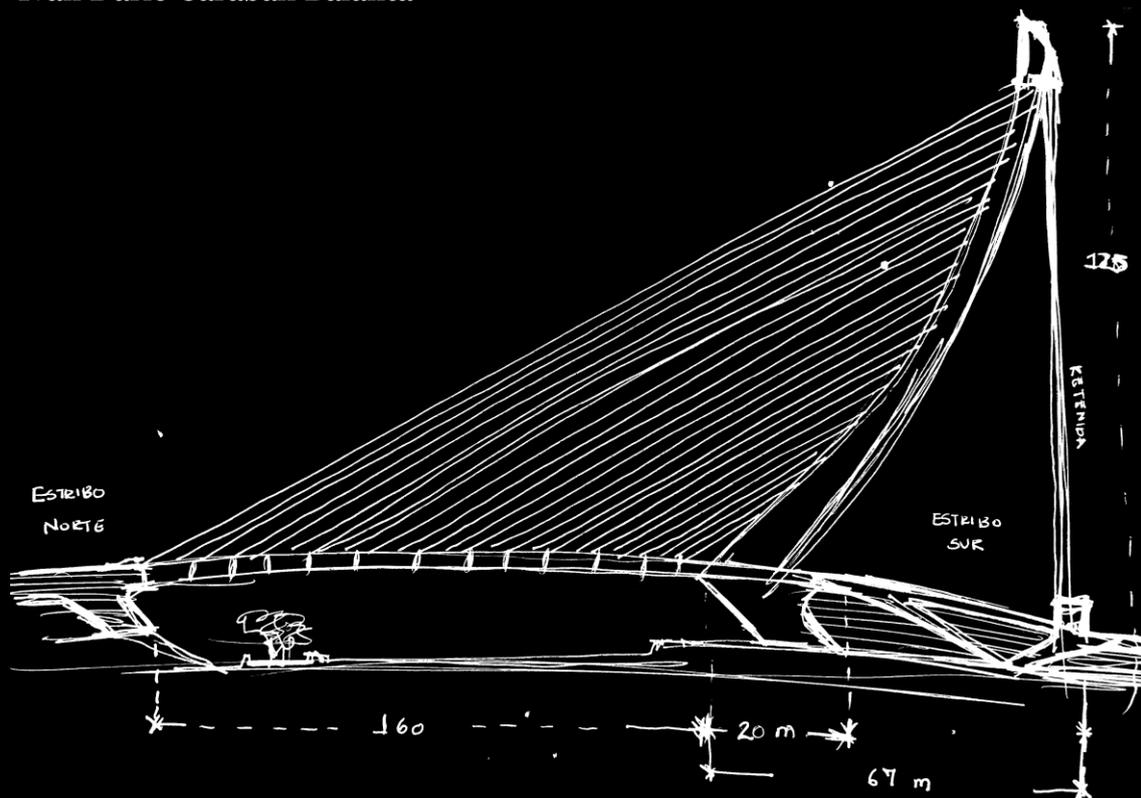


Santiago Calatrava: Entre los límites de la Estética y la Eficacia Estructural.

Iván Darío Carabalí Balanta



Trabajo de Fin de Máster

Tutor: Doctor David Gallardo Llopis



Universidad Politécnica de Valencia

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Master Universitario en Arquitectura Avanzada, Paisaje, Urbanismo y Diseño

Curso 2021 -2022

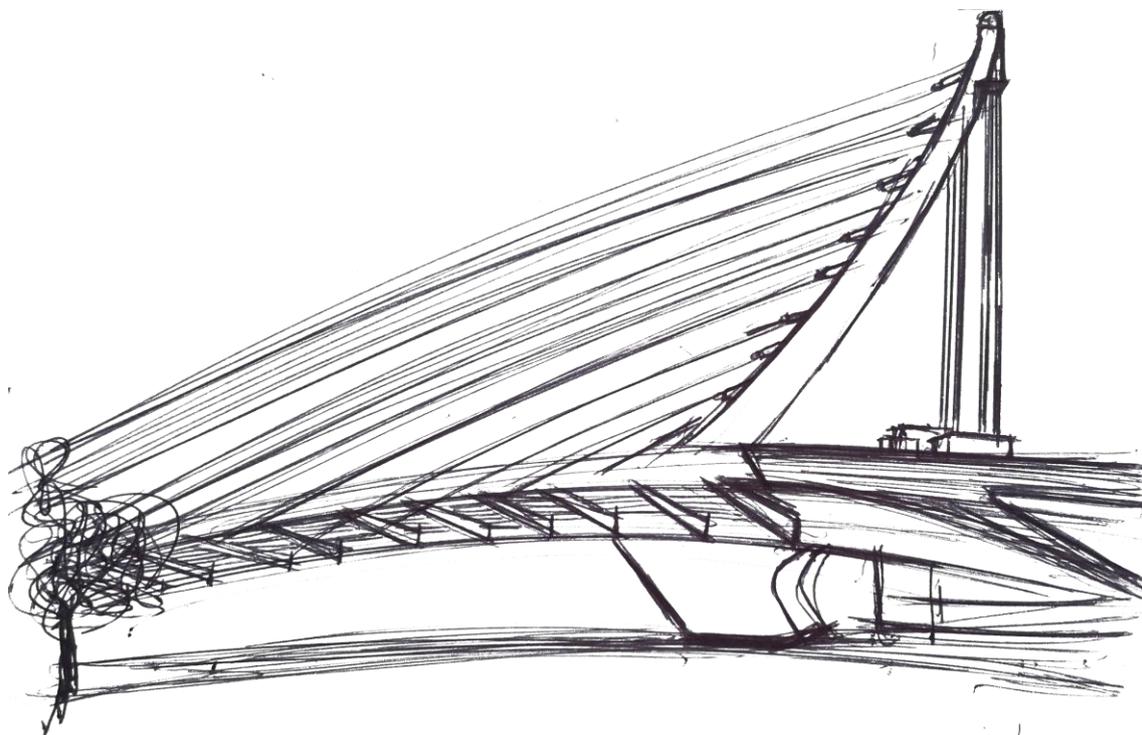
A Dios,

Manifestación de energía, Fuente inagotable.

Santiago Calatrava:

Entre los límites de la Estética y la Eficacia Estructural.

Iván Darío Carabalí Balanta



Trabajo de Fin de Máster

Tutor: Doctor David Gallardo Llopis



Universidad Politécnica de Valencia

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Master Universitario en Arquitectura Avanzada, Paisaje, Urbanismo y Diseño

Curso 2021-2022

“La escultura es un trabajo de meditación o al menos yo entiendo mi escultura así, están dedicadas exclusivamente a fenómenos puramente perceptivos o formales y no funcionales como la construcción, por otro lado la construcción tienen una escala que la escultura nunca podrá alcanzar, la construcción se puede penetrar, en la escultura se puede observar, se puede difícilmente penetrar”

Santiago Calatrava

“Para mí lo más importante de la composición es la estructura, lo que más me interesa es la potencialidad expresiva de las formas estructurales”

Félix Candela

“La apariencia externa de un buen edificio no puede, y no debe, ser otra cosa que la expresión visible de una realidad estructural o constructiva eficaz. En otras palabras, la forma debe ser el resultado necesario de la estructura y no su base de partida”

Pier Luigi Nervi

RESUM

“Santiago Calatrava entre els límits de l'Estètica i l'Eficàcia Estructural” és el títol d'aquestes reflexions i sintetitza molt bé l'objectiu del present treball. La discussió plantejada navega entre les fronteres de l'expressió plàstica de les estructures i el seu grau d'eficiència, fidelitat estructural i caràcter tectònic aportades per l'arquitecte més influent de les últimes dècades a Espanya, per a això s'indaga fonamentalment en dos àmbits, primer: encunyar i aprehendre el particular “Vocabulari *Calatrava” enlluernat per l'exotisme del controvertit geni espanyol, fent un compendi selectiu d'obres seues considerades determinants. En segona instància, posar en qüestió si l'efecte estètic d'aquest vocabulari prové directament de la lògica interna de la forma estructural obtinguda o si el resultat és purament plàstic i formalista, alienat, emancipat de tot acte canònic regit per la mesura i la racionalitat constructiva sotmetent una obra en concret a manera de laboratori.

Paraules clau:

*Santiago Calatrava, estàtica, memòria col·lectiva cultivada, analogia, formalisme, plàstica, caràcter plàstic, Vocabulari *Calatrava, eficàcia, estructura, parencia, estètica, caràcter simbòlic, forma estructural.*

ABSTRACT

“Santiago Calatrava, *between the limits of Aesthetic and Structural Efficiency*”, it's the name of those thoughts as exceptional synthesis of this work. The exposed problem is immersed between borders of structural's plastic expression and his level of efficiency, structural fidelity and his tectonic character from the most influential architect in recent times in Spain, for this, is necessary and fundamental explore in two areas. First: apprehend the particular Calatrava's Vocabulary dazzled by the exoticism of the controversial spanish genius, making a selective group of his works considered determinants. Second:, show if the aesthetic effect of the Calatrava's Vocabulary comes directly from Internal logic of Structural form obtained or if it's a purely plastic and formalistic result, emancipated of canonical procedure with perspective of measure and constructive rationality submitting a specific work as a laboratory.

Keywords:

Santiago Calatrava, static, cultivated collective memory, analogy, formalism, plastic, plastic character, Calatrava's Vocabulary, effectiveness, structure, boast, aesthetic, symbolic character, structural form.

RESUMEN

“Santiago Calatrava *entre los límites de la Estética y la Eficacia Estructural*” es el título de estas reflexiones y sintetiza muy bien el objetivo del presente trabajo. La discusión planteada navega entre las fronteras de la expresión plástica de las estructuras y su grado de eficiencia, fidelidad estructural y carácter tectónico aportadas por el arquitecto más influyente de las últimas décadas en España, para ello se indaga fundamentalmente en dos ámbitos, primero: acuñar y aprehender el particular “Vocabulario Calatrava” encandilado por el exotismo del controvertido genio español, haciendo un compendio selectivo de obras suyas consideradas determinantes. En segunda instancia, poner en cuestión si el efecto estético de dicho vocabulario proviene directamente de la lógica interna de la forma estructural obtenida o si el resultado es puramente plástico y formalista, enajenado, emancipado de todo acto canónico regido por la medida y la racionalidad constructiva sometiendo una obra en concreto a modo de laboratorio.

Palabras clave:

Santiago Calatrava, estática, memoria colectiva cultivada, analogía, formalismo, plástica, carácter plástico, Vocabulario Calatrava, eficacia, estructura, alarde, estética, carácter simbólico, forma estructural.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	12
METODOLOGÍA.....	13
ESTRUCTURA DEL TRABAJO	14
OBJETIVOS	15
ACTUACIONES PREVIAS	16
BIOGRAFÍA.....	18
TRAYECTORIA.....	24
PRIMERA PARTE	27
I	28
El Vocabulario Calatrava	28
1.1 Herencia Plástica: La Estructura como Arquitectura	28
1.2 La Analogía... el trabajo en lógica paralela.....	30
1.3 Obras Determinantes.	32
1.4 Memoria Colectiva Cultivada	33
<i>Gaudí: Las sinergias manifiestas entre Stadelhofen y el Parque Güell</i>	33
1.5 Pier Luigi Nervi: <i>Lenguaje expresivo del hormigón, sinergias vinculantes entre Satolas TGV en Lyon y el Coliseo de los deportes de Roma.</i>	48
1.6 Eero Saarinen: <i>La aproximación desde el punto de vista plástico entre Saarinen y Calatrava.</i>	53
1.7 Félix Candela: <i>Un Calatrava receptivo y admirador de su maestro.</i>	56
1.8 El Escultor, el Arquitecto, el Ingeniero y el Artista.....	93
1.9 El caso de Valencia: <i>El “Monocultivo Calatrava”</i>	94
SEGUNDA PARTE.....	102
La construcción, el Vocabulario Tangible	103
II	103
Calatrava y los puentes.....	103
2.1 Barcelona, la excusa del puente traducido en escultura.	104
2.2 Síntesis de los Puentes de Arco.	108
2.3 El Alamillo... ¿Innovación o alarde constructivo?	112
2.4 Pont de l’Assut de l’Or.....	118
2.5 Análisis de diseño del Puente.	126

2.5.1	Conceptualización.....	126
2.5.2	Los componentes del Puente	128
2.5.3	Esquema Estructural del puente.....	129
2.5.4	Descripción de cada una de las partes del puente	131
2.6	El sistema constructivo del puente.....	148
2.7	Criticas a la obra	155
TERCERA PARTE		159
III		159
Resistencia y Estática: del Vocabulario al Lenguaje		159
3.1	Antecedentes	160
3.2	Metodología	162
3.2.1	Modelización.....	162
3.2.2	Información.....	162
3.2.3	Elaboración del modelo detallado.....	163
3.2.4	Transición del modelo detallado	163
3.3	Acciones	164
3.3.1	Valores de Cálculo de las Acciones.....	164
3.3.2	Comportamiento Estructural	164
3.3.3	Exportación del Modelo 3D y desarrollo de cálculo en SAP2000 ...	173
3.3.4	ACCIONES PERMANENTES.....	175
3.3.5	ACCIONES VARIABLES	177
3.3.6	ACCIONES CLIMÁTICAS.....	179
3.3.7	ACCIONES ACCIDENTALES.....	182
3.4	Estados Límite de Servicio (ELS).....	183
3.4.1	Estados límite últimos (ELU).....	183
3.4.2	Deformaciones (DEAD)	184
3.4.3	Deformaciones (CMP)	185
3.4.4	Deformaciones (SCU).....	186
3.4.5	Deformaciones (SCN).....	189
3.4.6	Deformaciones (SCV)	190
3.4.7	Deformaciones (SCVx)	191
3.4.8	Deformaciones (SCVy)	192
3.4.9	Sismo Modal	193
3.5	Deformaciones Resultantes, Modelo Original Detallado	197
3.5.1	Comprobaciones, Modelo Original Detallado.....	206

3.5.2 Transición del Modelo Detallado.....	210
3.5.3 Variante 1: El Pilono orientado en un ángulo de 30°.....	210
3.5.4 Variante 2: El Pilono orientado en un ángulo de 45°.....	215
3.5.5 Variante 3: El Pilono orientado en un ángulo de 70°.....	218
3.6 Líneas de tendencia de deformación del puente.....	221
3.6.1 Deformaciones verticales en ejes y bordes libres del tablero	222
3.6.2 Contraflecha del tablero.....	222
3.7 Esfuerzos en Tirantes	223
3.7.1 Axiles en Tirantes	223
3.7.2 Resistencia en Barras.....	226
3.8 Esfuerzo Cortante	228
CONCLUSIONES.....	232
CAVILACIONES.....	234
PALABRAS CLAVE.....	236
Índice de Imágenes.....	240
Índice de Tablas.....	243
Índice de Láminas	244
Índice de Ilustraciones.....	245
BIBLIOGRAFÍA	246
AGRADECIMIENTOS	250

INTRODUCCIÓN

Abordar a un personaje tan singular como Santiago Calatrava no es tarea fácil, aunque sí inquietante y motivante. No es solamente un arquitecto o ingeniero civil, es también un artista plástico, precisamente inmersos en una poética de la variable que viene del hecho plástico, representa la génesis del proceso de creación de Calatrava. Éste trabajo de investigación pretende responder a la inquietante disyuntiva entre los límites de la estética y la eficacia estructural en la obra de Santiago Calatrava, ¿tiene acaso más peso el vocabulario formal en la obra de Calatrava? O si es en realidad una respuesta formal consecuente de una lógica interior regida por las leyes de la estática.

Será un camino apasionante, lleno de ansiedad y de retos que me permitirán ejercer una crítica objetiva, desde la técnica, contra la interpretación subjetiva a la que pudiese abogar de modo tentativo. Así mismo, me permitiré seleccionar las obras del arquitecto que considero relevantes en el marco teórico para dar respuesta a donde quiero llegar, del mismo modo, tendré en cuenta a otros personajes relevantes en la arquitectura en los que he detectado ciertas sinergias vinculantes con el genio español, en un lenguaje expresivo amplificado, a modo de memoria colectiva. Una segunda fase del proceso consistirá en el estudio y análisis de la forma estructural, el vocabulario formal conceptual se materializa en la construcción, estimando una obra concreta, el Pont de l'Assut de l'Or conocido ampliamente como el Puente de Serrería, mediante la experimentación de modelos tridimensionales con la asistencia del programa de cálculo SAP 2000 (Structural Analysis and Design) así poder determinar la pregunta clave: **¿El efecto estético del pilón del puente proviene directamente de la lógica interna de la estructura?**. Así pues, me adentraré en el vocabulario de puentes, consultaré directamente a la fuente de creación (Calatrava) para equilibrar la balanza y comprender el particular interés por la arquitectura del genio español, sin eludir el compromiso que debe tener la obra con la ciudadanía y con el contexto en el cual se inserta y se entretiene el llamado "objeto de creación" como un ente vivo que interactúa en un ecosistema diverso.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Máster, se emplea una metodología de investigación de carácter descriptivo, experimental y analítico, se plantea un interrogante personal, que nace de poder establecer, divisar y orientar donde están las fronteras o los límites en la que conviven estética y eficacia estructural, en la obra de un personaje tan singular como Santiago Calatrava. Se parte de la generalidad para poder adentrarse en la particularidad del caso, con la premisa clara e indeleble de que La Forma y La Estructura encarnan las pistas clave a estas cuestiones. Es decir, el aparato formal y estructural es indisoluble, es uno solo, partiendo de una reflexión de reconocer la estructura como arquitectura. La recolección de los datos, se expone en pleno y parte del vertiginoso interés de mi parte en la obra Calatraveña precisamente por lo polémica, se proyecta entonces una rica serie de recursos bibliográficos recabados durante años de estudio, de experiencias vivenciales frente a la obras del valenciano.

El trabajo se ha planteado en diferentes fases, que permiten entretejer un hilo conductor para intentar obtener respuestas, clasificada, escrutada y catalogada la documentación aportada, se descarta la información innecesaria del caso de estudio. Se analiza una serie de obras estratégicamente seleccionadas que aportan a la cuestión formal-estructural. Posteriormente, en la etapa experimental se somete una obra en concreto al análisis estructural, se procede entonces, a la elaboración de un modelo tridimensional, que se extrae para analizar la estructura y el aparato formal como una sola entidad.

Finalmente se procede a generar el documento de presentación del Trabajo de Fin de Máster, en el que se recopilará y ordenará toda la documentación consultada en las fases previas, en el que se sintetizará de manera lógica y coherente los datos relevantes del caso de estudio, a continuación, se expresa la estructura del trabajo con más de detalles de lo expresado en estas líneas.

ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente Trabajo Final de Máster, está estructurado en tres grandes capítulos, el primer capítulo aborda lo que he rescatado como “El Vocabulario Calatrava”, en el que se aborda la génesis del proceso creador de Santiago Calatrava que singulariza sus obras, como un código que soporta las mismas. Se hace compendio selectivo de obras, como una especie de semillero o de ecosistema formal, obras que encarnan el vocabulario del autor y que permiten mantener el foco del caso de estudio los límites entre la Estética y la Eficacia Estructural, este ecosistema se comprende como un ente vivo, porque se establecen sinergias vinculantes en la obra de Calatrava con otros grandes maestros de la arquitectura que también dedicaron gran parte de su vida a la expresión plástica de la estructura, como Gaudí, Nervi o Candela por nombrar algunos y que desde luego colectivizan el vocabulario.

El segundo capítulo denominado “la construcción El Vocabulario Tangible”, se concentra fundamentalmente en los puentes, todas las cuestiones analíticas se sintetizan especialmente con la capacidad resistente del aparato formal del puente, se seleccionaron tres puentes que por la innovación, las adolescencias primigenias en las nuevas resoluciones formal-estructurales y el impacto urbanístico constituyen un clásico, estos son: el Puente del Alamillo, el Bach de Roda y el Puente de Serrería, éste último, permite establecer la línea expedita al tercero y concluyente capítulo: “Resistencia y Estática del Vocabulario al Lenguaje. Un análisis más profundo, como en ninguna otra obra, porque es sobre este puente que recae el aspecto experimental y de comprobación, se modeliza en el software Auto CAD a base de elementos finitos y barras y se transporta al software SAP 2000 (la metodología específica de este apartado será ampliada más adelante) para el correspondiente análisis estructural del que se podrán extraer los datos concluyentes al caso de estudio... identificar los límites de la Estética y la Eficacia Estructural en la obra de Santiago Calatrava.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es elaborar un documento de tesis final de máster, en el que se realizará una práctica que permitirá resolver una inquietud de mi parte, en la obra de un autor en concreto: Santiago Calatrava, inquietud que nace del código estructural y del código estético-formal no para rivalizar entre ambos aspectos, sino para comprender si pueden ser solidarios y potenciar la eficacia en un acto simbiótico espontáneo (es decir comprender si Calatrava saca partido a la estética para conformar las estructuras) o comprender si en la naturaleza de su singular vocabulario hay límites que quizá impiden que las estructuras del valenciano produzcan resoluciones estéticas al tiempo espectaculares y eficaces.

El alcance de este trabajo es crear un documento con fines académicos, en el que se aborda el método experimental, se agotan los recursos teóricos, el bagaje de conocimiento previo y cultivado durante años de manera personal sobre la obra del arquitecto Calatrava, enriqueciendo esas experiencias previas con trabajo de campo que permite someter una obra en concreto, para dar respuesta al interrogante planteado y poder llegar a unas conclusiones

ACTUACIONES PREVIAS

Biografía, trayectoria de Santiago Calatrava

Ilustración 1 **Santiago Calatrava** en imagen de archivo

Fuente: Phillippe Jodidio TASCHEN



BIOGRAFÍA

Santiago Calatrava Valls nace el 28 de julio de 1951 en Benimàmet, una pedanía de Valencia, es el menor de cuatro hermanos, sus padres fueron Rafael y Concepción, el progenitor de Calatrava poseía huertas y era exportador de cítricos, gente que lo conoció de cerca en su infancia, menciona que Santiago Calatrava demostró una inclinación temprana por el arte y que de manera espontánea dibujaba caballos, seres humanos, alas de palomas, es así que a los ocho años mientras cursaba la enseñanza primaria (1956-1961) asistía a clases nocturnas en la Escuela de Artes y Oficios de Burjasot (1959-1960) allí se relacionaba con cristaleros, tallistas entre otros profesionales de las artes aplicadas. De alguna manera ésta experiencia representó el génesis del espíritu creativo de Calatrava, su aproximación a lo artístico no desvanecía, al contrario, una vez concluido sus estudios de secundaria (1961-1968) el joven Calatrava se vio tentado a estudiar en París en la École des Beaux –Arts, pero llegó en un mal momento, pues la escuela se encontraba en paro estudiantil.

Dicho “mal momento” hizo que Calatrava retomara en la Escuela de Bellas Artes de Valencia (1968-1969), hay un viejo refrán que dice: “los libros uno no los busca, los libros uno se los encuentra”, el joven Santiago apasionado por el arte un buen día descubre un libro de Le Corbusier, el padre de la arquitectura moderna, quizá el arquitecto más influyente de todos los tiempos, que ameritaría otra tesis robusta, es entonces cuando Calatrava decide estudiar arquitectura porque encuentra ciertas sinergias a través del color, el manejo de la luz y el poder de la forma encauzado en Le Corbusier y observa en la arquitectura la posibilidad de integrar su ambición artística. Se matricula entonces en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia (ETSAV) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) (1969-1973) por cierto, años después es investido miembro honorífico de la universidad y una de las calles del campus lleva su nombre. Sus compañeros de estudio lo recuerdan como un laborioso incansable, que dormía poco y hacía unas entregas de proyectos con un abanico de

posibilidades y soluciones que en algunos casos de manera excepcional los profesores no estaban seguros de como evaluarlo dado el nivel de singularidad de sus trabajos. Desde ya una “manifestación adolescente” de alguien que no pasaría inadvertido en el mundo.

El migrante español se instala en Zúrich

Para Calatrava lo determinante en el proceso formativo, lo representan los viajes, él realizó varios viajes entre ellos los de intercambio estudiantil por ejemplo a Burdeos (Francia) donde se relacionó con chicos provenientes de suiza, a los cuales visitó luego en Zúrich, otra faceta de Calatrava, cultivar los idiomas, muchos de sus viajes estuvieron patrocinados con los esfuerzos de su tío Agustín, también residente en Benimàmet, pues Santiago Calatrava quedó huérfano, cuando faltó su padre en su adolescencia, aunque ahora nos cueste imaginarlo, el hoy cultivado arquitecto en su juventud llegó a descargar naranjas en París para costear su estadía durante los viajes, pues era de una familia modesta, *lo que me parece interesante de recabar en la historia del genio español en estas líneas, es sorprenderme de que **la sabiduría, el entusiasmo y la determinación son infalibles para obtener el éxito en la vida , hay que estar en el lugar indicado en el momento indicado, no contar previamente con una posición crematística no es limitante para aprehender una posición relevante e influyente en la cultura, en la disciplina de la arquitectura, y en general para desempeñar con brillantez tu oficio, integrando sociedad y cultura las cuales se entretajan en el reconocimiento de su propio contexto geográfico.***

Retomando, desde finales de carrera en la ETSAV Calatrava ya planeaba establecerse en el extranjero, porque percibía que sus ambiciones no podían ser colmadas, concretamente, **deseaba llevar sus obras al límite estético** decide matricularse en la Facultad de Ingeniería Civil ETH de Zúrich (Eidgenössische Technische Hochschule) (1975-1979) uno de los grandes politécnicos de Europa con una veintena de premios Nobel, allí Calatrava arquitecto y con un postgrado en Urbanismo, establece contactos con gente próxima a Aldo Rossi, el influyente arquitecto italiano, que propendía por la recuperación de los elementos de la tradición arquitectónica denominado “Tendenza” En contexto este aspecto no

trascendió demasiado en Calatrava quien estaba más entusiasmado en la expresión artístico-ingenieril y más enajenado de los aspectos contextuales que promovía la filosofía de Rossi, aspecto que sí resultó relevante en su paso por la ETH, fue estudiar al célebre ingeniero suizo Robert Maillart (1872-1940) quien proyectó puentes con sutileza y finura excepcional, Calatrava observará su trabajo y enriquecerá su repertorio de modelos estructurales, interioriza a Maillart en su proyecto de fin de carrera el puente Aclèta Alpine, que establece sinergias palpables con el puente de Salginatobel del Ingeniero suizo.

Calatrava llegó a ser catedrático como profesor asociado de la ETH en el área de Estática de la Construcción y de Aerodinámica y Construcción, desarrolló su tesis doctoral *“sobre la plegabilidad de las estructuras”* (más adelante profundizaré en el desarrollo de su tesis planteando unas reflexiones que desencadenaron en algunas de sus obras)

La figura de Robertina Marangoni es determinante

Los primeros años de ejercicio profesional fueron duros, el primer encargo fue una reforma un balcón (1983) donde ya se advierte su pasión por el gótico, Calatrava declara que no veía solamente un balcón sino una condensación de expresividad formal y artística intensa, inició en una oficina modesta, la posición acaudalada de su mujer Robertina a quien conoció en su paso por la ETH una estudiante de derecho sueca, fue un espaldarazo a las ambiciones del Benimàmet, el almacén Ernsting al noroeste de Alemania y la Estación de Stadelhofen en Zúrich fueron los proyectos que internacionalizaron a Calatrava dándole una prematura exposición al mundo de los arquitectos de primera línea, concretamente Stadelhofen favoreció la recepción de proyectos en distintas zonas de Europa, en España hizo eco lo que estaba logrando en Zúrich y su primera muestra para exhibir los músculos del “Vocabulario Calatrava” fue Barcelona con su puente Bach de Roda, con la excusa de crear una escultura por medio de un puente.

Calatrava fue muy hábil a menudo exhibía sus esculturas y dibujos y sus primeras obras en galerías y museos porque sabía que posteriormente tendría repercusión en el resto del globo, es así que a la apertura de su despacho en Francia para trabajar en Satolas TGV, en Lyon(1989-1994) tranquilamente podía

asistir a Sevilla para supervisar su puente icónico del alamillo(1992) y después a Toronto para supervisar su proyecto de un gran hall a modo de marquesina, se empezaba a consagrar como una figura rompedora, singular neogótico, la aproximación del arquitecto a Valencia su tierra natal merece un capítulo a parte en el desarrollo de esta investigación que me permitirá desarrollar más adelante.

Haciendo un paréntesis en la vertiginosa carrera de Santiago Calatrava premiado con una veintena de Doctor Honoris Causa, el premio Europeo de Arquitectura y entre otros galardones de gran con el premio Príncipe de Asturias de las Artes, tan solo concedido a tres arquitectos de renombre en el mundo, el monstruo carioca de la forma Niemeyer una leyenda en Brasil y el británico quizá el arquitecto vivo más influyente del mundo Sir Norman Foster con quien por cierto Calatrava tiene una enemistad a muerte porque le arrebató dos proyectos en concurso, la torre de telecomunicaciones de Collserola y el aún más impactante renovación de la cúpula del Reichstag Palace, (Berlín) en el que Calatrava y Foster resultaron finalistas, Calatrava acusó a Foster de aprovechar su diseño y copiarle cuando el británico no había contemplado hacer una cúpula en su primer propuesta, promovía una especie de gran pórtico ligero, Calatrava era el único que propendía por la recuperación de la memoria de la cúpula destruida después del incendio producido por los nazis (1933) su propuesta una cúpula a partir de pétalos vidriados con posibilidad de moverse, “¿Qué tiene Foster que no tenga yo?” frase reiterativa de Calatrava. A pesar de sus esfuerzos para impedir que Foster se apañara con el encargo, no trascendió su queja y Alemania optó por la cúpula presentada en la segunda fase del concurso ofrecida por el británico, hoy símbolo del parlamento alemán. Al margen de los sinsabores hay que decir que la carrera de ambos arquitectos ha sido fructífera y que ha sido “capricho del destino” hacerlos coincidir en codiciados encargos.

Pero después de varios años de efervescencia constructiva particularmente en España, se empezaron a ver y valorar aspectos en la repercusión de muchos de sus obras con una índole negativa, hasta el punto de pasar del elogio a la polémica, al descredito moral por parte de sus detractores, los sobrecostes de sus obras, el costoso mantenimiento de las mismas, patologías en fachada, filtraciones de agua en varias de sus instalaciones, butacas sin visibilidad al

escenario, el no prever escaleras de emergencias, las modificaciones sobre la marcha, también son famosos puentes acristalados donde el viandante patina y ocasionalmente la plataforma puede llegar a ser un rompe piernas, (Bilbao y Venecia) éstos últimos le llevaron a enfrentamientos con la administración pública en los juzgados de las comunidades como Bilbao, Oviedo, Valencia, Castellón, Venecia, Palma de Mallorca, ampliamente conocidos por muchos. Así es, todo hay que decirlo, una etapa otoñal incómoda para el considerado genio español desde dos perspectivas opuestas: un artista de gran poder icónico, que aporta desde una dimensión poética para que la obra arquitectónica trascienda a los niveles del arte y de otra parte, denostado por otros con severas críticas, como es la de considerársele un personaje egocéntrico que no tiene en cuenta el contexto, la escala o el clima donde inserta sus obras.

Santiago Calatrava un arquitecto perseverante

A pesar de las críticas y del estallido de la burbuja inmobiliaria en Europa Calatrava trasladó su domicilio fiscal y su centro de operaciones es en el cantón de Zúrich, dejó España la tierra donde más ha construido probablemente, pero para abrirse paso en los Emiratos Árabes unidos, abrió oficinas allí, trabaja con uno de sus cuatro hijos, Micael Calatrava que intenta seguir los pasos de su padre. También ha dejado huella en el corazón de Nueva York con su terminal de transportes WTC (World Trade Center Transportation Hub)

Actualmente el valenciano está proyectando el que será el rascacielos más alto del planeta con más de un kilómetro de altura la Dubái Creek Tower que espera estar finalizada en el 2022, también construye un pabellón inspirado en un halcón recientemente inaugurado para la Expo Dubái 2020 aplazada por la contingencia de la pandemia COVID -19 y celebrada hace poco. Se ha visto tentado a trabajar de nuevo en Latinoamérica concretamente en Colombia mi país, donde el alcalde de mi localidad (Santiago de Cali) le ofreció que construyera un puente, Calatrava manifestó en una entrevista radial en una prestigiosa cadena colombiana del grupo Prisa (La W Radio) donde el arquitecto declara: “estaría naturalmente encantado de poder trabajar en un país como Colombia, además para los amamos la literatura y nos encanta Gabriel García Márquez tiene una

enorme carga importante” recordemos que su más reciente intervención en esta área del globo es Brasil con su Museo del Mañana de Rio de Janeiro (2015).

También el arquitecto espera ver concretada su primera gran obra para los británicos “London Península Place” (2020) en el corazón del Támesis, hace parte del ambicioso plan de renovación urbana más grande hoy por hoy en Londres, que pretende revitalizar la península de Greenwich y está llamado a ser el distrito cultural emergente para los londinenses, Calatrava dice que éste proyecto será la síntesis de sus cuarenta años de carrera.

Calatrava en la actualidad

Hoy por hoy sigue creando, sigue dibujando, goza de un patrimonio que le posiciona entre las fortunas más representativas del país helvético, cuenta con propiedades en las zonas más exclusivas de Nueva York y Zúrich, su carrera llena de luces y sombras hacen de Santiago Calatrava un personaje singular difícil de igualar. Difícilmente volverá a trabajar en España, el periodo histórico de efervescencia arquitectónica ha cesado, después del seísmo que significó la crisis del 2008 en el mundo y particularmente en la península ibérica.

Parece inevitable que se sumerja en la polémica, recientemente entre el furor y la magia de los fuegos artificiales de la inauguración de la Expo Universal de Dubái, Calatrava asistió y orgulloso exhibe dos de los más importantes pabellones (el de Qatar y el de los Emiratos Árabes Unidos), por contraste, también se divulgó por estos tiempos los Papeles de Pandora y curiosamente su nombre también aparece aquí, la prestigiosa revista Forbes acaba de dedicarle un artículo

“Los puntos de ‘fuga’ fiscales de Santiago Calatrava, el arquitecto español que más ha facturado en el mundo”

(Echarri, 2021)

Es difícil realizar una radiografía completa en unas líneas de un personaje tan relevante como controvertido y polémico. A continuación cronológicamente veremos un listado de sus obras concretadas desde 1983 hasta la fecha.

TRAYECTORIA

- 1983..... Balcón Baumwollhof (Zúrich)
- 1985..... Toldo del Centro Postal PTT (Lucerna)
- 1985..... Almacén de Ernstings (Coesfeld- Alemania)
- 1986..... Sala de conciertos de la Escuela de Música (San Galo)
- 1987..... Bach de Roda - Puente Felipe II (Barcelona)
- 1987..... Teatro Tabourettli (Basilea)
- 1988..... Escuela Secundaria Wohlen, techos y pasillo (Wohlen)
- 1988..... Puente 9 de Octubre (Valencia)
- 1989..... Pasillo de la Estación de Lucerna (Lucerna)
- 1990..... Estación de Stadelhofen (Zúrich)
- 1991..... Puente de Lusitania (Mérida)
- 1991..... Pasarela La Devesa (Ripoll)
- 1992..... BCE: Galería & Heritage Square (Toronto)
- 1992..... Puente del Alamillo y Viaducto de la Cartuja (Sevilla)
- 1992..... Torre de Comunicaciones de Montjuic (Barcelona)
- 1992..... Pabellón de Kuwait (Sevilla)
- 1993..... Máquina de Sombras (Nueva York)
- 1994..... Estación de Lyon-Saint-Exupéry TGV (Lyon)
- 1995..... Puente Puerto (Ondárroa)
- 1995..... Puente de la Alameda y Estación de Metro (Valencia)
- 1995..... Recinto Ferial de Tenerife (Santa Cruz de Tenerife)
- 1995..... Remodelación de la Plaza España (Alcoy)
- 1995..... Puente Peatonal Trinity (Manchester)

- 1996..... Urbanización Buchen (Würenlingen-Suiza)
- 1996..... Parada de Autobús y Tranvía de Bohl (San Galo)
- 1996..... Puente Kronprinzen (Berlín)
- 1996..... Torre de Control del Aeropuerto de Sondica (Bilbao)
- 1997..... Pasarela Campo Volantín (Bilbao)
- 1998..... Centro de Servicios de Emergencia (San Galo)
- 1998..... Estación de Oriente (Lisboa)
- 1998..... Puente Peatonal Mimico Creek (Toronto)
- 1999..... Hospital Puente (Murcia)
- 1999..... Pasarela Manrique (Murcia)
- 1999..... Galería Pfalz Keller (San Galo)
- 2000..... Aeropuerto Sondica (Bilbao)
- 2000..... Pont de l'Europe (Orleans)
- 2001..... Museo de Arte de Milwaukee (Milwaukee)
- 2001..... Bodegas Ysios (Laguardia)
- 2001..... Puente de la Mujer (Buenos Aires)
- 2001..... Capsula del New York Times (Nueva York)
- 2001..... Escenario Las Troyanas (Valencia)
- 2002..... Escultura Ondulada del Museo SMU Meadow (Dallas)
- 2003..... Adán Martín Auditorio de Tenerife (Santa Cruz de Tenerife)
- 2003..... Puente James Joyce (Dublín)
- 2003..... Escenario Ecuba (Roma)
- 2004..... Puente Peatonal del Reloj de Sol (Redding)
- 2004..... Facultad de Derecho de la Universidad de Zúrich (Zúrich)
- 2004..... Puentes sobre el Hoofdvaart (Dedemsvaart- Países Bajos)
- 2004..... Complejo Deportivo Olímpico (Atenas)
- 2004..... Puente Peatonal Káthaki (Atenas)
- 2005..... Turning Torso (Malmö)
- 2006..... Pasarela Petah-Tikva (Tel Aviv)
- 2007..... Puente Reggio Emilia (Reggio Emilia)

- 2008..... Puente de la Constitución (Venecia)
- 2008..... Puente de Cuerdas - Tren Ligero (Jerusalén)
- 1998 - 2009..... Ciudad de las Artes y las Ciencias (Valencia)
- 2009..... Estación de Tren TGV (Lieja)
- 2009..... Puente Samuel Beckett (Dublín)
- 2009..... Obelisco Plaza de Castilla (Madrid)
- 2009..... Obelisco de Haifa (Haifa)
- 2010..... Ballet de la Ciudad de Nueva York (Nueva York)
- 2011..... Palacio de Congresos de Oviedo (Oviedo)
- 2012..... Puente Margaret Hunt Hill (Dallas)
- 2012..... Puente de la Paz (Calgary)
- 2014..... Estación Reggio Emilia (Reggio Emilia)
- 2014..... Edificio de Innovación Ciencia y Tecnología (Lakeland)
- 2014..... Universidad Politécnica de Florida (Lakeland)
- 2015..... Museo del Mañana (Río de Janeiro)
- 2016..... Estación del World Trade Center (Nueva York)
- 2018..... Puente Sul Crati (Cosenza)
- 2021..... Pabellón de los Emiratos Árabes Unidos (Dubái)
- En construcción... Torre Dubái Creek (Dubái)
- En construcción... Gare de Mons (Mons – Bélgica)
- En construcción... Iglesia Ortodoxa Griega de San Nicolás (Nueva York)
- En construcción... Ciudad de los Deportes Universidad Tor Vergata (Roma)
- Detenido..... (2005) Torre de la Aguja (Chicago)
- 2019..... (Finalista) Terminal Global de O'Hare (Chicago)
- Próximamente..... Península Place (Londres)
- Próximamente..... Edificio de Oficinas (Zúrich)/ Plan Maestro Sharq (Doha)/
 Puente del Canal de Huashan (Wuhan)/ Puentes Margaret Mcdermott (Dallas)/
 Viaducto de Polcevera (Génova)/ Edificio Universidad Yuan Ze (Taipéi)

PRIMERA PARTE
El Vocabulario Calatrava

I

El Vocabulario Calatrava

“A la hora de trabajar a nivel de bocetos, es la plena libertad, no solamente no me he ligado nunca a una técnica precisa como la acuarela por la dificultad que presenta y la cantidad de ejercicio, pero al mismo tiempo por la gran libertad y la gran espontaneidad que la acuarela tiene en sí, porque hay muchísimo de puramente casual e incontrolable y esto da una gran belleza, es como la vida misma, es decir en la que uno no sabe qué va a pasar inmediatamente después y cada segundo es nuevo e irrepetible. Si el boceto ayuda a la construcción es porque es la única parte espontánea de todo el proceso”

Santiago Calatrava

1.1 Herencia Plástica: La Estructura como Arquitectura

La lonja era una bolsa de productos agrícolas y puesto que el padre de Calatrava se dedicaba al comercio de cítricos, lo llevaba allí con frecuencia de niño, al interior de este majestuoso vestíbulo se desarrollaban escenas de lo cotidiano, compra y venta de mercancía. Cuando se está en el interior de la lonja se siente como una gran escultura, es como si la hubiesen tallado de un solo bloque, es decir, es la arquitectura materializada en piedra, pero es en sí misma un homenaje a la relación entre llenos y vacíos, el lleno materializado en las columnas y el vacío que se materializa entre los intercolumnios. Mi experiencia personal en la Lonja cuando la visité por primera vez, fue tremendamente emocionante y estimulante, La dimensión dinámica en contraposición al edificio cúbico viene dada por las helicoides ascendentes de las columnas que giran paulatinamente en torsión y luego se derraman y abren en las bóvedas, (imagen1). Capturando el drama del movimiento y el rico valor plástico de la estructura como identidad expresiva de la arquitectura. Proyectando La Lonja fuera de la época, en una condición de modernidad atemporal que la hacen hoy todavía perfectamente válida y admirable. Calatrava retomará estas vivencias del gótico civil, su memoria cultivada, le llevará a adoptar la naturaleza del origen de sus obras radicalmente concentradas en el formalismo estructural y el intenso diálogo de fuerzas de la física de tracciones y compresiones explícitas.



Imagen 1. Lonja de la Seda:

Valencia 1.470

Fuente: Propia

La plena libertad, que viene del hecho plástico, es un aspecto prioritario para Calatrava y así llevar a la estructura a un punto de inflexión, hasta el punto de crear una experiencia arquitectónica estimulante como dramática. Esa espontánea y primigenia aproximación del gótico civil presente en su niñez con la Lonja, (de la cual ya he expresado Calatrava se declara admirador profundo) traducida a un problema arquitectónico posterior para desarrollar en 1993 el encargo de la estación de Oriente en Lisboa Portugal, concluida en 1998, donde en *una secuencia lógica por analogía*, la transición constructiva se hace explícita: orquestación de arcos que sostienen el tablero de hormigón, del cual emergen luego el bosque de columnas ramificadas que se derraman para soportar la gran cubierta vidriada que acoge a la estación, una lógica interior que expresa el recorrido ininterrumpido desde los soportes hasta que aflora el remate, otorgando un lenguaje de continuidad en un drama estructural poético. En un intento por conquistar la fidelidad estructural del movimiento gótico, y me es inevitable recordar al ingeniero Viollet-le-Duc, una voz autorizada en términos de sinceridad estructural.

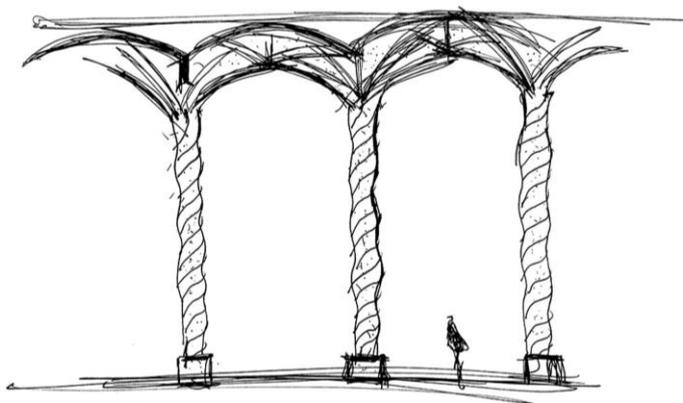
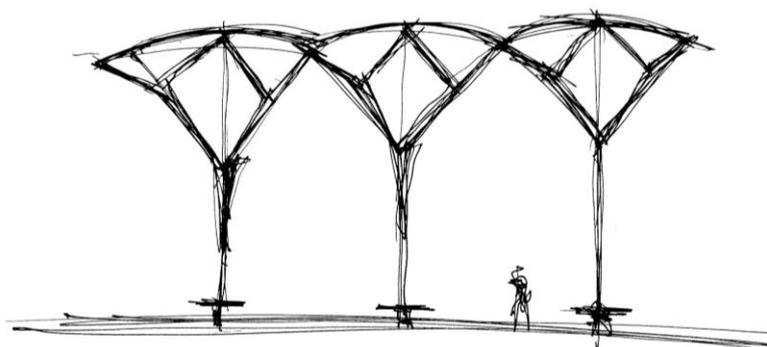


Imagen 2. Secuencia Análoga:

*Lonja de la Seda –Valencia /
Estación de Oriente - Lisboa*



Fuente: Propia

El dialogo de llenos y vacíos y la transición constructiva en paralelo es un hecho manifiesto (imagen 2) análogamente ambas obras adoptan la jerarquía estructural sobre la espacialidad que abrigan y ejemplifican expresiones estructurales en sí mismas, dignas de una catedral.

1.2 La Analogía... el trabajo en lógica paralela

La idea de la estación de Oriente consistía en crear “un pequeño bosque sobre el puente de hormigón.” El vocabulario Calatrava está impregnado de una tendencia clara hacia la organicidad entendida como una lógica interior que hace que todas las cosas y todas las partes de un edificio sirvan a una sola idea que es el edificio en sí mismo, entonces toda esa lógica interna que une los diferentes perfiles de hormigón y que los articula unos con otros, creando arcos y arcos sobre arcos que llevan luego a las plataformas del tren sobre las cuales se insertan las columnas “los árboles” que al mismo tiempo se extienden y ramifican desde la parte superior para soportar el vidrio, precisamente esa tendencia

constructiva en la que cada una de las partes sirve la otra y en un proceso lógico, , en ese sentido, eso es lo que yo entiendo por organicidad, la relación de las partes y el todo. La transición constructiva es patente en la estación de Oriente (imagen 3)

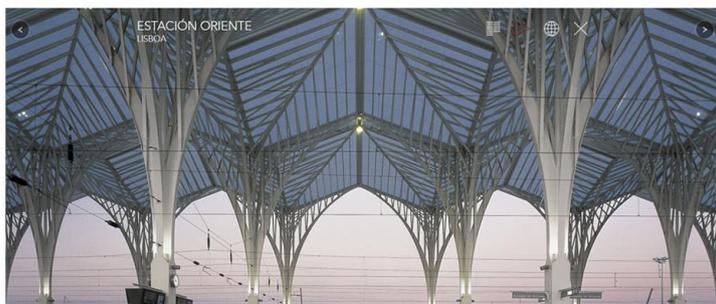
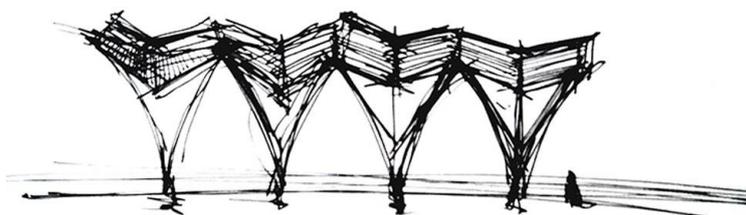


Imagen 3. Estación de Oriente:

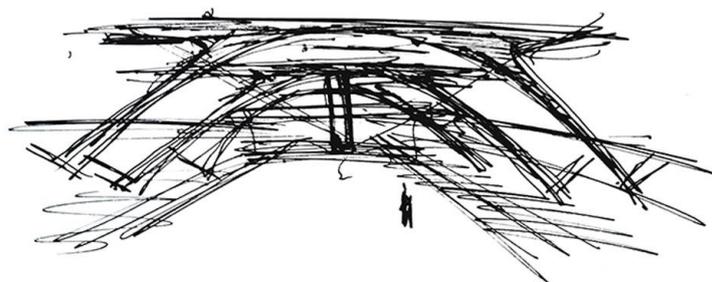
Lisboa 1998

Fuente Fotografía:
(Calatrava, calatrava.com, 2020)



Bocetos Estación de Oriente

Fuente propia



Hacia una Organicidad

Así pues, la arquitectura orgánica no es la imitación de formas arborescentes exclusivamente, traducir un edificio a un árbol de manera literal es casi ridículo porque los edificios en comparación con un elemento vivo son mucho menos complejos, va más allá, lo orgánico viene dado por comprender el orden interno de las cosas, por comprender cómo opera la naturaleza, desde el juego de las fuerzas internas presentes en el mundo natural (el árbol) para trasladarlas en paralelo hasta los elementos funcionales en el mismo edificio (la estructura)

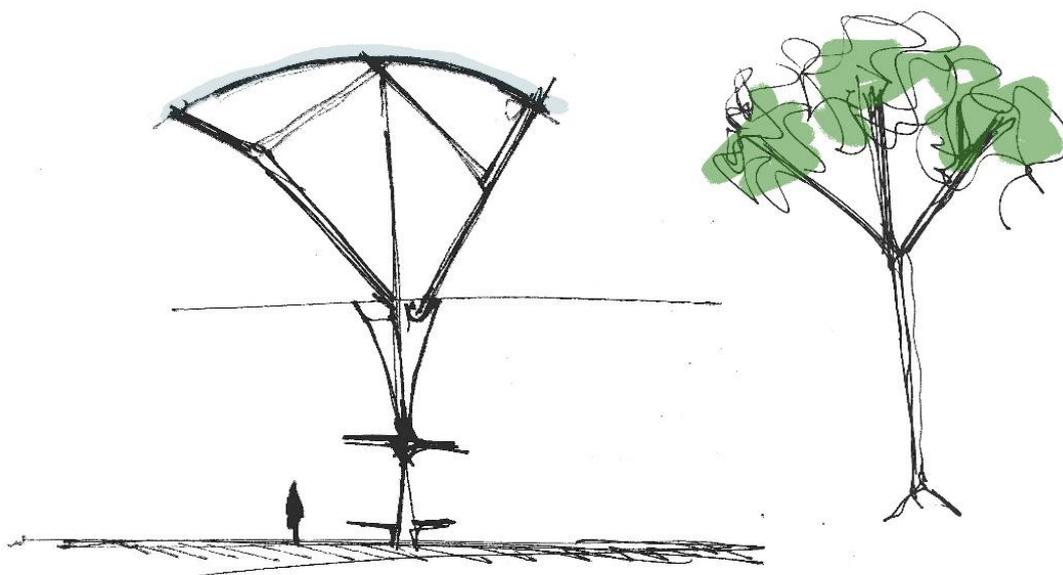


Imagen 4. Organicidad, eficacia portante:

Fuente: propia

(Imagen 4) Esquema análogo de la conformación de cada una de los pórticos de la estación de Oriente en paralelo con la estructura ramificada de un árbol.

1.3 Obras Determinantes.

He advertido que me concentraré en un número exclusivo de obras del valenciano, para exponer en la particularidad de dichas obras, los aspectos que encarnan el Vocabulario Calatrava e identificar hacia donde se inclina la balanza entre estética y eficacia entre los proyectos seleccionados. Capitalizaré el concepto de memoria colectiva cultivada, heredado de Paco Nieto en la cátedra de Estrategias Projectuales, que alude en términos generales a esa mirada en retrospectiva, al subconsciente, lleno de experiencias vividas que te han marcado, producto de numerosos viajes, los libros, la música y todo lo que sea estimulante, esa mezcla de intereses que se cultivan con el tiempo y que afloran a la hora de enfrentar un proyecto. Así que identificaremos también la memoria colectiva cultivada de Santiago Calatrava.

1.4 Memoria Colectiva Cultivada

Gaudí: *Las sinergias manifiestas entre Stadelhofen y el Parque Güell*



Imagen 5 Identidad Gaudiniana

(Izquierda) Park Güell Barcelona 1914 fuente: Propia / (derecha) Estación Stadelhofen - Zúrich 1990

Fuente: (Calatrava, calatrava.com, 2020)

Estación Stadelhofen 1983-1990

Inserta alrededor de una colina, inmersa en el denso tejido urbano de Zúrich, su planta curva, sus flamantes marquesinas sostenidas por pilares inclinados, la influencia de Gaudí en particular en el desarrollo de los pórticos conformados por las columnatas orgánicas del parque Güell es un sello patente que sobrevive en la estación de Stadelhofen (imagen 5). El Parque Güell también comprende un emplazamiento de topografía movida, y el genio de Gaudí encajó sabiamente el proyecto con su ideología organicista, la búsqueda del “encaje correcto de un material con otro” y la exploración y aportaciones de soluciones estructurales y constructivas. *“El concepto principal de esta estación es claro: Calatrava la convirtió en una especie de jardín a lo Park Güell siguiendo la geometría de la antigua muralla”*, declara un antiguo colaborador de Calatrava. El pórtico es solo uno de los aspectos de identidad Gaudiniana, Stadelhofen es un proyecto exitoso, la sensibilidad del proyectista consigue que la estación siga la lectura de

la topografía del terreno, entre otras proezas, está el hecho de sabiamente incorporar el contenido programático excavando sobre la colina y ganando terreno a la ladera para luego sostenerla con la potente marquesina que dignifica la escala del usuario. Ecos orgánicos en pasamanos, bancos para esperar el tren se integran en el conjunto, sobre todo destaca la permeabilidad de la estación, recupera el carácter cívico del espacio y articula varios puentes que van trenzando los recorridos y se constituyen como hilos conductores con la trama urbana, salvando distancias, otorgándole a la estación un carácter vinculante que permite la interconexión de dos niveles de terreno, compensándolos y en ese sentido, la estación vista como un elemento de transición. La zona subterránea protegida por el típico costillar que emplea Calatrava, recuerda la osamenta de un gran pez, contiene una galería comercial que filtra la luz con la provisión de los lucernarios que nacen del mismo costillar y que se constituyen como rasgaduras en estos arcos para inyectar luz natural en la penumbra. Es evidente que el proyecto es abordado en sección (imagen 6) efectivamente se excava en el interior de la colina para habilitar tres andenes del ferrocarril.

Esta obra marcó un hito en su época creando una atmosfera constructivista que exalta y magnifica a la estructura todos los elementos de soporte son desnudos, visibles, resaltados, una arquitectura a una escala que dignifica al individuo y el entorno marcado por la horizontalidad sin competir con el tejido urbano preexistente, hábilmente “proyectando en el vientre de la colina para acoger el contenido programático” pues había un edificio clásico de la antigua estación que debía mantenerse y la estación tenía que resolver la demanda de más viajeros y conformar nuevos ejes viales que a simple vista no tenían cabida, quizá por eso ganó el concurso, supo hábilmente enfrentar una dificultad de déficit espacial, sumado a la enrevesada topografía que Calatrava capitalizó para adaptar la estación con el alma del entorno la sinuosidad de la naturaleza, una rica simbiosis que termina de reafirmar el sello Gaudí, una arquitectura que rinde culto a la naturaleza y que emplea un vocabulario análogo de la misma naturaleza, para enriquecer la forma estructural que da cuerpo a Stadelhofen.

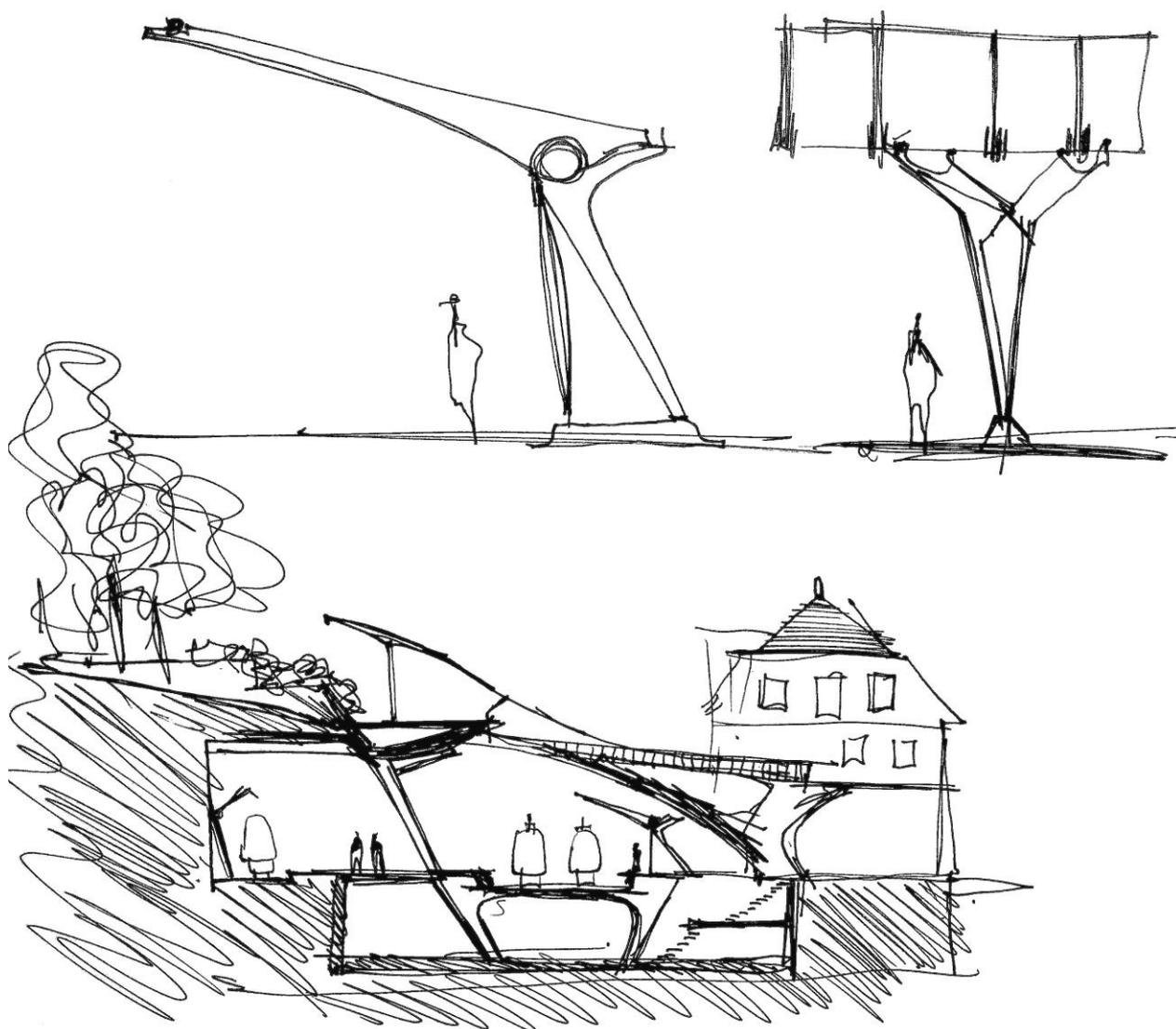


Imagen 6. *Proyectando en el vientre de la colina.*

Sección y alzado Marquesina Estación Stadelhofen- Zúrich.

Fuente: Propia

Muchos críticos receptivos del logro en Stadelhofen, coinciden en que es probablemente el proyecto con mayor grado de excelencia por parte del valenciano, triunfa plenamente el trabajo ingenieril con un lenguaje expresivo, un vocabulario formal intenso, este grado de dedicación al detalle Calatrava no lo

pudo mantener por mucho tiempo, dada la posterior acumulación de encargos por varios países del globo, Stadelhofen es el punto de inflexión de su carrera.

Los límites de la estética y la eficacia están compensados, en equilibrio no hay un alarde formal que subordine o someta de manera excesiva la manera de “soportar las cosas”, estructura y forma en compensación armónica.

Revolucionario Gaudí.

Antoni Gaudí definió un sistema arquitectónico revolucionario primordialmente en su concepción estructural, estética y espacial, el padre del Modernismo Catalán representó un camino dirigido a la naturaleza homenajeándola por su lógica interna. Gaudí emplea generalmente la piedra en su arquitectura, a su favor tiene la ventaja de que sus obras perduran con dignidad en el tiempo, pero con un detalle, los materiales pétreos adolecen de resistencia a la tracción, por ello se hace indispensable conocer la forma global de la estructura para que se encuentre totalmente comprimida, es decir disponer la piedra de la manera en que mejor trabaja, garantizar la compresión total coincidiendo con la línea de presiones lo que en síntesis garantiza la estabilidad, la idea es garantizar que los puntos de contacto en tensión sean mínimos, el secreto está en la correcta adaptación de la forma y la proporción estructural de la construcción siguiendo las leyes de la mecánica y para conocer la correcta disposición de la forma Gaudí descubre la posibilidad de simetrizar la catenaria le proporcionaba la formalización de uno de los arcos más perfectos, el único que adopta perfectamente “la línea de presiones” *que distribuye los esfuerzos a compresión pura y siempre bajo la dirección y sentido de la resultante de fuerzas.*

Los empujes irán incrementándose según varíe la relación entre luz y flecha y tenderán a separar los apoyos, para amortiguar esas cargas de empuje se requiere un elemento estructural solidario o mediático, por ejemplo una columna que recibe una carga horizontal en su capitel perpendicular al eje. Por ello se orientan los apoyos de manera que su eje coincida con la recta de acción de la resultante de este modo surgen las columnas con inclinación, lejos de ser un gesto formalista, es comprender la disposición correcta de transmisión de las cargas, la belleza triunfa plena y también la fidelidad estructural que se traduce

en las galerías del Parque Güell ya mencionadas como referente patente en Stadelhofen, se puede inferir a partir del eje del arco cual debe ser la inclinación del eje de la columna que coincide con la recta de acción de la reacción del arco, garantizando así que trabaje en compresión simple (imagen 7)

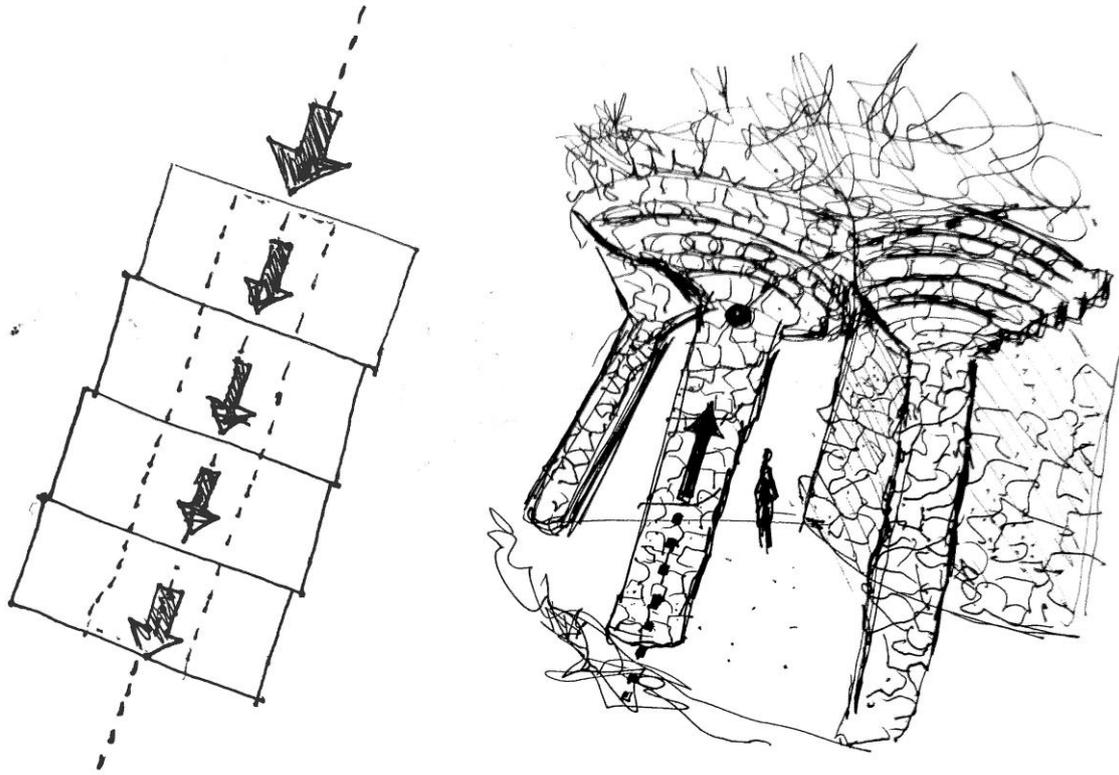


Imagen 7. *“Garantizando la compresión simple”*

(Izquierda) Gráfico de fuerza, expresión de la dirección de las cargas (derecha) Esquema estático
Galería del Parque Güell,

Fuente: Propia

Edificio Centro de Emergencias 1988-1998

Gaudí, este arquitecto extraordinario, es fuente recurrente de inspiración para Calatrava, sinergias expuestas en el caso anterior (Stadelhofen- Park Güell) se integran también entre el Colegio y convento religioso de las monjas Teresianas en Barcelona (1889) proyectado por Gaudí, en particular destaca una de las naves que integra una serie de arcos catenarios que inyectan luz cenital al deambulatorio generado, arcos que surgen de la necesidad de dar estabilidad a los muros laterales que separan las tres crujías del convento, en este proyecto tiene valor el aspecto material en el que Gaudí articula una transición constructiva pasando de la fábrica de ladrillo a la fábrica de yeso en secuencia.

Calatrava hace una particular lectura de los arcos catenarios del Colegio de las Teresianas de Barcelona e integra una serie de arcos en el vestíbulo central del edificio de emergencias en San Galo (1998) una edificación subterránea de planta libre, que hoy por hoy alberga oficinas gubernamentales en la que también el aporte de luz cenital es filtrada (imagen 8) Son ampliamente conocidas las exploraciones con maquetas funiculares que Gaudí ideó para la comprensión de la lógica estructural, las formas inversas de los hilos colgantes catenarios, funiculares o parabólicos que adoptan la forma producto de su propio peso por el efecto de la gravedad, siempre traccionados, estos modelos invertidos luego eran fotografiados y simplemente girando la imagen 180º podía entonces aplicarlo a la modelización y construcción de los arcos más estables, todo esto, con una profunda intuición y sentido de observación de Gaudí, con gran sensibilidad para comprender la manera en que opera la naturaleza.

El ritmo de los arcos que sustentan el potente hall del centro de emergencias de Calatrava, recuerdan a los arcos del pasillo del Colegio Teresiano proyectado por Gaudí.

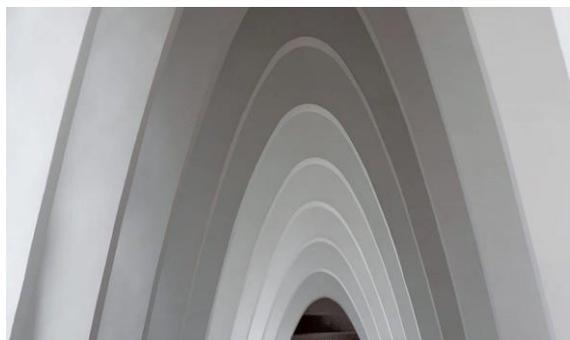


Imagen 8. El mundo de los Arcos

Centro de Servicios de Emergencias

San Galo, 1998

Fuente: (Calatrava, calatrava.com, 2020)



Pasillo, Colegio de las Teresianas

Barcelona, 1889

Fuente:

(dosde-publishing, 2019)

Bodegas Ysios 1998-2001

El espíritu de movimiento hace que la cubierta sinusoidal sea el elemento más destacado, eso sí, después de la majestuosa montaña que abraza el panorama en Álava, su techo describe una onda de superficie reglada, entre cóncavo y convexo se mantiene este ritmo en una sucesión de largas piezas revestidas en aluminio que le proporciona brillo que con determinados efectos lumínicos suele apreciarse como las cota más alta de la montaña un grisáceo blanquecino. El edificio es básicamente una bodega para elaborar almacenar y vender vinos, no es usual la exquisitez en el diseño de naves industriales, generalmente son hangares con grandes luces sin mayor detenimiento en la estética, pero la marca solicitaba un edificio icónico para destacar su prestigioso vino La Rioja Alavesa, Calatrava aportó un edificio con una marcada horizontalidad, la ondeante cubierta se apoya en dos muros portantes de hormigón de 126 metros de largo

paralelos a una distancia de 26 metros, aquí los muros también siguen una línea sinusoidal más discreta que la aportada por la cubierta, esta condición además de la plasticidad formal, proporciona mayor estabilidad en los dos ejes del muro (imagen 9).

Aunque la ondeante plasticidad (en términos expresivos) de Bodegas Ysios que produce esta especie de repliegue ya fue abordada por el genio de Gaudí en la última fase de su estilo naturalista: Las Escuelas de la Sagrada Familia (1909) un pequeño edificio anexo a la Iglesia de La Sagrada Familia destinado en su época a la enseñanza de los hijos de obreros que trabajaban en la construcción de su obra cumbre, aquí Gaudí logró la perfecta armonía e interconexión de los elementos estructurales y los ornamentales, así pues, estética y afinidad plástica traducida en potenciación estructural, en favor de mayor resistencia la dinámica en planta también los muros curvilíneos orquestados en una planta rectangular de 10 x 20 metros y 5 metros de altura integraba tres aulas, un vestíbulo y capilla, la exposición al desnudo del ladrillo y el perfecto acople bajo la tradición de la técnica de la bóveda Catalana.

Gaudí quien siempre manifestó que la articulación entre las piezas debe surgir tan natural y espontánea como las formas de la naturaleza, su intuición y su marcada espiritualidad hacia lo divino, le granjearon grandes alternativas singulares que encarnan el modernismo, la resistencia estructural alcanzada en este edificio de pequeño formato a partir de superficies de doble curvatura ha sido ampliamente retomada por grandes constructores como el célebre ingeniero Eduardo Torroja (1899-1961) Madrid, el extraordinario Pier Luigi Nervi o el magnífico Félix Candela.

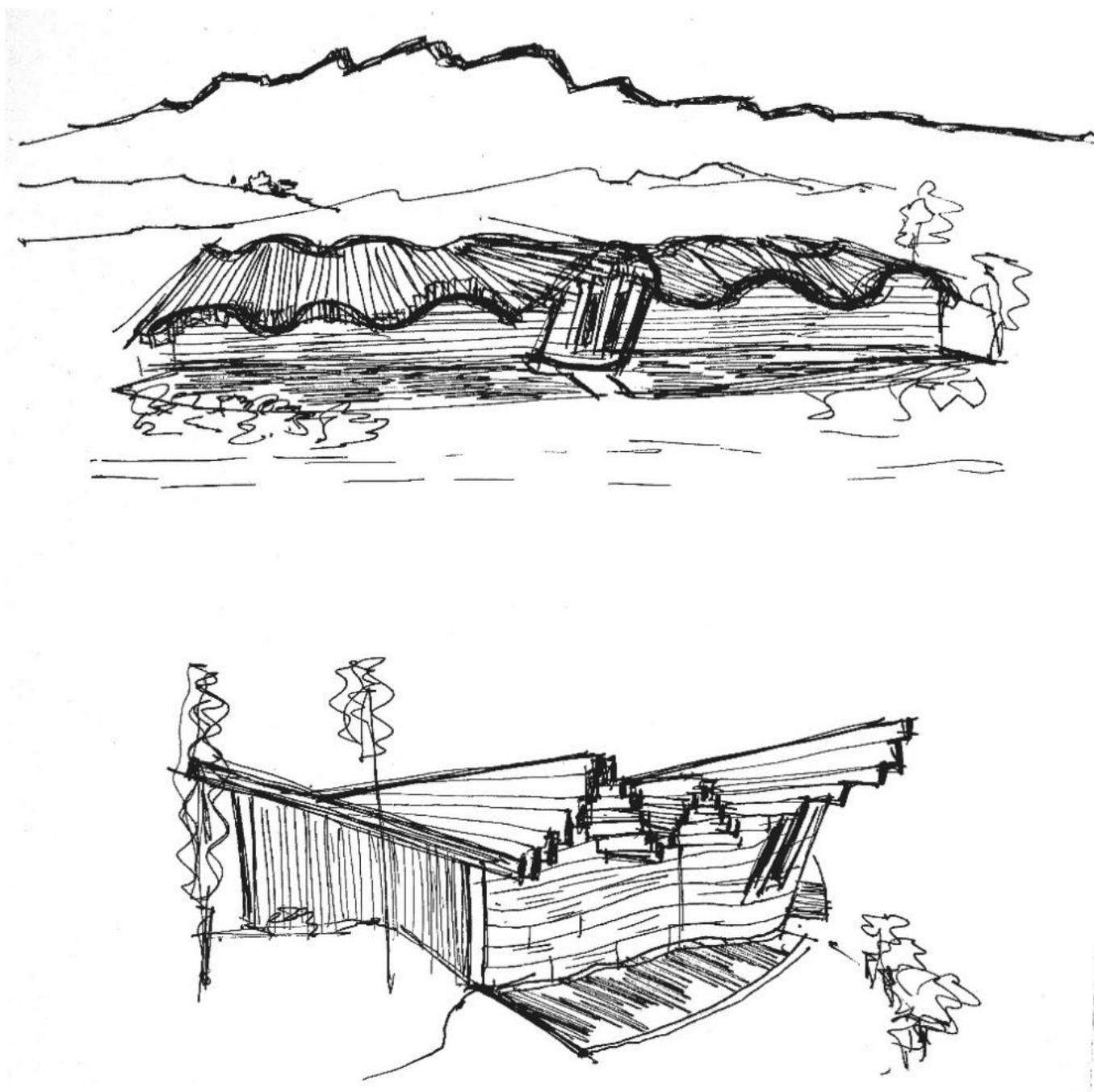


Imagen 9. *Movimiento Ondeante, la sierra como telón de fondo*

Fuente: (Propia)

Retomando en Ysios Calatrava alude que la inspiración procede de observar el acople de las barricas para almacenar el vino como lo reflejó en uno de sus bocetos con la técnica de la acuarela, pero es indudable que el sello patente Gaudiniano una vez más es factor de inspiración para Calatrava, en esta ocasión la recepción del proyecto de las escuelas de la sagrada familia la siguiente lámina (imagen 10) expresa la evolución conceptual de la propuesta y la sinergia con un proyecto primigenio.

Ysios una bodega capaz de generar emoción, un referente enológico y arquitectónico, sin embargo no todo es perfecto

Alejados ya de las líneas poéticas, en el año 2013 se agudizaron los problemas que desde su construcción la bodega Ysios adolecía, su techo presentaba problemas en los métodos de sujeción de las chapas metálicas a causa de la fuerza combativa del viento se desprendían dando lugar a filtraciones y humedades, la bodega había sido orientada en el sentido en que recibía la mayor carga de viento, algunas puertas de acceso habilitadas en las esquinas con su apertura y en momentos de viento copioso la cubierta experimentaba movimientos, que contribuían a más filtraciones, todo esto en un recinto donde la producción de vino requiere un riguroso control de climatización, la dirección de la marca encabezada por sus dueños el grupo Domecq en reiteradas ocasiones consultó a Calatrava, cansados de no obtener una solución definitiva de su parte, agotó la vía judicial con el juzgado de Victoria, solicitando la suma de dos millones de euros a Calatrava para destinarlos a la reparación de la cubierta y expresamente no deseaban que la dirección facultativa encargada de la impermeabilización estuviese a cargo de Calatrava,.

La situación finalmente se resolvió en un amistoso convenio de las partes.



*Acuarela de Calatrava
Bodegas Ysios, Álava 2001*

Fuente: (Terroaristas, 2012)



Bodegas Ysios, Álava 2001

Fuente: (Calatrava, calatrava.com, 2020)



*Escuelas de la Sagrada
Familia 1909*

Fuente: (Martinez, 2020)

Imagen 10. **Evolución conceptual**

Recepción de expresividad y resistencia estructural heredada

El esquema en planta y sección (imagen 11) describe el proyecto, destaca la disposición de las barricas en el centro de la planta que se exhiben en forma radial y la cubierta aquí presenta un gesto de mayor vuelo prolongándose como una especie de marquesina, en el hall central y las dos naves laterales se corresponden con el área de recepción y producción y posterior almacenaje del vino, en el exterior, una lámina de agua recubierta con trencadís blanco escolta los muros sinuosos que se encuentran revestidos con lamas de madera tratadas con sales de cobre. En términos generales, se percibe la bodega como un

artefacto que se resiste al carácter austero e incluso un tanto rudimentario, propio de un edificio de carácter industrial, en Bodegas Ysios, se ha defendido el carácter plástico como expresión artística para potenciar una marca.

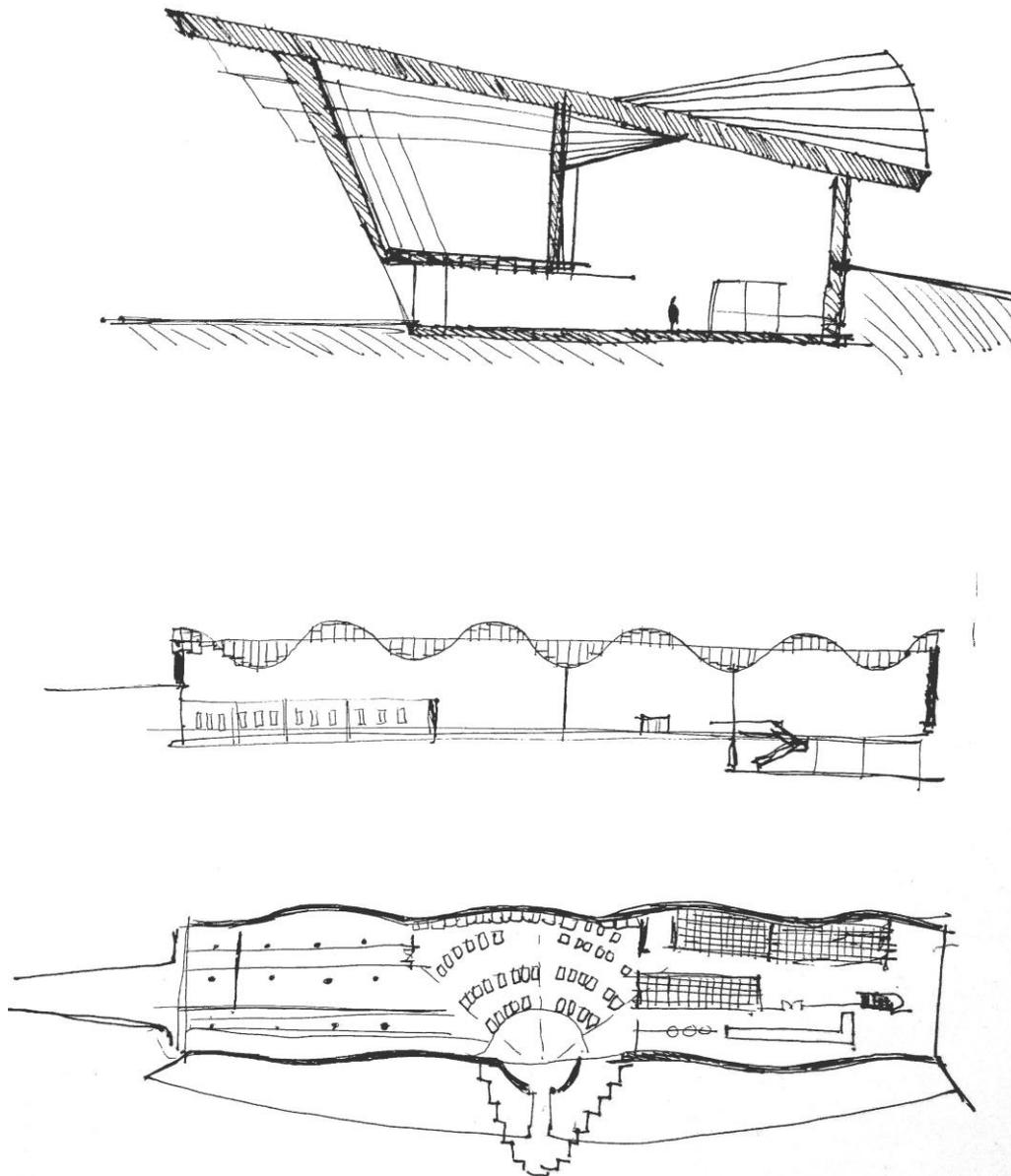


Imagen 11. Bodegas Ysios

Planta y sección

Fuente: Propia

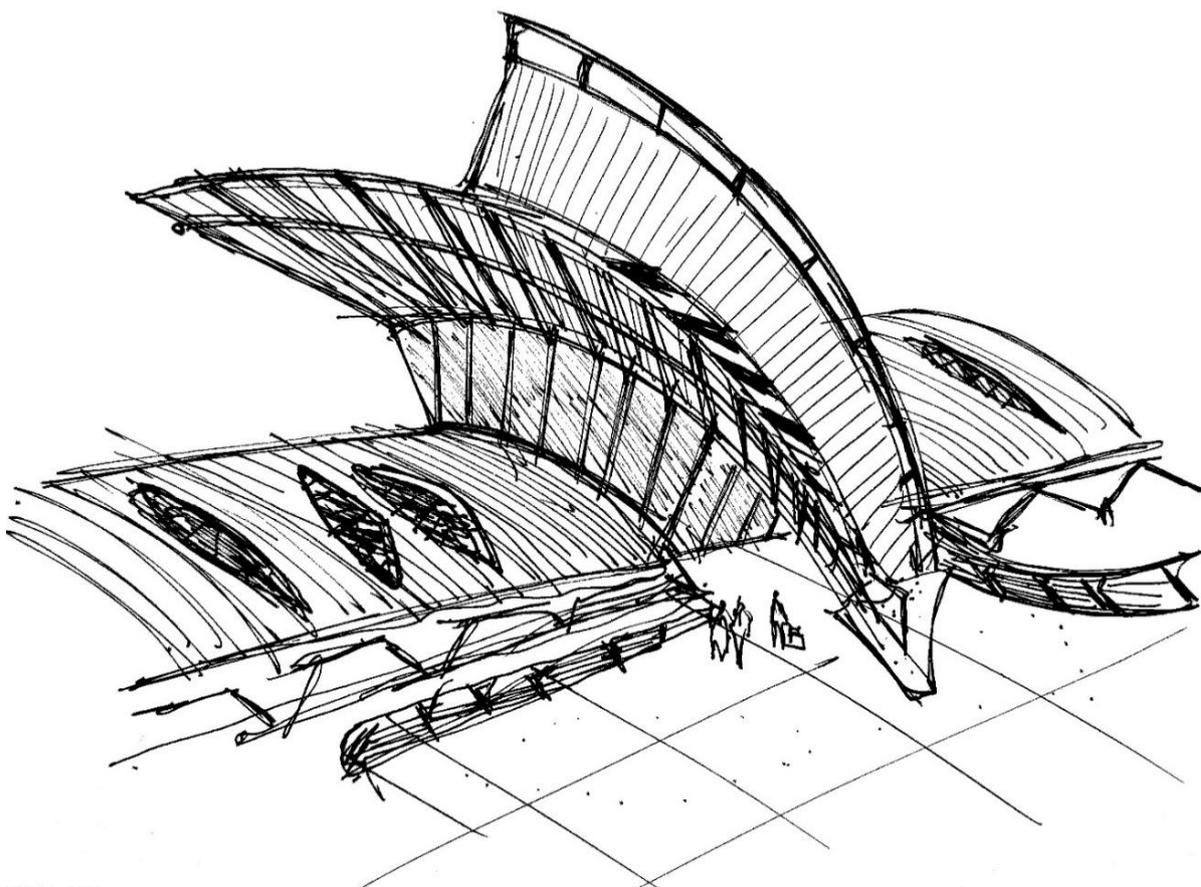


Imagen 12. Satolas TGV... un monumento en pleno campo

Fuente Propia

Estación de Lyon, Satolas TGV 1989-1994

El sitio donde se instaló la estación inicialmente llamada Satolas TGV y que en la actualidad se conoce como estación de Lyon-Saint-Exupéry, French Train à Grande (TGV en francés o tren de alta velocidad) no se preveía ninguna parada, pero aquí surgió un estación y dado que la nueva ruta del TGV rodearía la región de Lyon por el Este, aprovechando la conexión con el aeropuerto preexistente, el concejo regional tuvo una idea de integrar el avión, la ferroviaria en acenso TGV y la autopista que conduce al casco urbano, pero la región quería sobre todo un símbolo, un gesto arquitectónico que marcara el territorio, en 1989 organizó un concurso en el que expresamente pedía a una marca que diera a Lyon lo que la torre Eiffel es a París.

Con esta ambición el arquitecto ganador Santiago Calatrava, hizo en particular del vestíbulo el símbolo que le habían pedido, una forma expresiva monumental que todos reconocen como “el pájaro” (imagen 12) la forma expresiva del vestíbulo tiene su origen en una escultura creada unos años antes, no era la representación de un pájaro si no de un ojo, en un sentido abstracto y minimalista representa la esencia del ojo, vista de perfil la escultura describe una silueta curvada de latón dorada, apoyada en tan solo un vértice sobre una plataforma de granito negro, una bola de cobre en movimiento hace desplazamientos horizontales simulando el movimiento de la pupila, la silueta evoluciona con un grado de tridimensionalidad haciendo un par simétrico del objeto escultórico ahora apoyado en dos vértices y los extremos en suspenso en voladizo, el resultado recuerda más las alas desplegadas de un pájaro.

Pero ¿cómo pasar de una escultura de 70 centímetros de largo y unos cuantos kilos a una estructura de 140 metros de largo y 40 metros de altura? Fueron necesarios 12.000 toneladas de acero para construir este gigantesco armazón en el que todo se inclina, todas las barras que componen el vestíbulo tienen diferentes orientaciones en el espacio y pese a la complejidad formal el principio constructivo es más sencillo de lo que parece:

La estructura reposa sobre arcos, dos arcos de hormigón abrazan en el suelo del vestíbulo, dos grandes arcos de acero en el exterior, dos arcos interiores que reposan sobre piezas de hormigón que integran a su vez las cajas de los ascensores, la cubierta descansa sobre los dos arcos interiores que también soportan el arranque de dos grandes alas que reposan a su vez en los arcos exteriores, la evolución es sugerida en la siguiente lámina (imagen 13)

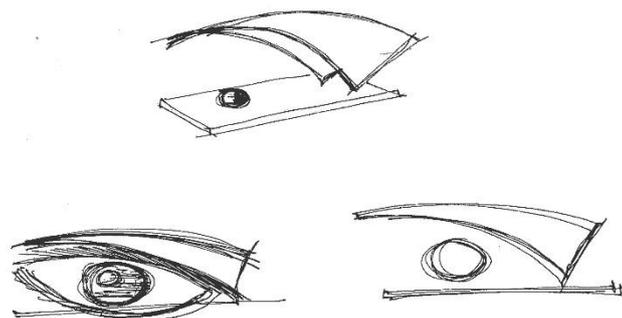
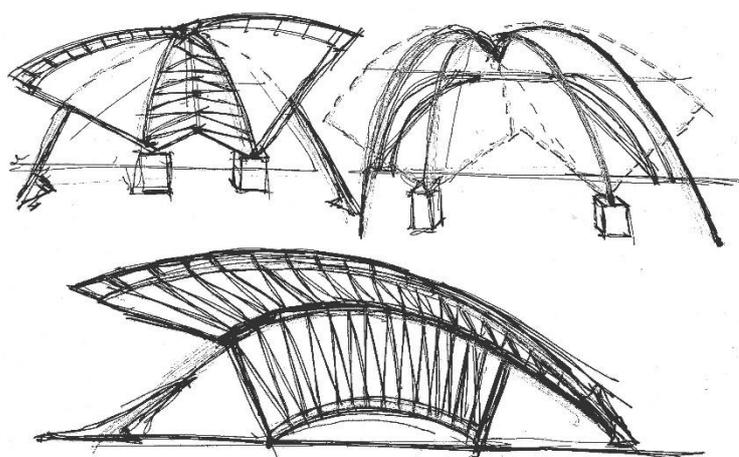


Imagen 13. Evolución escultórica

... Congregación de arcos para sustentar la forma proveniente de una analogía anatomista



Esquemas primigenios, recursos metafóricos: el ojo, el pájaro y resolución estructural enriquecida

Fuente: Propia

Los puntos en los que se asientan los arcos están recubiertos por hormigón blanco, al Oeste un único punto recoge los arcos a modo alegórico constituye “el pico del pájaro” un elemento expresivo de hormigón para constituir la estructura inclinada de las fachadas a cada hay 25 barras de acero que descansan sobre los arcos de hormigón y culmina con el cerramiento vidriado, la parte de las alas que permanece en voladizo es soportada mediante una carpintería metálica a modo de triangulación en un compás armónico de abanico, para trasladar las cargas que viajan por los arcos hasta los pedestales y finalmente al suelo. En Satolas TGV, todos los elementos de soportes son desnudos, visibles, resaltados, una arquitectura que magnifica a la estructura, en la que es inevitable recordar como la memoria cultivada del proyectista viaja a 1959 cuando el gran Pier Luigi Nervi construyó el Palacio de los Deportes en Roma, compuesto por dos pabellones emblemáticos de hormigón armado.

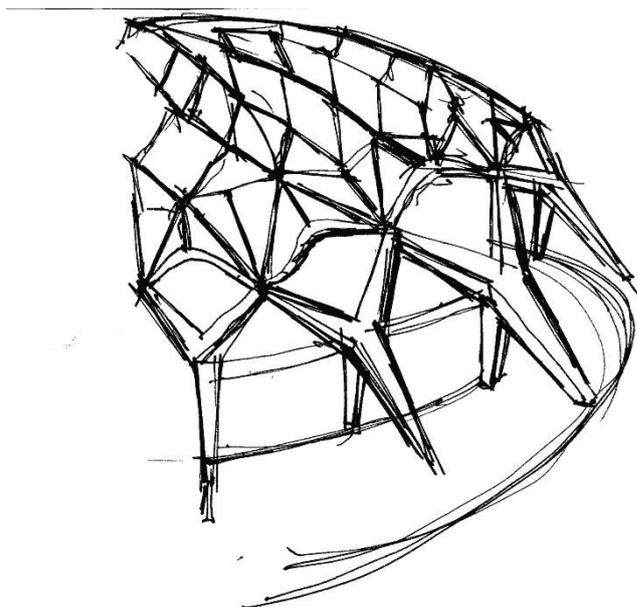
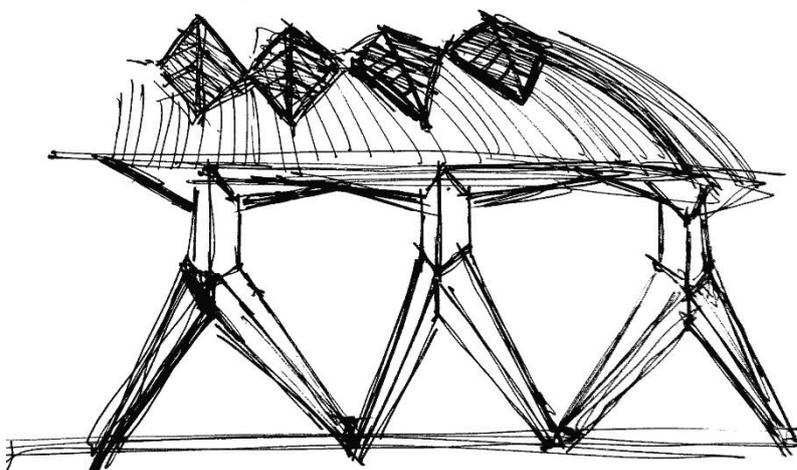


Imagen 14. “Memoria Colectiva Estructura expresiva, ecos de Nervi en Satolas”

Palacio de los Deporte, Roma, 1959

Pier Luigi Nervi



Nave lateral de la Estación de Satolas TGV, 1994

Santiago Calatrava

Fuente: Propia

1.5 Pier Luigi Nervi: Lenguaje expresivo del hormigón, sinergias vinculantes entre Satolas TGV en Lyon y el Coliseo de los deportes de Roma.

La estilizada y expresiva forma de las columnatas que soportan el graderío del Coliseo de los Deportes proyectado por el brillante ingeniero italiano Pier Luigi Nervi, (1891-1979) recuerdan el lenguaje articulado de los pórticos de las naves laterales de la Estación de Satolas, (imagen 14) con el cuidado del artesano en la prefabricación en serie de los encofrados para moldear el hormigón “el material que se deja formar” se consigue este resultado, previa y ampliamente explorado por Nervi, un gran ingeniero que aportó innovación en la técnica de la prefabricación de hormigón armado, su radical valoración del hecho estructural

es jerarquizado sobre los demás aspectos conformadores de la forma arquitectónica.



Imagen 15. "Influencias de Nervi"

Pórticos de las naves laterales de la Estación de Satolas TGV

Fuente: (Adda, Arquitecturas Satolas TGV un monumento en el campo, 1998)



Pórticos que sostienen el graderío y la cubierta del pabellón deportivo de Nervi en Roma.

Fuente: (Rai, 2020)

El trabajo de Nervi en el Palacio de los Deportes, se circunscribe en una planta circular, el desarrollo de la cubierta es una especie de casquete esférico formado por nervios meridianos de sección variable en forma de "V" en el perímetro estas nervaduras agrupadas definen una especie de anillo y transmiten su tensión a cada pilar inclinado, en total 48 de estos son orquestados para completar la circunferencia en la que se inscriben. De otro modo, los forjados y el graderío que a su vez se apoyan en la estructura, contribuyen a contrarrestar el empuje de la cubierta y centran las resultantes hacia los apoyos.

De hecho la forma de los pilares inclinados aportados por Nervi, (imagen 15) no responden a un parámetro estético que sugiera una cierta banalización del desarrollo estructural, al contrario, los pilares recogen los empujes de la cubierta y su inclinación se debe a la trayectoria de los esfuerzos, la geometría del pilar es el resultado complejo de la intersección de caras planas y alabeadas en el desarrollo del fuste, para llevar a cabo su materialización la fabricación del encofrado a partir de elementos rectilíneos que siguen la forma de una superficie reglada el efecto logrado es el conocido como Paraboloide Hiperbólico ampliamente explorado por Candela de quien posteriormente reflexionaré porque de algún modo estructura el lenguaje que colectiviza a la obra de Calatrava con estos célebres personajes que indagaron particularmente en el poder de la estructura para configurar arquitectura, y que yo integro en una especie de *“trilogía extensiva de la forma estructural colectivizada y aprehendida por Calatrava”*

Los nervios del graderío del Palacio de los deportes recuerdan a su vez los nervios de la cubierta alabeada de la estación de Satolas, se pueden evidenciar muchos otros rasgos en diferentes obras de Nervi que resuenan en algunos proyectos de Calatrava, desde luego, soy un convencido que en arquitectura ya no se inventa nada, (o casi nada) todo es una secuencia de evolución de la técnica, cada paso es un salto que nos ha permitido avanzar, heredamos los principios de la técnica con el objetivo de adaptarlas al contexto y al problema que se nos encarga para ofrecer una solución, a lo que si se da cabida a es la innovación en la técnica, pero la función primordial de la arquitectura y está inventada y es simplemente el hecho de ofrecer respuesta al habitar. Por eso no es extraño ver que cuando profundizamos en un arquitecto que su obra ha sido calificada como paradigma de la arquitectura esté a su vez impulsada, relacionada o motivada a su vez por un precursor que haya tenido las mismas preocupaciones, en el caso de Candela, las exploraciones de las cascaras y el potencial de las superficies de doble curvatura con el empleo de poco material y potenciación de la capacidad resistente, Candela había sido alumno de Torroja. Es como apreciar la trilogía que vincula en secuencia a los grandes genios de la historia en orden consecutivo Galileo, Newton y Einstein, cada uno de estos

personajes se apoyó en su predecesor para encauzar sus investigaciones motivadas por un objetivo común la comprensión del universo.

Retomando, en la memoria cultivada heredada de Calatrava sobre el trabajo de Nervi, llama la atención el desarrollo de las ménsulas para constituir grandes voladizos con apariencia de ligereza que emplea Calatrava de forma recurrente.



Imagen 16. “Voladizos”, memoria cultivada”

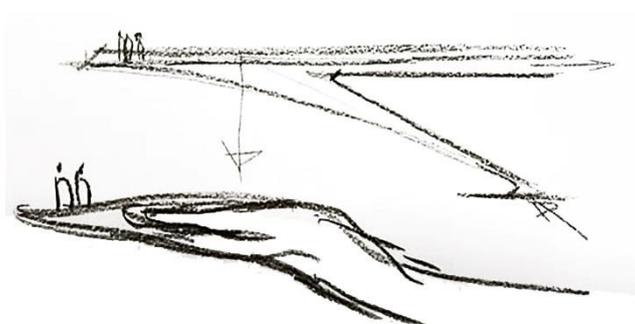
Marquesina sobre el graderío del Estadio Artemio Franchi Nervi, Florencia, 1931

Fuente: (Bifulco, 2014)



Marquesina sobre las taquillas de la Estación de Satolas Lyon, 1994

Fuente: (Adda, Arquitecturas Satolas TGV un monumento en el campo, 1998)



Bocetos de Calatrava, Génesis creativa de la composición de la Marquesina

Fuente: (Adda, Arquitecturas Satolas TGV un monumento en el campo, 1998)

Al interior de la estación de Satolas, dos plataformas en voladizo integran las taquillas, la forma en suspenso que calatrava relaciona con una palma de mano (imagen 16) es una marquesina de hormigón de sección variable que recuerda a la marquesina que cubre parte del graderío del Estadio Comunal Artemio Franchi en Florencia de Nervi, la marquesina del estadio formada por 24 ménsulas colocadas cada 4.76 metros, el esquema estático para esta resolución estructural de esta cubierta, plantea un equilibrio de fuerzas, la carga concentrada equivalente a la carga de la cubierta y de otro lado la carga concentrada equivalente a la carga de los graderíos y de las soleras intermedias.

En todo caso, la vinculación formal aparente en el trabajo de Nervi y Calatrava, tienen en común la determinación, ambos creadores consiguen concebir la ingeniería como arte, enriqueciendo en particular la técnica del hormigón armado, el material que se deja formar, el resultado son resoluciones estructurales con gran capacidad resistente, una especie de neogótico, en ultimas, una arquitectura que magnifica a la estructura.

“el arte del ingeniero es el arte de lo posible”

Santiago Calatrava

“Hoy estamos avanzando hacia formas que, una vez logradas, se mantendrán inmutadas e inmutables a lo largo del tiempo.”

Pier Luigi Nervi

1.6 Eero Saarinen: *La aproximación desde el punto de vista plástico entre Saarinen y Calatrava.*

Encauzar valores que colectivizan las destrezas alcanzadas con el hormigón armado desde un punto de vista plástico, es un factor que permite asociar a Satolas TGV y la terminal de la TWA



Imagen 17. Unidad plástica

(Arriba) Terminal de la TWA, en el Aeropuerto John F. Kennedy Eero Saarinen

Fuente: (Ariza, 2016)

(Abajo) Vestíbulo central de la estación de Satolas TGV de Calatrava

Fuente: (Calatrava, calatrava.com, 2020)

La icónica y potente terminal de la compañía aérea Trans World Airlines (TWA) concluida en 1962 e instalada en el aeropuerto John F. Kennedy, proyectada por el célebre arquitecto de origen finlandés y afincado en Estados Unidos, Eero Saarinen (1910-1961) se rige por la línea curva y dinámica que intensifica cada

superficie que la define, destaca especialmente el vestíbulo donde establece un diálogo con su homólogo más contemporáneo, Satolas TGV, (imagen 17) aspectos como los apoyos escultóricos de hormigón que recogen el empuje de los arcos y el desarrollo de la cubierta que cubre un vestíbulo diáfano y sin apoyos intermedios es palpable en estos dos edificios. Saarinen se inspiró en las bóvedas de crucería góticas para crear una gran sala sin columnas, dando lugar a la continuidad y fluidez espacial.

El edificio surgió en una época en la que las compañías aéreas querían exhibirse con terminales exclusivas como símbolos de poder, “quiero un edificio que capture el espíritu del vuelo, no un lugar estático” declaró el entonces director de la compañía TWA. En el caso de Saarinen, subrayar la idea de la revolución de la aviación con la invención del Jet con una terminal que lo representase.

En el caso de Calatrava la voluntad de generar un símbolo para la región de Lyon, en todo caso, ambos proyectos tienen en común la pauta de un formalismo deliberado, tienen en común la determinación de apostar por la singularidad, tienen en común exaltar y destacar las cubiertas, tienen en común la clásica disposición espacial de cuerpo central con dos naves laterales, la voluntad escultórica, cabe mencionar que Saarinen también fue formado como escultor en La Académie de la Grande Chaumiére (la Escuela de Arte de París) factor que probablemente justifique el despliegue plástico que proyecta la terminal a un ambiente futurista. Esa intensidad formalista desinhibida en Satolas TGV es llevada con desmesura a la espectacularidad, podría haber sido una pequeña estación rural, los trenes que aquí se paran pueden contarse con los dedos de una mano y los que no se paran son diez veces más numerosos.

Monumentalizar las infraestructuras

En ambos casos está el deseo y la determinación por monumentalizar las infraestructuras es evidente, dos escenarios a gran escala para acoger a los viajeros, el liderazgo conceptual y la conformación de un nuevo hito se cristalizan en cada caso. Se manipula la escala en un contexto abierto de campos despejados que establecen las infraestructuras como referencia y como

monumentos. Así pues, trabajar con el contexto en estos casos, va más allá de la retórica del respeto por el contexto preexistente, cuando el paisaje está marcado por el vacío, se exhibe una pieza que empieza a redefinir el contexto y marcar nuevas pautas en el orden del paisaje.

Todo ello en contraposición a Stadelhofen (proyecto anteriormente analizado) que en contraste con Satolas TGV, Stadelhofen monumentaliza la infraestructura férrea con otro modus operandi en la medida que capitaliza y reconoce en el contexto la necesidad de reconvertir una dificultad en virtud, en la medida en que se resuelve, se adapta el contenido programático en unas condiciones de reducida área disponible, ganando terreno a la colina para construir en el vientre de la misma y por ende desarrollando un carácter de mayor cohesión, dado que el tejido urbano configurado es denso y las circunstancias son opuestas al caso de la TWA y Satolas TGV.

Otras aproximaciones al trabajo de Saarinen en la memoria colectiva cultivada de Calatrava, puede reflejarse en el desarrollo de los pórticos inclinados y expresivos de hormigón para conformar los pasillos de la estación de Lucerna en (1989) con el desarrollo de los pórticos logrados en el Aeropuerto Internacional de Washington-Dallas (1962) por el finlandés, igualmente expresivos e inclinados que abrazan la cubierta en forma de catenaria con un aire ciertamente brutalista. En la terminal Sondica o aeropuerto de Bilbao (2000) proyectada por el arquitecto valenciano, también guarda cierta lectura que evoca a Saarinen por la expresividad de sus pórticos y el desarrollo de su cubierta.

Un Saarinen visionario

En cierta medida Eero Saarinen se establece como referente de las nuevas soluciones formales, aportadas a la técnica fundamentalmente por la plasticidad que el hormigón armado puede alcanzar y otorgando a las obras un carácter dinámico en la conformación espacial y ciertamente escultórica, con un sentido de unidad formal, las superficies alabeadas producen un efecto de dimensión futurista, adelantado a su época. La conformación de los elementos estructurales son manipulados al extremo haciéndolos indisolubles de la forma final obtenida, unificando forma y estructura como un todo.

1.7 Félix Candela: *Un Calatrava receptivo y admirador de su maestro.*

Félix Candela y el deseo eclipsado de Calatrava por intentar conquistar la eficacia estructural proporcionada por las superficies de doble curvatura.

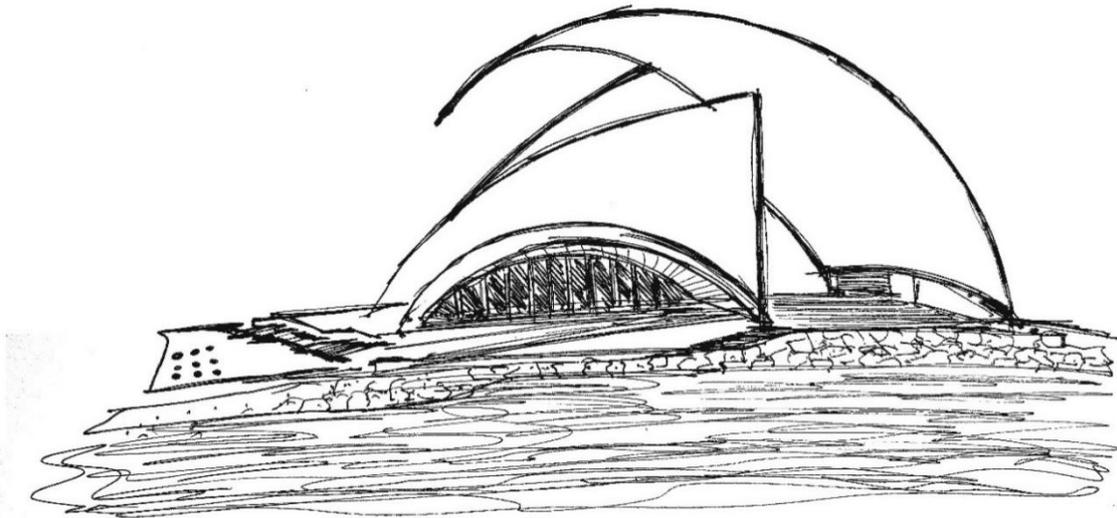


Imagen 18. "Un símbolo para Tenerife"

Vista general del Auditorio de Tenerife proyectado por Calatrava

Fuente: Propia

Auditorio de Tenerife 1991-2003

El intento de Calatrava por abordar la eficacia que proporciona la esbeltez en un encargo para Santa Cruz de Tenerife se ve eclipsado porque prevalecen el capricho y la carga simbólica con desmesura a la espectacularidad, enajenada de todo acto canónico que propende por aportar soluciones al problema con el mínimo empleo de materiales, recursos y energía involucrada disponible. En el perfil costero de Santa Cruz de Tenerife, sobresale el escultórico auditorio encargado y proyectado por Calatrava, (imagen 18) la ambición icónica aquí lograda, recuerda la carga simbólica de la Opera de Sídney, proyectada por el arquitecto danés Jorn Utzon (1973) cuya operación en Australia también estuvo enmarcada por la polémica, al no aportar una solución estructural-constructiva consecuente con la esbeltez y ligereza que proyectaban las cascaras que durante siete años se trató de resolver estas formas que tuvieron que ser

repensadas y que no se pudieron construir como cáscaras o láminas curvas porque no tenían una forma geoméricamente definible de modo simple “para meterlas en números” la enorme escala del arco ojival que definía las velas de la Ópera de Sídney apreciado en sección transversal al no coincidir con la curva de presiones produciría momentos inadmisibles de haberse materializado como láminas, entre idas y venidas el capricho de Utzon a renunciar a la forma en contraposición al intento por resolver la estructura de su colaborador estructural Ove Arup, finalmente llevó a concebir la construcción de “las velas” no como cascarones sino como una serie de nervaduras de hormigón armado empotradas en su base. Una subestimación de la escala y la escasa fidelidad estructural de la Ópera de elevada carga icónica tiene a su homólogo recinto operístico en Tenerife.

“Una pulga salta muchas veces su altura, mientras que un elefante no puede despegarse del suelo. “La enorme diferencia entre la esbeltez y la ligereza de la concepción original de las bóvedas y la pesadez y complicación de la estructura definitiva. (Candela, El escándalo de la Ópera de Sidney , 1967)

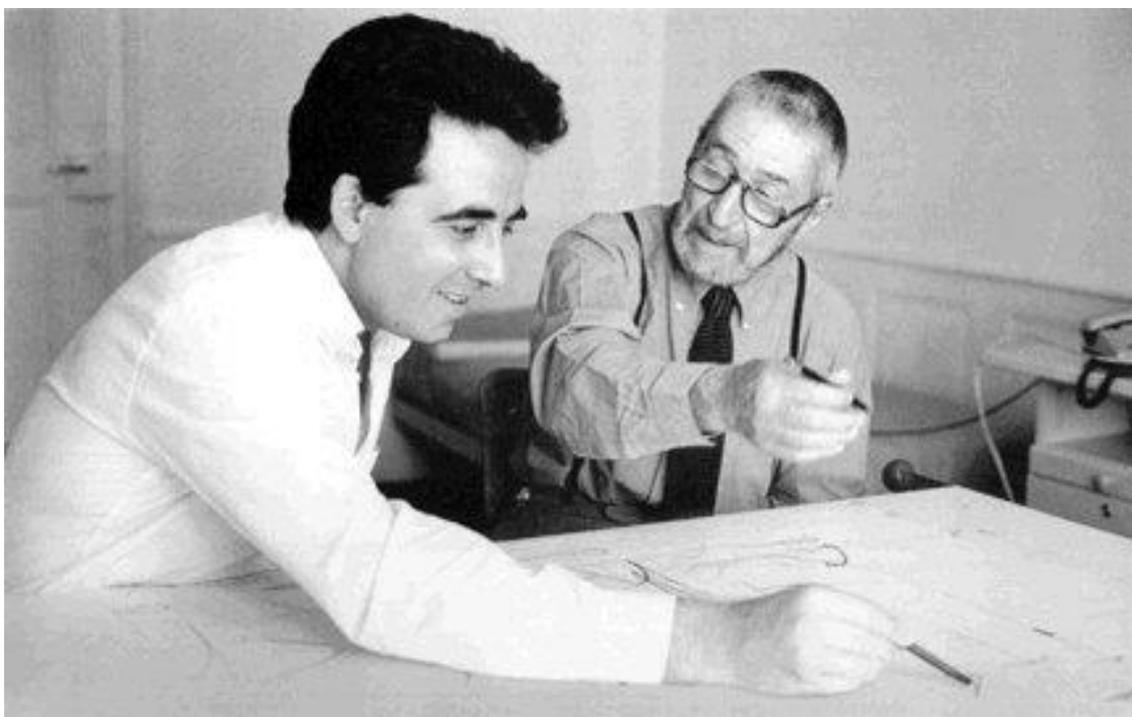


Imagen 19. “El alumno no supera al Maestro”

Un joven Santiago Calatrava con un otoñal Félix Candela, imagen de archivo.

Fuente: (Giovannardi, 1986)

Ecós de Candela resuenan en el auditorio de Tenerife, aunque más por impacto visual que por solución estructural que optimice la forma, en este sentido, Calatrava no supera a Félix Candela en sus soluciones estructurales, la reducción de empleo de material al mínimo necesario para resolver el problema de la forma estructural potenciando y multiplicando su capacidad resistente, es bastante abordado por el excepcional arquitecto español exiliado en México: Félix Candela (1910-1997) en el formalismo de Candela, la estructura es el orden interno de la obra, consigue aportar una nueva revolución para las estructuras en el campo de las bóvedas, configurando una superficie reglada, una línea recta que sigue la orientación de un eje curvo, el resultado de la intersección de estas rectas es una superficie de doble curvatura, el conocido paraboloides hiperbólico, (Gaudí fue un precursor de esta forma geométrica abordado previamente en las escuelas de La Sagrada Familia) en el caso de Candela, quien fue variando el espesor del hormigón y la cantidad de acero requerido, consiguió asombrosa ligereza y resistencia estructural y desde luego sacando partido estético de esta solución. En una imagen de archivo para la posteridad aparecen en un diálogo entre un otoño Candela con discípulo, un joven Calatrava que intentó una vez abrir despacho en Madrid con su maestro el célebre Félix Candela (imagen19).

Una demostración del compromiso constructivo de Candela con la arquitectura, los encofrados a partir de láminas de madera de forma rectilínea que resultaron muy económicos y le permitieron reproducir obras como el restaurante Los Manantiales en Xochimilco (1958) (que por cierto guarda mucha similitud con la solución aportada en una de las cubiertas del Oceanográfico de Valencia, obra de su autoría) o la Capilla de Lomas de Cuernavaca (1959) una de sus obras más importantes, donde consigue a través de dos parábolas en disposición asimétrica un espesor de 1,6 centímetros (imagen 20) la parábola mayor consigue alcanzar los 22 metros de altura, la menor mantiene una altura máxima de 8 metros.

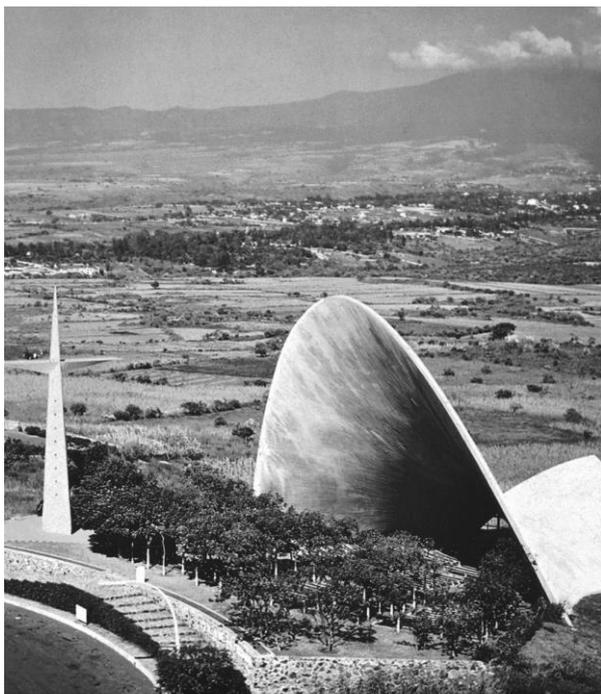


Imagen 20. *“La estructura, un ente global”*

*Capilla de Lomas de Cuernavaca” Candela
,1959*

Fuente: A-cero Blog

Retomando en el auditorio de Tenerife, en contraste con el espíritu de ligereza aportado por Candela en sus obras, la ejecución de la sobrecubierta de Calatrava en su auditorio para Tenerife, esta especie de pico que corona el auditorio, representó desafíos constructivos debido a su forma, a su escala y a su peso.

“La ejecución de la sobrecubierta que se prolongó durante un año a partir de marzo de 2001, se dividió en dos fases: montaje de la estructura metálica y hormigonado de la misma. Las distintas piezas de la estructura fabricadas en Sevilla, llegaron a Tenerife por vía marítima en cerca de un centenar de envíos, fueron montados a pie de obra, posteriormente elevadas hacia su emplazamiento final y soldadas tramo a tramo hasta dibujar la curva completa. El peso de esos tramos del ala superaba con creces, en ocasiones, las cien toneladas. El último en ser colocado, fue obviamente, el del pico, con 120 toneladas de peso. A diferencia de los anteriores, que se izaron con la estructura vista, éste se colocó ya con su hormigonado y revestimiento completos, dado el riesgo que hubiera supuesto ejecutar estos trabajos a posteriori sobre una superficie curva descendente a 40 metros del suelo, y propició momentos de nerviosismo cuando al final del ensamble se comprobó que había caído un metro más de lo esperado. Calatrava aseguró que una vez se concluyera el hormigonado de toda la sobrecubierta se armonizarían las tensiones y el pico recuperaría su inclinación prevista, y así fue.”

(Moix, 2016) pág. 127

Así pues, un alarde constructivo manifiesto para constituir una sobrecubierta que ostenta los 58 metros de altura, donde goza la redundancia, la materialización

de una forma compleja de ejecutar que requirió de un carro mecánico diseñado en Alemania exclusivamente para emplearlo en esta obra y conseguir hormigonar algunos de sus tramos más complejos, el resultado es de una función de carácter plástico y estético porque la sobrecubierta es una excusa formal más que una necesidad constituida en la globalidad de la configuración estructural es por esto que la obra se aleja de los parámetros que rigen la visión de Candela que propende por explotar al máximo la potencialidad expresiva de la estructura, teniendo en cuenta las bondades del material y la forma en que se construye para resolver el problema y no creando un problema a priori para pretender resolver “el problema del problema”.

“Es una falsa argumentación que se resuelve con una falsa realización, en filosofía eso se llama el problema del problema, dice Calzón. Si nosotros no tenemos ningún problema y creamos uno, no vamos a resolver un problema sino un Pseudoproblema. Los problemas son maravillosos porque nos permiten buscar, y a veces, alcanzar el camino de la verdad, pero si el Pseudoproblema se crea para, acto seguido, simular que se resuelve con un mero gesto...entonces eso no ha sido nada”

(Moix, 2016) pág. 97

Alarde Constructivo en Atenas 2001-2004.

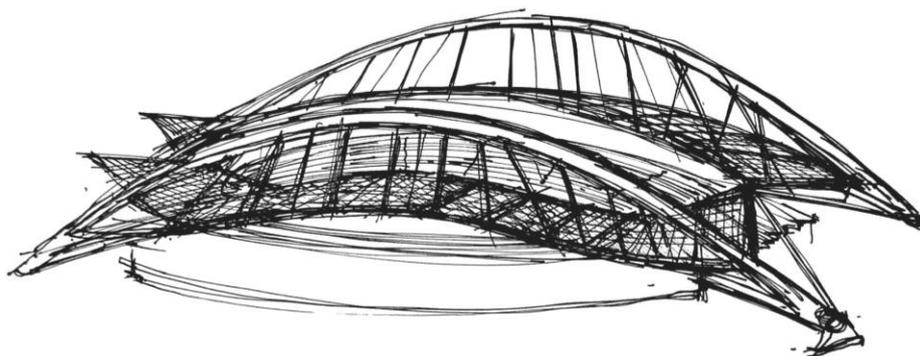
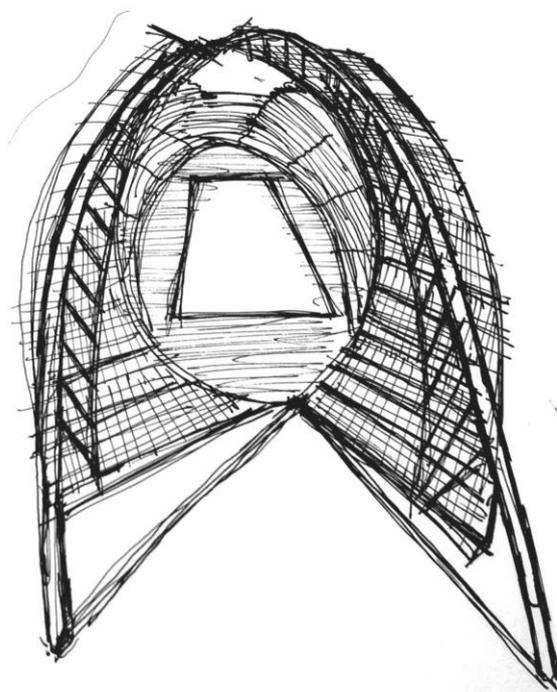


Imagen 21. “Cuando subestimas la escala en función de la esbeltez”



Cubierta para el Estadio Olímpico Atenas 2004

Santiago Calatrava

Perspectivas

Fuente: Propia

El encargo oficial de Grecia: ordenar y dar una estética de unidad al conjunto de los escenarios deportivos preexistentes, destinados a la celebración de los Juegos Olímpicos de Atenas 2004, dichos equipamientos deportivos requerían una cubierta para el estadio olímpico, un velódromo y una gran marquesina para enlazar e integrar el conjunto paisajístico, además también Calatrava integró un caldero olímpico singular así como un muro escultórico llamado muro de las naciones que recuerda la expresión captada en Bodegas Ysios. Todo ello en un área de 100 hectáreas.

Me concentraré en la cubierta del estadio olímpico (imagen 21) que fue la que causó mayores retos, a grandes rasgos, toda la cubierta se apoya únicamente en cuatro puntos bajo la intersección de los arcos superiores y los tubos de torsión inferiores.

La superficie cubierta lograda es de 24.000 m² el acero empleado en la estructura para conformar la cubierta del estadio olímpico, asciende a las 17.950 toneladas (de las cuales 185 toneladas las aportan los cables tensores).

Configuración estructural

Dos grandes arcos paralelos de 304 metros de vano y separados 141.4 metros. Cada uno queda constituido por un arco superior comprimido (tubo de 3,25 metros de diámetro y espesor variable de 68 mm a 90 mm) y un elemento de atado inferior que contribuye solidariamente a soportar la cubierta (otro arco que en este caso actúa como tubo de torsión de 3.60 metros de diámetro y espesor variable entre 58 mm a 95 mm). Arco de superior y tubo de torsión quedan empotrados en los cuatro extremos a modo de grandes pedestales, la real conexión solidaria éntrelos arcos y la cubierta viene dada por la serie de cables orquestados trabajando a tensión máxima para soportar la cubierta traslucida que no sigue una línea recta, se trata de una senoide tan afín al vocabulario Calatrava, donde el contenido plástico cobra un valor preponderante. El resultado es una estructura llamativa que sugiere una infinidad de cargas y tensiones expuestas.

Alarde constructivo manifiesto

El desarrollo colosal de los arcos, de haber sido dispuestos de manera transversal al graderío, es decir, de haber sido orientados en la longitud más corta, serían por ende de menor longitud y más eficientes desde el punto de vista del consumo de acero, expresado en los diámetros de los arcos, que por ende al ser más cortos serían menos pesados, más económicos e igualmente efectivos, *pero no tan convenientes a la hora de obtener efectos plásticos y simbólicos, en este sentido los límites entre la estética y la eficacia estructural, los marca la propia estética*, en el sentido de que hace una práctica reduccionista de la redacción canónica que propende por lograr la eficacia a través del menor

empleo posible de energía y tiempo invertido, así como el manejo racional de los materiales y recursos disponibles, para lograr algo con virtuosismo, pero también con un sentido de la proporción.

Técnicamente el desarrollo de la cubierta que cubre el graderío de hormigón armado del estadio olímpico que se circunscribe en una planta elíptica, no es una única cubierta se trata en general de un par simétrico con las misas dificultades, la esbeltez primigenia ideada por Calatrava contemplaba unos arcos más esbeltos, más bellos, de apariencia ligera, una cubierta flamante, flotante sobre el graderío, la idea era captar la audiencia televisiva global, el desarrollo longitudinal de los arcos supera la longitud del graderío, y de la cubierta en sí misma alcanzando una cota máxima cercana a los 80 metros de altura de los aros superiores, los arcos inferiores están articulados con 54 costillas en los cuatro extremos cuatro grandes pedestales amortiguan el empuje de los arcos que conjuntamente se descargan en estas bases que son testimonio de los esfuerzos y empujes transmitidos por los arcos con una articulación multitudinaria de tornillos de un tamaño abrumador.

Difícil estimación de las Cargas Estáticas y Dinámicas.

La expresión de la cubierta no sigue una línea geométrica plana, pasar de la maqueta y los esbozos en acuarela a la resolución del proyecto de ejecución con tremenda dimensión de la cubierta, supuso una subestimación de los cambios de escala, el tamaño de las cosas versus la esbeltez de los arcos que al no ofrecer suficientes garantías de seguridad estructural, supusieron en su momento una amenaza a los tiempos de entrega de la estructura para la inauguración de los Juegos Olímpicos y a pensar en plantear una solución distinta para cubrir el graderío.

Calatrava desde luego, no iba a renunciar a la forma, el terreno donde se sitúa el graderío está en zona sísmica, lo que requirió mayores márgenes de seguridad, dos ingenierías procedentes una de Grecia y la otra de España, visitaron en un periodo de cuatro meses el estudio del arquitecto valenciano en Zúrich para poder validar la solución estructural concebida por Calatrava, aludiendo que recibían mucha información estética del proyecto, pero poca estructural, como consta en la redacción Crónicas Anagrama “Queríamos un

Calatrava” de Llátzer Moix , importante crítico de arquitectura y responsable de la información cultural del diario barcelonés La Vanguardia.

El problema clave:

La gran abertura del arco superior que producía empujes horizontales considerables sobre los cuatro pedestales que los reciben y muy a pesar de contar con el arco interior de torsión que ataba cada arco, aun así no ofrecía los rangos admisibles del lado de la seguridad estructural para un escenario con un aforo masivo de primera línea, las olimpiadas.

La solución:

La solución precisó otorgar mayor rigidez a los arcos, esto es, cambiar su diámetro. En el diseño original, los arcos superiores eran de 2.50 metros de diámetro y pasaron a ser de 3.20 metros de diámetro, los arcos inferiores concebidos inicialmente de 3 metros de diámetro, pasaron a ser de 3.60 metros, el consumo de acero aumentó un treinta por ciento (30%) la elección del policarbonato para vestir el techo traslúcido no es gratuita, obedece a restar peso de cargas a la estructura, dado que los arcos ya adolecen y en la redacción del proyecto Calatrava había planteado láminas de vidrio , lógicamente más pesados que el policarbonato. La idea era no seguir sobrecargando la estructura para ajustarla a las exigencias del código normativo de seguridad estructural.

La Prefabricación, vital para cumplir los tiempos de entrega.

El acero de la estructura la cubierta se produjo dos factorías, una belga y otra austriaca, pero las piezas se doblaron en Italia, luego el doblado y moldeado de las chapas fueron trasladadas a Atenas en barco, el cableado se tensó también en Italia, las láminas de policarbonato se fabricaron en Israel, recibiendo su tratamiento final en Alemania. En ese sentido la búsqueda icónica en el ámbito estético-formal de Calatrava obligaron a complejas y costosas maniobras de prefabricación involucrando a cinco países y disparando el presupuesto.

Una operación a contrarreloj.

El desafío fue conseguir el acero necesario a tiempo, fabricaros arcos con tolerancias estrictas y controles de soldadura exhaustivos no solo por factores estructurales (que dicho sea de paso son los que deberían primar) y también estéticos, a Calatrava no le gusta que el cordón de soldadura sea demasiado visible. La curvatura compleja adoptada por los arcos y la orquestación de cables para proporcionar respaldo y estabilidad es sorprendente desde el graderío libre de apoyos que obstruyesen la visibilidad a los atletas disputando el oro olímpico. (Imágenes 22 y 23).

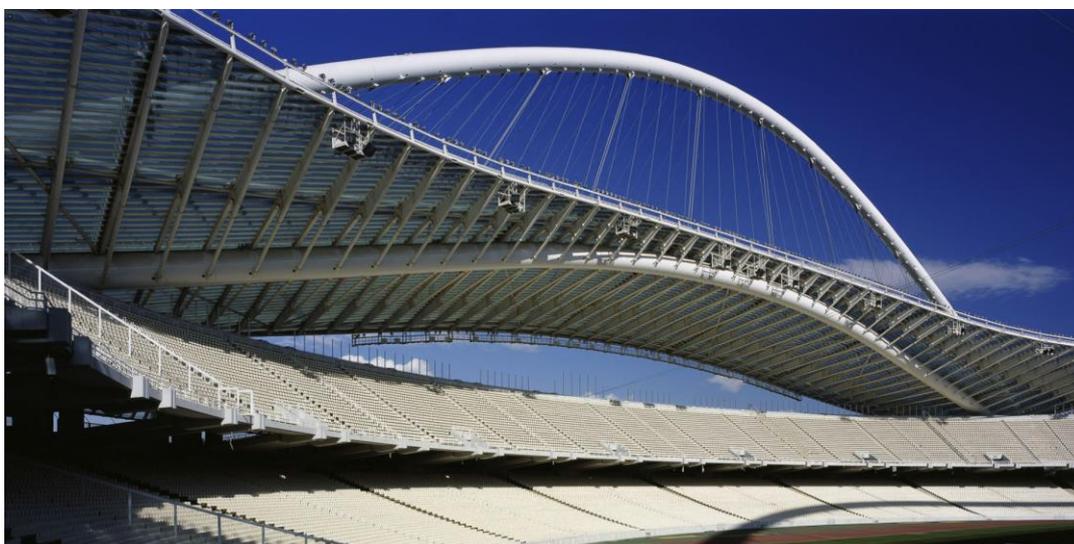


Imagen 22. “Gran manto ondeante”

Cubierta para el Estadio Olímpico Atenas 2004 vista desde el graderío

Fuente: (Calatrava, calatrava.com, 2020)

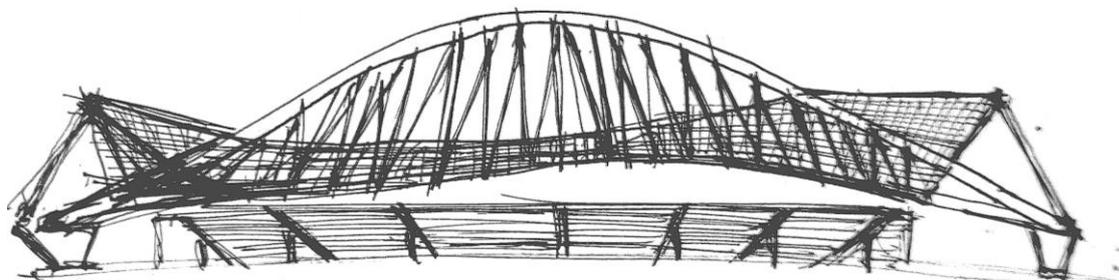


Imagen 23. “Alzado”

Cubierta y graderío del Estadio Olímpico, orquestación de arcos en tensión máxima.

Fuente: Propia

Finalmente logró montarse la estructura de cubierta a tiempo y se pudo conservar el icónico gesto de la flamante cubierta más bien a modo de dos colosales marquesinas (imagen 24), aunque pensar en un tubo de más de tres metros de diámetro dispuesto arriba y otro de similar por debajo para soportar un mismo plano de cubierta en voladizo, demuestra que hay una “sobrexposición formal” que pretende llevar las fuerzas al límite del desequilibrio, es habitual en Calatrava la redundancia, para crear efectos estéticos de gran inercia visual, para ello requiere valerse de elementos que de manera opuesta hagan de contrapeso, algo así como que un elemento se resiste a volcar y para ello necesita otro para que no se produzca el movimiento, pareciera que está hecho a propósito, alejado de toda tradición canónica racionalista, Calatrava opta siempre por la sobreexposición y el drama estructural, simplemente no forzar la estructura es no crear solicitaciones mayores de las que se tiene que acometer, un pensamiento racionalista encauzaría los arcos en el sentido más corto del pabellón a cubrir como lo comenté anteriormente y un primer beneficio es ahorrarte un 30 % del acero total que estas invirtiendo en la estructura, pero las búsquedas formales son prioritarias para Calatrava un “extravagante confeso”, formalista aunque haya que pagar el consiguiente coste que implica crear un alarde constructivo.

Desde otra perspectiva el encargo es especial, no se trata de acoger un evento cualquiera, se trata de acoger “el evento” que quedará en la historia de la cuna de los Juegos Olímpicos que viene a reivindicarse con su puesta en escena ahora en un contexto contemporáneo donde los espectadores observarán la eterna convivencia entre pasado y presente, reconociendo y valorando la huella del pasado pero permitiendo que el presente se exprese.

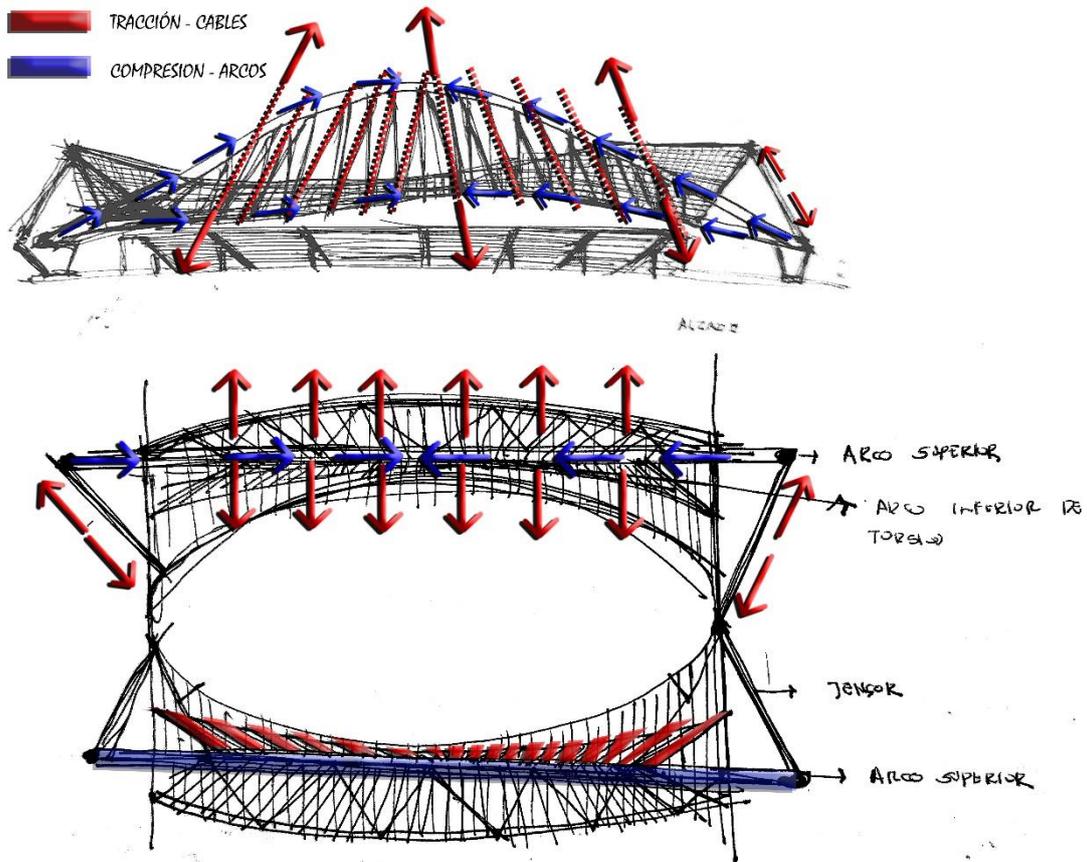


Imagen 24. "Gráfico de fuerzas: planta y alzado"

Compresiones manifiestas en los arcos (azul) Tracciones presentes en los cables y tensores laterales (rojo)

Fuente: Propia

Espíritu de Movimiento explícito en Milwaukee (1994-2001)

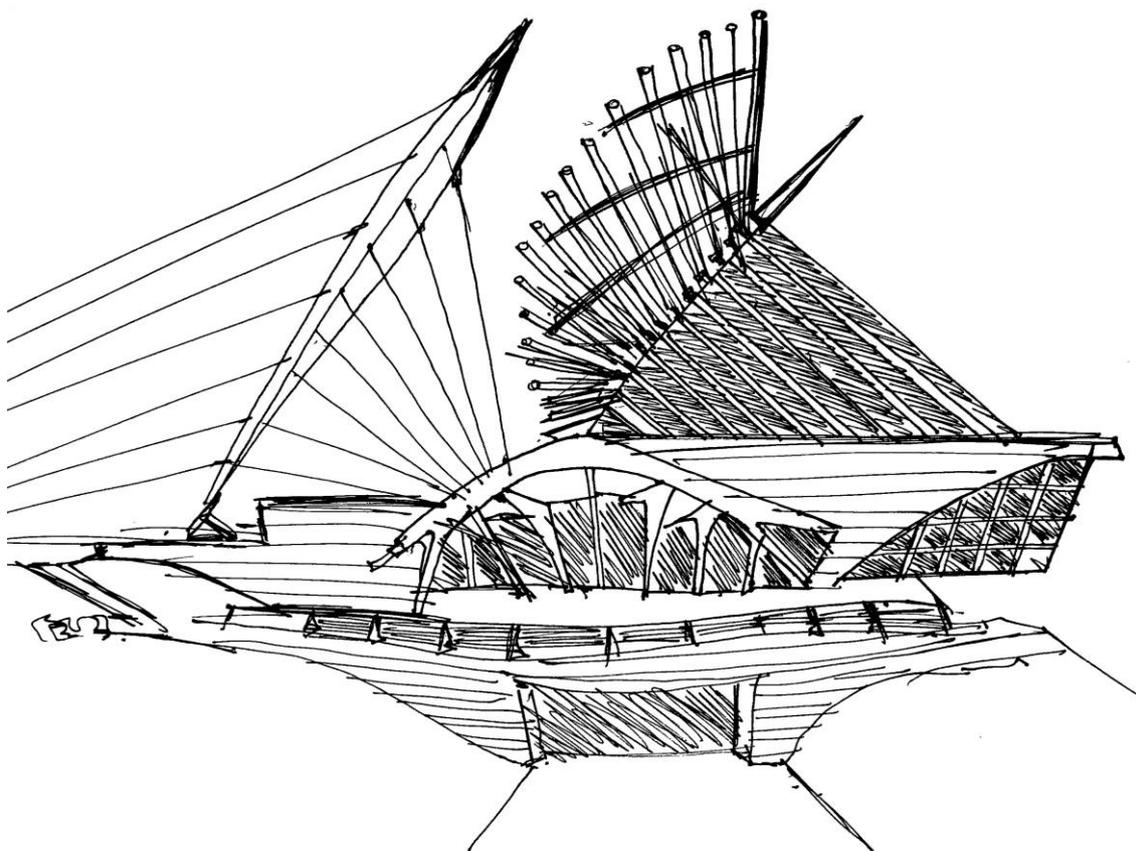


Imagen 25. Edificios que se mueven

Museo de Arte de Milwaukee (MAM) Milwaukee – Estados Unidos 2004

Fuente: propia

sobre la orilla de un lago en el área urbana de Milwaukee, se erige el Museo de Arte de Milwaukee (MAM) un proyecto ganado por el valenciano a través de concurso, un factor común a la hora de ser seleccionado como ganador, viene dado por su imperiosa necesidad de ofrecer algo más allá de lo estrictamente solicitado, en una orquestación de acuarelas alusivas al proyecto y a su origen en esculturas primigenias que evocan eventualmente aves, elementos del paisaje como velas de barco, todo esto expuesto en directo como exposición a modo performance, el encargo era crear una extensión del ya existente MAM, consistía básicamente en instalar un nuevo pabellón para este museo que goza de reconocimiento internacional con más de 120 años de historia, entre sus

colecciones, destaca el expresionismo abstracto y el minimalismo, la apuesta por la reforma de ampliación por parte de la institución, fue dotar al museo de una renovada imagen y conformar el nuevo acceso a través de la singularidad y la particularidad del pabellón. El pabellón básicamente integra un vestíbulo de planta ovalada con 100 metros de longitud, (imagen 25) la topografía movida en la que se instala este “escultórico artefacto” se vale de un puente atirantado con un pilono una especie de tornapunta que establece la conexión entre el hall de acceso al pabellón y la trama urbana.

El rasgo más visible del edificio viene condicionado por el “Brise Soleil”, estas lamas blancas que hacen las veces de parasol y que cubren el vestíbulo articuladas para operar con movimiento coordinado, dando lugar a una metamorfosis formal que desencadena una serie de asociaciones del efecto de movimiento desde el inicio de la apertura de las lamas hasta que se erigen en pleno (imagen 26) el resultado apreciado en capturas de imagen da lugar a aproximaciones a la lectura de un pájaro con las alas abiertas o una mantarraya. Las aristas estilizadas del edificio del MAM recuerdan más a la proa de un barco.



Imagen 26. “*Metamorfosis formal*” *Un ave, una mantarraya, la proa de un barco...*

Fuente: (Jodidio, 2007)

Hago un pequeño paréntesis para relacionar el espíritu de movimiento que encauza Calatrava en Milwaukee, con las aportaciones de su tesis doctoral en Zúrich “Acerca de La Plegabilidad de las Estructuras” que desencadenan la componente cinemática en una serie de proyectos con éxito, el “germen” de la movilidad se desarrolla en otras obras anteriores al MAM, como en las puertas de hangar del Almacén de Ernstings (1985 Coesfeld- Alemania) o en las marquesinas plegables de acceso a la estación de Alameda (1995 Valencia) (imagen 27) En ambos casos, la estructura es diseñada y concebida para lograr la apertura de las puertas de acceso, incluye la secuencia de barras articuladas, combinando rotaciones y traslaciones, lo que se conoce como movimientos rígidos.

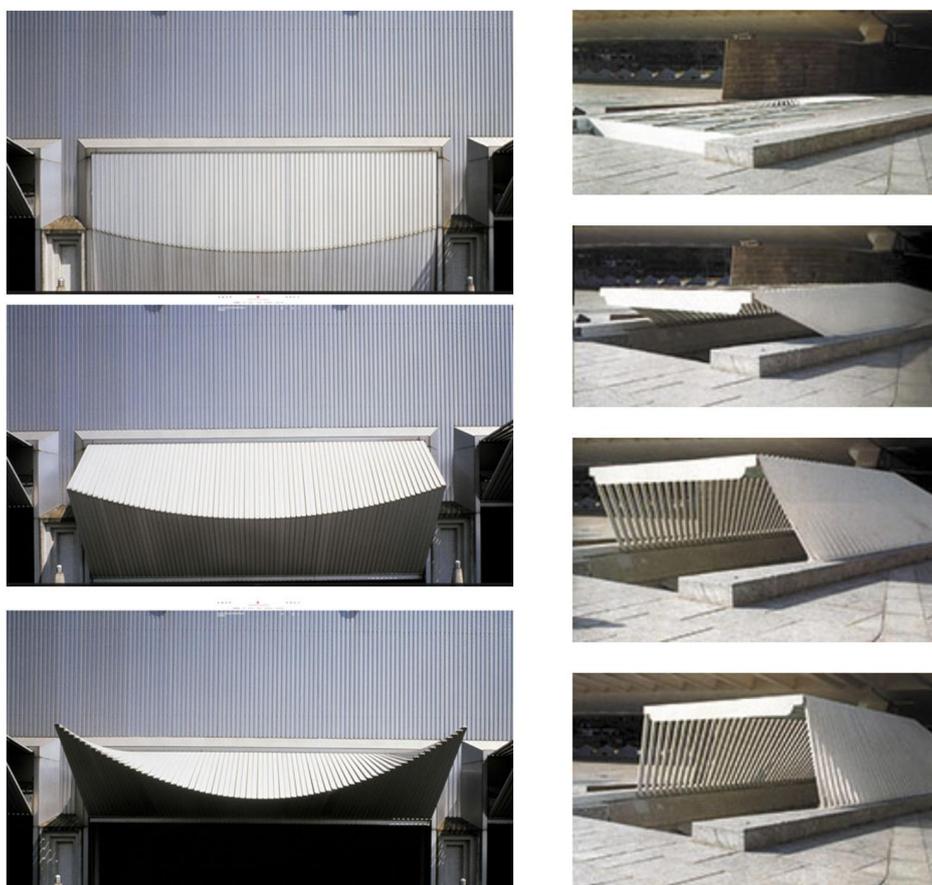


Imagen 27. “Barras, nudos y articulaciones”

La clave para lograr la componente cinemática

Almacenes Ernstings – Alemania (izquierda) Fuente: (Calatrava, calatrava.com, 2020)

Acceso Estación del Metro Alameda-Valencia (derecha) Fuente: (Medrano, 2004)

La constante búsqueda del movimiento... Sobre la Plegabilidad de las Estructuras.

La idea de la tesis está basada en el hecho de estudiar de qué modo y a través de la ruptura de determinados vínculos estructuras espaciales pueden pasar a ser estructuras lineales (imagen 28). Al final de la tesis, la esencia del trabajo estaba en ver la familiaridad cristalina de determinadas formas obtenidas en el estudio a partir del pliegue y que mediante la articulación, permite la transformación del objeto con formas naturales y de descubrir en cierto modo que en el fondo el orden que existía en la tesis era solamente el reflejo del orden que existe en la naturaleza, que existe en cada una de las plantas, que existe en las flores de diente de león, que existe en el proceso de apertura de las ramas de los árboles, que existe en las hojas de las palmeras, que existe en las flores, en los cactus que se abren y se cierran todos los días.

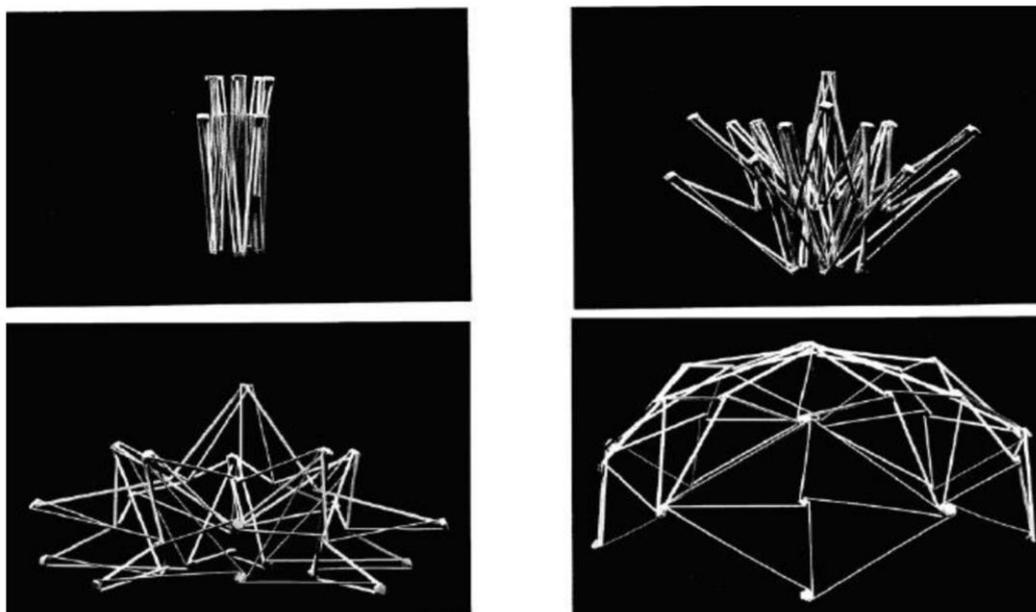


Imagen 28. *“Estructuras Desplegables”*

Modelos de estudio de la tesis de Calatrava sobre la Plegabilidad de las Estructuras.

Fuente: (Candela, Estructuras Transformables , 1993)

“En este sentido es naturalmente un sentido casi panteísta de la existencia de la divinidad en todo, es decir vivimos en un mundo en el que todo son cristales, vivimos en un mundo en el que todo es orden, en el que todo es concierto, en el que nada se mueve por casualidad, Dios no juega con el azar, sino que todo es producto de un orden preciso y de unas reglas de comportamiento que van a lo mejor hasta la frontera de lo inaccesible que hacen que no solamente aquello que vemos sea bello sino también aquello que no vemos sigue siendo bello hasta casi el infinito.”

(Adda, Calatrava, Dios no juega a los dados , 2000)

Ese espíritu de movimiento se cultivó también en obras como el pabellón de Kuwait en la Exposición Universal de Sevilla (1992) donde una especie de gajos similares a las hojas de una palma que se entrecruzan como los dedos de una mano y tienen la componente cinemática del movimiento. La máquina de sombras, una escultura en movimiento como exhibición en el Museo de Arte Moderno de Nueva York (1993) una especie de costillar blanco a partir de lamas de hormigón prefabricado de ocho metros de longitud, dichas lamas en suspensión es otro ejemplo de los mecanismos móviles y se constituye como el límite entre lo que es una escultura y un espacio habitable, porque es en sí mismo un objeto de exhibición contemplativo, pero el viandante puede atravesarlo entonces se puede justificar espacialmente como pérgola que ofrece cierta protección al individuo regulando la incidencia de luz solar.(imagen 29)



Imagen 29. “¿Escultura o Arquitectura?”

Entre los límites de la escultura y el cobijo, espacio habitable

Imagen de la exposición Máquina de Sombras Fuente: (Calatrava, Calatrava.com , 2020)

“Los elementos de hormigón se apoyaron sobre una base que pesaba treinta toneladas, que se levantó como una sola pieza sobre la pared del jardín de esculturas Abby Aldrich Rockefeller del museo. Un encaje en cada dedo enganchó una bola, que se colocó en el extremo de los soportes salientes. “Esta estructura de rótula permite que cada dedo tenga un movimiento articulado completo, impulsado por accionamientos excéntricos montados en el panel trasero.

Un cambio progresivo en el ángulo de acoplamiento con una cadena sin fin produjo un movimiento sincronizado escalonado. Debido a la conexión directa entre el dedo y el zócalo de accionamiento excéntrico, el movimiento circular completo del accionamiento se transmitía a las puntas. Vistos como un conjunto, los elementos de hormigón tenían una forma que recordaba a un sauce llorón. Los visitantes del Jardín de Esculturas encontraron sorprendente ver unas estructuras de hormigón masivas convertidas en algo que parecía ser ligero y suave. Pero en su efecto final, el movimiento de los dedos fue aún más insustancial. Como resultado del movimiento, se proyectó un juego continuo de sombras sobre la base de la escultura.”

(Calatrava, Máquina de sombras, 2020)

El acceso a la galería subterránea de la Plaza España de Alcoy (1995) es reiterativo en las estructuras plegables, muy similar al gesto logrado en la estación de Alameda, también en Valencia el Hemisféric (1998) también ejerce una gran marquesina retráctil con un tensor, una especie de gran cilindro hidráulico que se contrae para efectuar la apertura de gran superficie vidriada. La misma cubierta del Centro de Emergencias en San Galo (1998) analizado previamente, es coronada por un acordeón retráctil.

Aunque esa búsqueda de movimiento en las obras no siempre llega a buen puerto, en Oviedo el Palacio de Congresos de Oviedo (Quizá el proyecto más desafortunado del arquitecto), porque “no cabe en el espacio”, es un proyecto que causa ruido visual, quizá no está implantado en el lugar indicado, producen agobio esos pilares inclinados que casi rozan las edificaciones vecinas una gran visera que tenía que moverse, acabó quedándose fija porque hubo fallos en la ejecución y la seguridad en el momento de apertura estaba garantizada, así que no abrirá, de hecho dos litigios legales ensombrecieron los alardes constructivos, otro edificio con menos suerte, el Ágora de La Ciudad de las Artes y las Ciencias, cuyas lamas que debían coronar el edificio, no se instalaron y acabaron abandonadas a la intemperie en un solar próximo al Oceanográfico.

Retomando en Milwaukee

El español se apañó el encargo ofreciendo una solución que además del nuevo potente hall de acceso, también desarrolla una galería longitudinal que conecta directamente con la instalación preexistente del complejo museístico, articulando zonas de aparcamiento climatizadas y con acabados de primera línea, poco habituales en zonas destinadas a plazas de garaje, entre los finalistas del concurso estaba también el reconocido arquitecto Arata Isozaki, de hecho previo a la elección definitiva del ganador, las directivas del MAM desplegaron una comisión encargada de visitar obras de los arquitectos finalistas, se decantan por Calatrava porque manifiestan que les hizo ver a través de su diseño, algo que no habían llegado a soñar e imaginar, un potente artefacto icónico que además tenía esta cualidad de tener movimiento implícito.

Compleja solución estructural

Para soportar el tablero del puente atirantado con su mástil inclinado y de otro lado la cubierta vidriada del vestíbulo de planta libre que dicho sea de paso, la cubierta surge en realidad del encuentro de los muros que siguen la línea elíptica, además de soportar el arranque de las dos grandes alas desplegadas, para aguantar toda esa carga hubo que recurrir a otro “alarde constructivo” un gran anillo de cables ocultos que abrazan la línea de cornisa y descansan sobre cuatro pilotes adentrados en el solar, los cables se fabricaron en Gran Bretaña, el formato inusual de las láminas de vidrio de gran calibre y grosor necesarios para evitar posibles fracturas cuando se pusieran en movimiento las lamas que definen las “alas” del edificio, de un tamaño considerable si se tiene en cuenta que algunas de las lamas (en par) llegan a medir hasta 66 metros de longitud, superando incluso las alas de un Boeing 747-400, las lamas están orquestadas en un ritmo ascendente, recortadas a propósito en una asimetría unitaria (por ala) que luego la disposición en espejo (dos alas) si denota el par simétrico pero de matriz en esencia marcada por la asimetría. Calatrava en la singularidad de su vocabulario no suele acudir a la producción estandarizada que propende por la fabricación de un mismo elemento en serie, él suele personalizarlo todo, de ahí en parte el origen de los abultados presupuestos que luego arrojan sus obras. A inicios del año 2001 la obra estaba en su fase final de ejecución, faltaba

coronar el edificio con su rasgo más distintivo, las alas, e presupuesto ya estaba disparado y se preveía que las lamas serían materializadas con fibra de carbono, pero elevarían aún más los costes, no se podían permitir más excesos, aun así en este material resultarían más eficientes por su ligereza y para unas barras que van a asumir cargas estáticas y mecánicas la fibra de carbono resultaría idónea. Calatrava no iba a renunciar al sello de su edificio, propuso entonces que se fabricaran las láminas en acero, un ala de fibra de carbono podía resistir vientos sostenidos de hasta 40 millas por hora y una de acero vientos no mayores a 23 millas por hora, aun así se decidieron por el acero, pero resultó que no había en los Estados Unidos un fabricante capaz de proveer en poco tiempo lamas tan esbeltas, así el mismo Calatrava propuso contratar a dos fabricantes de Zaragoza (Ingemetal y Mercier) con el reto de fabricar las lamas en cien días.

Las lamas

72 es el número total de lamas (36 lamas a cada lado) que componen el parasol del MAM, tienen longitudes variables que van desde los 7 metros hasta los 32 metros, articulados con los tubulares que actúan como conectores de rotación hidráulica producidos en Estados Unidos.

La odisea del transporte de las lamas

“En condiciones normales las lamas se habrían transportado en barco, pero para cumplir los tiempos de inauguración del edificio, se contrató el mayor avión de transporte disponible un Antonov 124 de carga frontal que en su día perteneció al Ejército Soviético y posteriormente fue habilitado en Ucrania para transportes especiales fletado como chárter por la aerolínea Lufthansa, se tuvieron que programar dos vuelos con escala en la isla Canadiense de Terranova, una vez en Milwaukee el transporte terrestre hasta la obra se efectuó el traslado de las piezas en la noche para no paralizar el tráfico, una veintena de camiones que dada la longitud de la carga, en algunos puntos de la calzada con giros pronunciados de la vía se tuvieron que desmontar las lamas mediante grúas y montarlas en otros camiones para poder reorientar la carga”

(Moix, 2016)/ pág. 156-157

El sistema operativo de las lamas

Todo el movimiento de las lamas es controlado desde un pequeño cuarto o sala de control que dispone de un tablero con una docena de botones, el mecanismo hidráulico está automatizado y conectado a un temporizador para hacer las tres aperturas por cada día, una al momento en que el museo abre sus puertas, otra al medio día y finalmente la apertura de la noche es más simbólica porque la función que tiene el parasol de controlar la incidencia lumínica al interior del vestíbulo carece de sentido en el ámbito nocturno.

Estas operaciones se suelen acompañar con música alusiva a la exposición de turno, así pues una exposición de cerámica China vendrá acompañada de música tradicional china. La sala de control también cuenta con una pantalla digital en la que se monitorea el movimiento de las lamas y muestra la posición de cada lama en tiempo real, mediante un esquema de dibujo digital y también ofrece información climatológica acerca de la velocidad del viento.

Triunfo de la carga simbólica sobre la eficacia estructural.

Las lamas suponen 105 toneladas de peso a la estructura que conforma el MAM, desde su fabricación en España, cruzaron el atlántico por aire para poder ser instaladas en América, se logró completar la hazaña en poco más de una semana de lo previsto y se logró inaugurar el nuevo edificio en ese mismo año. La imagen del edificio luce victoriosa sus alas desplegadas (imagen 30) el edificio es el nuevo símbolo de Milwaukee, las alas han sido icono representativo de algunas marcas de la región, triunfa el monumento sobre el esfuerzos estructural.

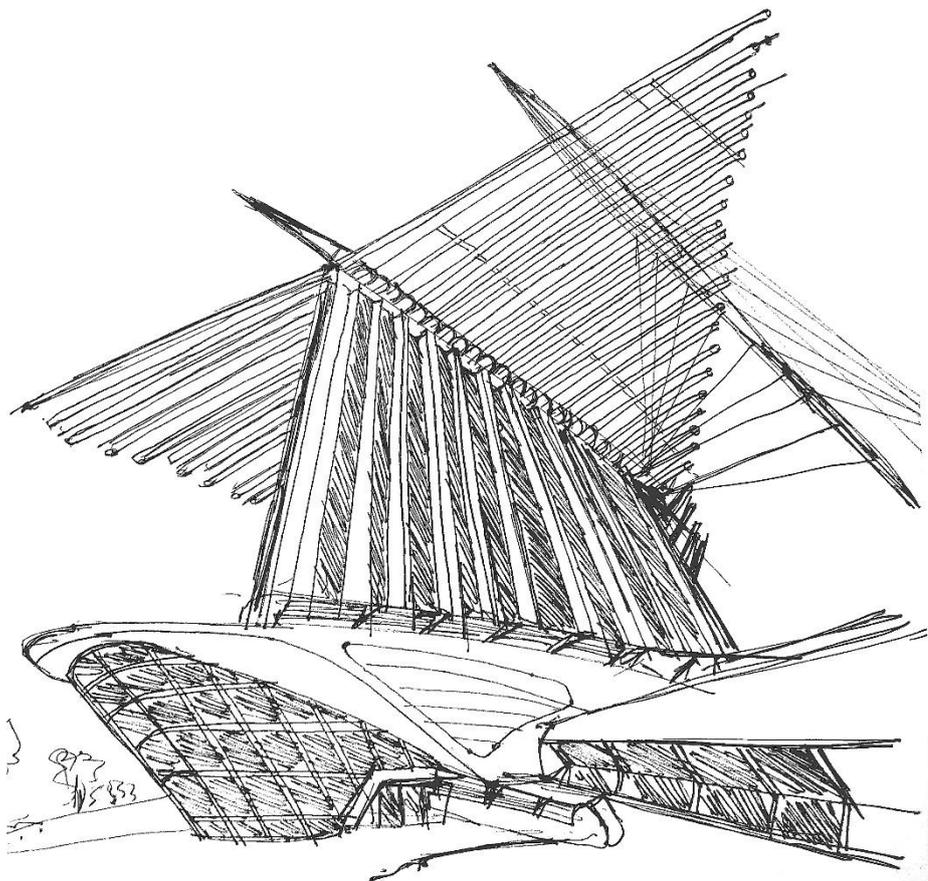


Imagen 30. *"Prevalece la estética"*

MAM

Fuente: Propia

Proyectando el intercambiador en el corazón de Manhattan (2003-2016)

La profunda herida que se abrió el 11 de septiembre del 2001 en el corazón del bajo Manhattan tras el derribo de las torres gemelas, ha cicatrizado ya, la reconstrucción de la llamada Zona Cero, ha sacado lo mejor de la humanidad, es una herida que no se logrará borrar pero que si se logrará sanar en el corazón de los neoyorquinos, se ha revitalizado y se ha rendido homenaje a las víctimas, en los atentados que cambiaron la historia reciente del mundo, veinte años después, el escenario que invadía el caos, hoy prevalece la urbanidad y se ha retomado la confianza para habitar de nuevo los rascacielos, destaca la Torre

de la Libertad originalmente ideada por arquitecto de origen judío Daniel Libeskind, dentro de su plan maestro que contempló la materialización de varias edificaciones que definirían la nueva cara del WTC, el memorial y la reconstrucción del antiguo intercambiador subterráneo que conectaba las antiguas y extintas torres. (Imagen 31)

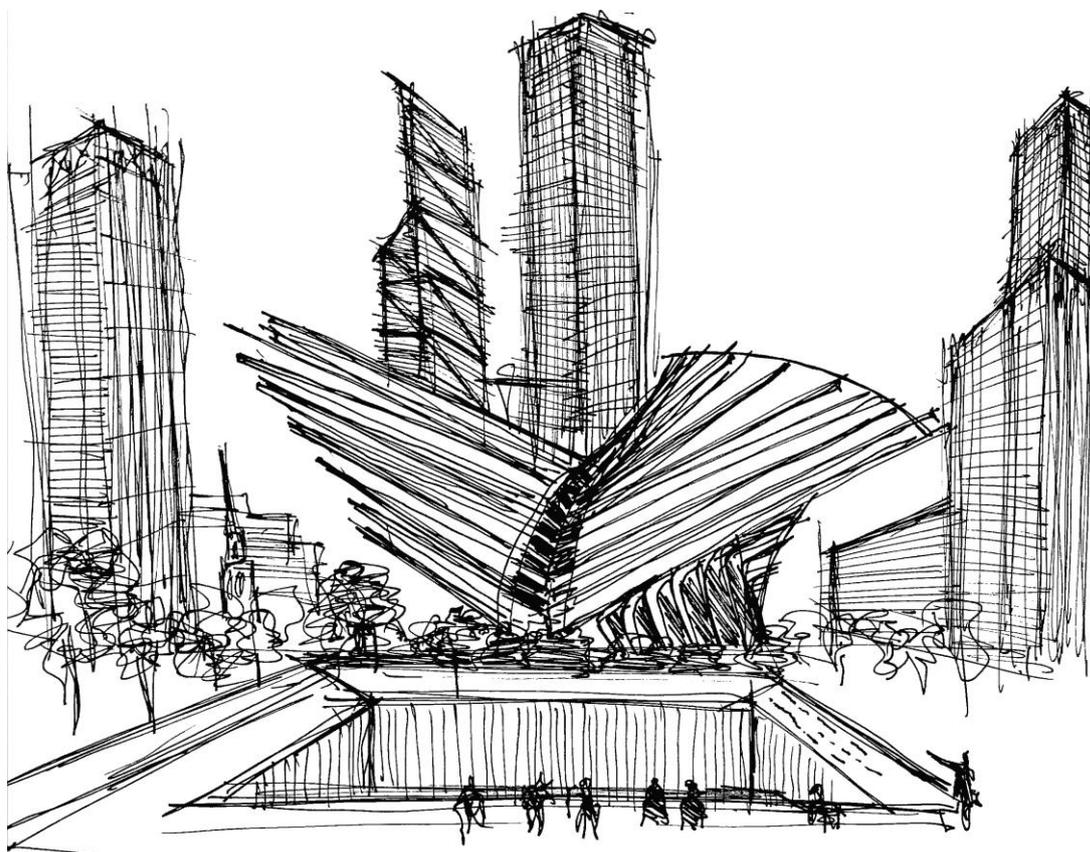


Imagen 31. "Ave en vuelo, prevalece la esperanza"

Vista general del World Trade Center Transportation Hub (WTC) Intercambiador de Transportes de la Zona Cero de Nueva York.

Fuente: Propia

En especial es sobrecogedor el memorial que contempla en medio de una zona ajardinada, dos grandes fosos que destilan agua, ocupan el lugar donde se erigían las extintas Torres Gemelas, ese efecto del vacío en el que todo se sumerge y conecta al individuo con el sitio, un antepecho de bronce troquelado con los nombres de cada una de las víctimas, subraya el tributo, homenaje y respeto al género humano, un gesto que nos devuelve la esperanza en un mundo

mejor, tal deseo fue el que capitalizó el arquitecto español que tuvo con este proyecto la oportunidad de construir en Nueva York, ya había construido en Milwaukee pero en la gran manzana su reconocimiento internacional ya lo situaba en el olimpo de los virtuosos y privilegiados arquitectos que tienen obras emblemáticas y singulares en la ciudad más influyente del planeta, en un principio convenció con una acuarela que representaba a un niño tomando una paloma en sus brazos a punto de emprender el vuelo, como símbolo de la esperanza, traducido a la realidad construida, el intercambiador terminó siendo un robusto esqueleto de acero que emerge en la densa trama urbana de Nueva York colonizada por numerosos rascacielos, el intercambiador con sus enormes alas desplegadas que casi rosan los edificios vecinos, en un principio el español se planteó idear un mecanismo móvil para proporcionar apertura y cierre a las alas como homenaje a las víctimas cada 11 de septiembre, pero la envergadura y escala de esta actuación era muy superior a lo establecido en Milwaukee, y llevarlo a cabo multiplicaría el ya disparado presupuesto. Los sobrecostes motivados por cambios sobre la marcha ralentizaron las obras al punto de ser catalogada como la estación de metro más costosa del mundo, una de las modificaciones importantes que afectaron la imagen de ligereza aportada por los esquemas iniciales vino condicionada porque se tuvo que robustecer la sección de cada "costillar" para cumplirlos requerimientos de seguridad de la estructura que habían sido modificados frente a posibles atentados, normativa que fue endurecida por obvias razones. Calatrava tuvo que reforzar también el anillo elíptico que articula cada una de estas piezas, el resultado en apariencia más cercana a un estegosaurio que a la esbelta expresión de la paloma, ha sido blanco de numerosas críticas.

“las paredes curvas de costillas de acero se levantan 50 metros como un par de inmensas conchas de almeja hacia un nervio de vidrio que es el tragaluz del gigantesco corredor. Calatrava es un escultor de ingeniería estructural que a veces puede estar muy inspirado, sus mejores proyectos son las estaciones de trenes. He admirado durante mucho tiempo una modesta estación que diseñó en Zúrich hace años, en la que logró mucho con relativamente poco. Pero Calatrava se ha convertido en un arquitecto que solo sabe hacer un truco, su obra en World Trade Center evoca su estación de Lyon, Francia y su

museo en Milwaukee. Además de hacer una evidente alusión al Panteón, no sé cuál es el significado, simbólico, del centro de transporte, con sus costillas ensanchadas su tronco encorvado y sus iracundas fauces, que comprimen extrañamente los accesos de la calle. Es como un Pokémon”

(Kimmelman, 2016)

«Calatrava sigue siendo incapaz de superar un defecto fatal del proyecto: la chocante incongruencia entre la extravagancia de su arquitectura y los limitados propósitos a los que sirve», sentenció el crítico de arquitectura. «El resultado es un monumento al ego creativo que celebra la destreza de ingeniería de Calatrava pero poco más»

(Ouroussoff, 2016)



Imagen 32. “Instalando nuevos símbolos en Manhattan”

Santiago Calatrava delante de su maqueta para el intercambiador de transportes de Nueva York.

Fuente: (Blanco, 2009)

La polémica aquí desatada con el intercambiador, recuerda la intervención del gran Frank Lloyd Wright también en la gran manzana cuando expuso su diseño para el Museo Guggenheim de la Quinta Avenida en Nueva York, produjo ruido visual una especie de cilindro colonizado por una rampa ascendente, sin ninguna arista rectilínea en la esquina de su emplazamiento, fue concebido como

catalizador del cambio, de renovación, destaca un contenedor rompedor que amplifica, suaviza la esquina y seduce con la curva, desde luego también fue objeto de polémica en su momento porque estilísticamente renunciaba a la línea recta que colonizaba a la mayoría de las edificaciones en el corazón de Nueva York. La ambición del intercambiador, pretende ser rompedora también, y ofrecer al viajero un gran hall urbano para la contemplación, para dignificar su tránsito y al mismo tiempo es una excusa para producir arte con la estación intermodal.

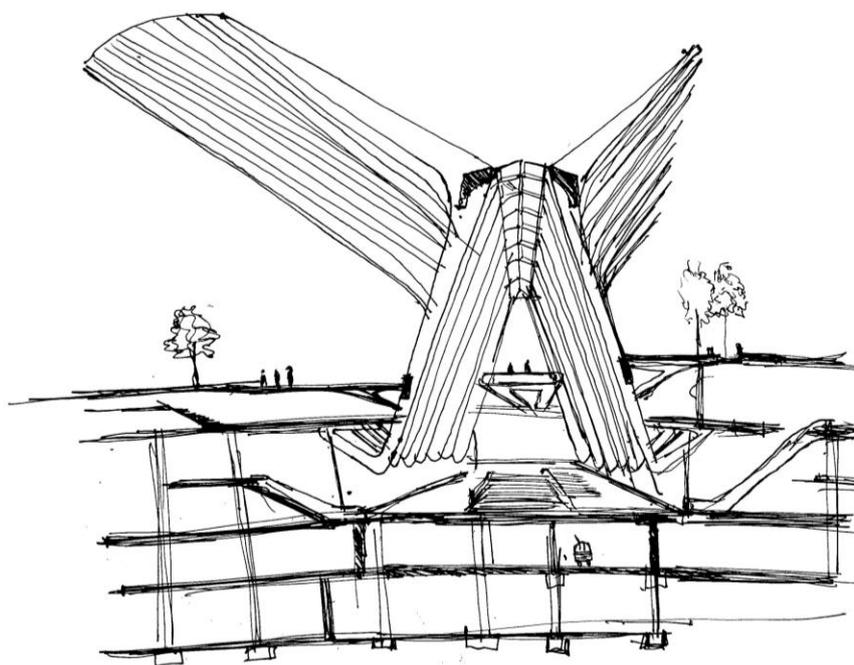
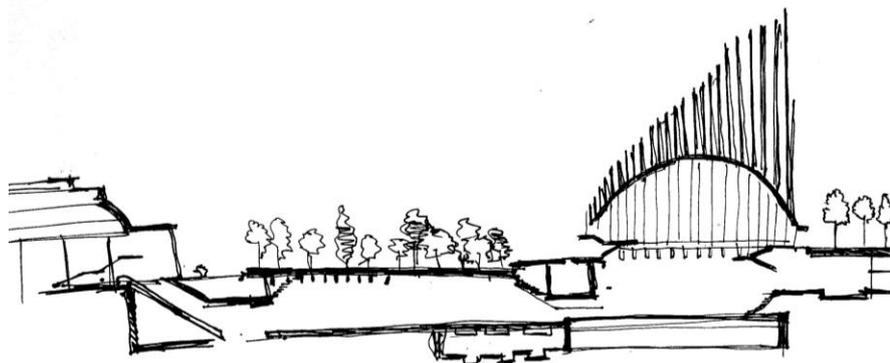


Imagen 33. Oculus

Sección longitudinal y transversal del intercambiador de Transportes

Fuente Propia

Pensamientos divergentes convergen, el deseo del proyectista (imagen 32) delante de un sitio con gran significancia histórica y sus detractores que hacen hincapié en el desproporcionado equilibrio entre forma, función y coste. La infraestructura del intercambiador de transportes de Nueva York contempla además del vestíbulo central, una serie de plataformas subterráneas (imagen 33) que son extensivas horizontalmente, para conectar el Oculus con las líneas de metro que aquí arriban, una galería comercial hace las veces de deambulatorio de transición entre los pasajeros y su ruta de destino para abordar la siguiente línea de metro, que subyace, en un entramado de costillares que dan la percepción de estar en el vientre de un gran cetáceo. Así pues, queda constituido el intercambiador que mueve un promedio de 50.000 personas al día.

Para concluir con el intercambiador de transportes en la Zona Cero, al margen de las críticas, es evidente que la apuesta en este caso, es la idea de Calatrava a través de un gesto alegórico de “las alas de la esperanza”, en realidad son una excusa que cobijan la ambición explícita por incorporar un artefacto potente que no pasara desapercibido, ni la obra ni su creador en la gran manzana, formalista y extravagante, probablemente hay más de arte, de exhibición que de optimización de los recursos en un intercambiador de transportes, este proyecto representó el escaparate perfecto para Calatrava en América con un repertorio formal bastante explotado ya anteriormente pero con la excepcionalidad de su emplazamiento de gran reconocimiento en el mundo, “era momento de exhibir los músculos”. Al margen de toda crítica, lo cierto es que el éxito de los escenarios con destino público dependen de la recepción del usuario de a pie con el espacio, el que sin tener conocimientos sobre el arte, la técnica se siente acogido, en una perspectiva pluralista.

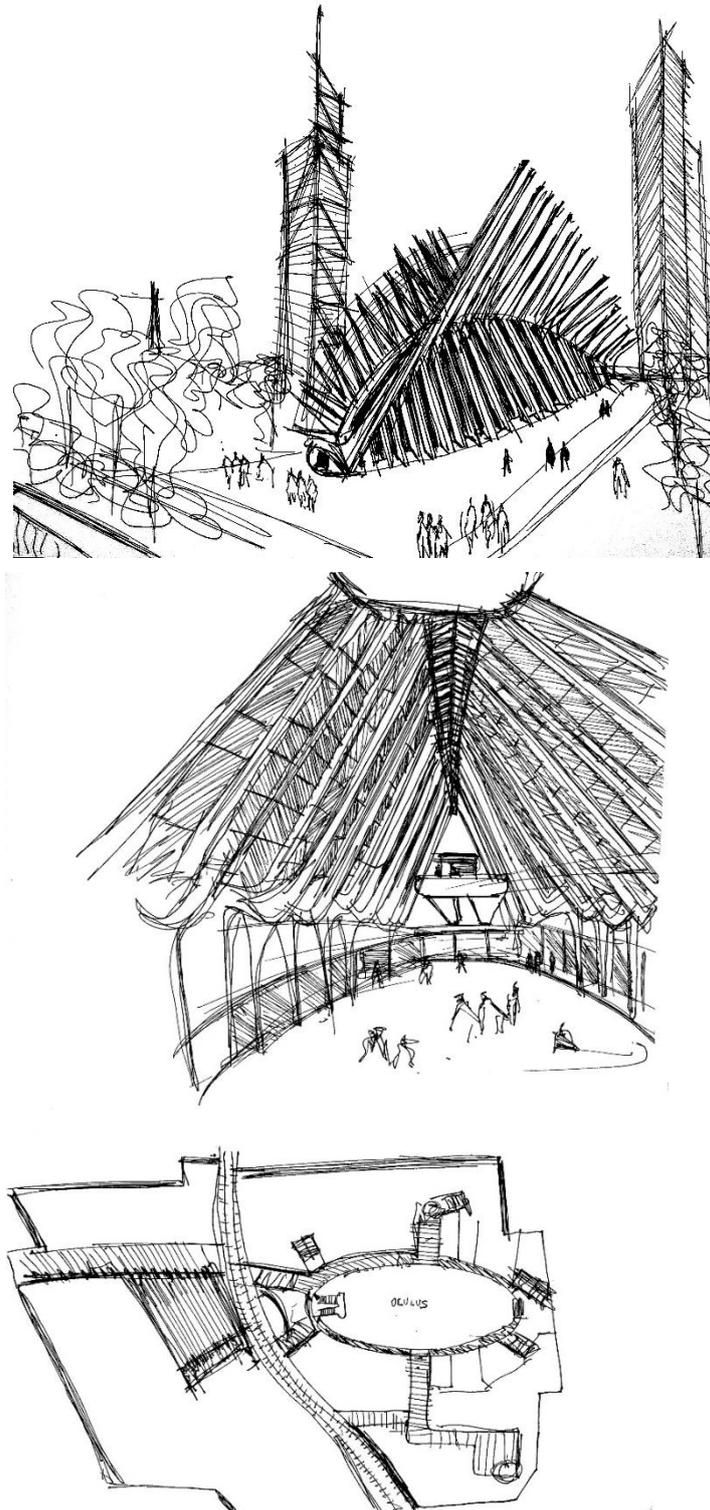


Imagen 34. *“Radiografía Formal”*

Fuente. Propia

Perspectiva general de la estación, Vestíbulo central y esquema en plan

En los ciudadanos está la respuesta, quizá el Oculus como atrio urbano, debió procurar impregnarse del ambiente cotidiano, involucrado en el gran hall deprimido por debajo del perfil de la calle, estancias que generasen permanencias y no solamente producir una actitud contemplativa del edificio, (imagen 34) desde esa gran plataforma de suelo blanco impoluto, se podría albergar microclimas que propicien la tertulia, el bullicio, el ambiente citadino reflejado por ejemplo en la Galería de Milán o la Plaza de San Marco en Venecia, con la actividad en pleno, en ese momento, el espacio cobra especial importancia para los urbanitas el edificio les pertenece, el escenario les pertenece.

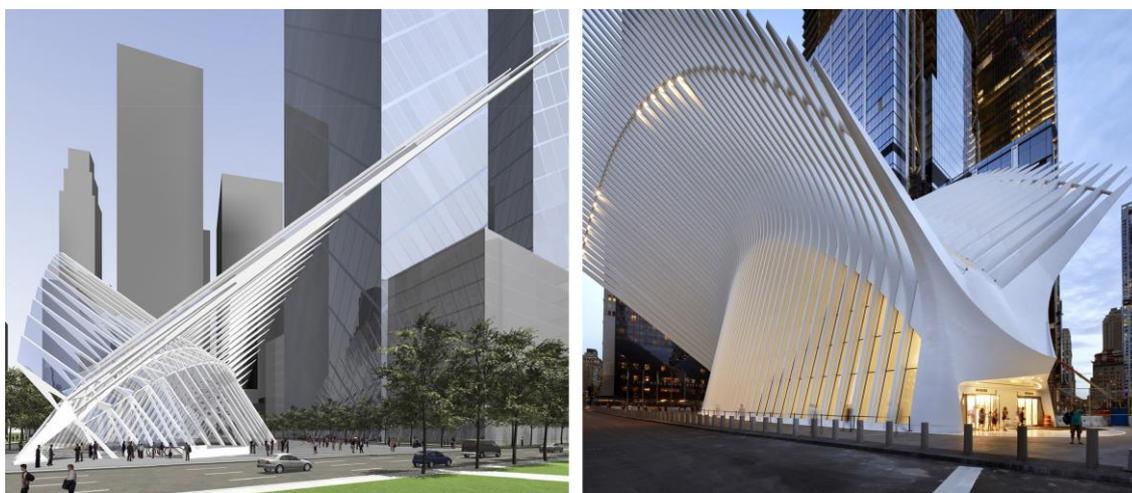


Imagen 35. “De la paloma al estegosaurio”

Evolución, de la ligereza de las alas en movimiento (izquierda) a la robustez de la obra concretada (derecha)

Fuentes (izquierda) (Ocio y cultura, 2008) (derecha) (Calatrava, Calatrava.com, 2020)

Aun hoy por hoy pesa más la imagen de la estación más costosa del mundo con cuatro mil millones de dólares de inversión, retrasos en su ejecución y un espíritu descorazonador por encima de cualquier intención pretenciosamente humanista. La desdibujada imagen de fragilidad y ligereza de las alas y el movimiento de las mismas han quedado clausurados, (Imagen 35) el esqueleto se ha robustecido por razones ya aclaradas y el espíritu de movimiento se agudizó reduciéndose a un tragaluz o lucernario que al efecto de grieta lineal genera una apertura y cierre cada 11 de septiembre para conmemorar a las víctimas.

Residencia sueca, vivir en una escultura. Malmo-Suecia (1999- 2005)

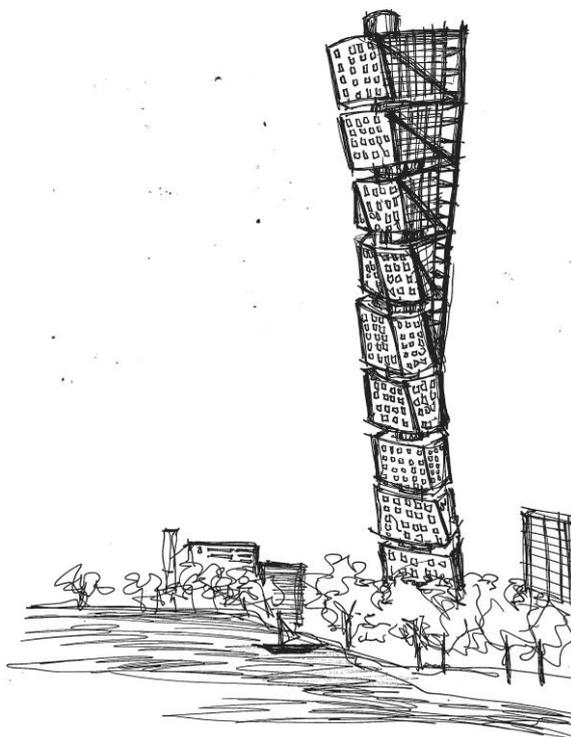


Imagen 36. “Una escultura habitable que se retuerce”

Boceto sobre el rascacielos Turning Torso en Malmo

Fuente: Propia

El Turning Torso es la adopción del nuevo ícono de Malmo, como una especie de faro es un punto de referencia al ser el punto más visible en la trama urbana de esta ciudad costera, (imagen 36) la tercera más poblada de Suecia por detrás de Estocolmo y Gotemburgo. Desde las últimas plantas del rascacielos de cara a sur en una mañana despejada se puede llegar a preciar en un radio de 80 kilómetros el paisaje del país vecino Dinamarca, Turning Torso surge de la idea primigenia de Johnny Örbäck de pretender reconvertir una escultura en un edificio, pues quedó maravillado con la escultura Twisting Torso de Santiago Calatrava y le propuso trasladarla a un edificio de carácter residencial para Malmo, y es que en aquella época, Örbäck era director de una tradicional cooperativa de viviendas en Malmo llamada HSB, con una visión de carácter socialista, que propendía por modelo de economía social, de la creación de viviendas a bajo coste para permitir el acceso a la vivienda a la clase obrera trabajadora. Esa visión no se pudo reafirmar en el rascacielos proyectado por Calatrava, su complicada ejecución disparó el presupuesto. Örbäck lo defendió

catalogando el edificio como innovador, y lo comparó con un automóvil de fórmula 1 como un iniciador de un prototipo de vivienda de carácter revolucionario.

Los Aspectos Estructurales del Turning Torso.

A grandes rasgos este rascacielos articula una serie de losas de forma pentagonal (con tres caras ovaladas y dos rectas) en nueve bloques, soportadas fundamentalmente por un núcleo central de hormigón y un pilar de borde en el encuentro de dos aristas, el pilar en éste extremo, sigue una trayectoria inclinada producto del desfase de cada losa que va produciendo el efecto de torsión y que reforzado con una celosía exterior que atiranta todo el edificio, proporcionando estabilidad horizontalidad al edificio, para contrarrestar los empujes del viento.

La cimentación.

El edificio descansa en un gran pedestal de hormigón a 15 metros de profundidad donde se garantiza un lecho rocoso y firme, la losa de cimentación es una especie de gran cilindro de 30 metros de diámetro y 7 metros de canto, la celosía exterior a modo de espina también descansa firmemente en pilotes anclados al terreno, la obra de ingeniería para la cimentación requirió aproximadamente 5.100 m³ de hormigón, la hazaña contempló el vertido de hormigón en tres días de manera ininterrumpida. El diseño del edificio era inestable porque la resultante de las fuerzas verticales y horizontales no era el adecuado, la solución para la cimentación además, fue aportada por otro consultor calculista estructural de Estocolmo llamado Sten Forsström.

*“La oficina de Calatrava – Prosigue Nohlin- cometió pues dos errores de bulto. El primero fue subestimar el volumen de hormigón de refuerzo. El cálculo inicial hablaba de unas 1.700 toneladas. Al final fueron 4.400. Eso nos hizo perder alrededor de medio año en el proceso constructivo. El segundo fue un error de cálculo de las fuerzas que debían soportar las columnas de acero de la estructura. **Los forjados de hormigón se hubieran plegado como paraguas si no nos hubiera asistido Forsström, salvando la estructura.** También supusieron sobrecostes estas correcciones sobre lo propuesto por Calatrava quien no tuvo ningún conveniente a la hora de aceptarlas pero jamás admitió que Forsström le había evitado un completo desastre en el Turning Torso”*

(Moix, 2016)/ pág. 170

Los muros de hormigón del núcleo que sustenta las losas.

Alrededor del núcleo central de hormigón van girando en su eje las losas que desde la primera planta hasta la última planta (la número 54) alcanzan un giro de 90°, concebir a priori un edificio a partir de una escultura de siete cubos de mármol que de manera análoga representa el movimiento torsional de la columna vertebral humana arroja efectos interesantes desde la resolución estructural adoptada, aunque trae también consecuencias de tipo espacial, las particiones para los diferentes habitáculos, quedan rezagados a la periferia de su núcleo que abrazan el punto fijo (escaleras y ascensores) con un diámetro de 10,5 metros y un espesor de los muros de 2.50 metros lo que confiere un área útil reducida por planta a un edificio que integra oficinas en los dos primeros bloques y viviendas en alquiler en los siete bloques restantes. No quedó más remedio que alquilarlas pues debido a los sobrecostes motivados por los cambios sobre la marcha para poder ajustar el diseño a la realidad del lugar y sus afectaciones, los retrasos en la entrega de los planos del proyecto de ejecución, las disputas entre Calatrava y el director de la obra Nohlin, Örbäck como cliente consentidor del arquitecto y fundamentalmente el mayor empleo de hormigón y acero requerido para poder sustentar y estabilizar constructivamente el edificio supuso un incremento en el coste de las viviendas fuera del mercado, lo que hacía inviable venderlas a los clientes convocados, paradójicamente HSB no pudo acometer el propósito con el que se promovió el edificio de viviendas a bajo coste para la clase obrera trabajadora, Örbäck pagó los platos rotos y fue despedido además tuvo que enfrentar sentencias judiciales posteriores a su relevo, el consuelo de Calatrava para Örbäck fue “*Suecia no es un lugar para visionarios*”, todo esto está explícitamente narrado en el documental del cineasta sueco Fredrik Gertten *El Socialista, el Arquitecto y la Turning Torso* que recoge una serie de anécdotas y contratiempos durante la ejecución de las obras del rascacielos más alto de Escandinavia.

La espina dorsal o celosía exterior que atiranta el edificio en un extremo.

La celosía metálica exterior proporciona estabilidad horizontal al edificio, un tubo de 900 mm que sigue la trayectoria curva producto del desfase que hay en cada losa, va cosiendo el edificio en el tramo de los dos vértices planos, a modo de

espina dorsal con una serie de conectores que se anclan al pilar de hormigón una serie de diagonales también están articulados con la espina y proporcionan rigidez al conjunto de los nueve bloques, las uniones bulonadas permiten cierto grado de flexibilidad a esta especie de malla estructural exterior en el momento en que la acción del viento produce movimientos horizontales en el edificio, las derivas en las últimas plantas del edificio pueden llegar a experimentar un desplazamiento de hasta 30 centímetros que hacen oscilar el edificio y que son amortiguadas por esta especie de exoesqueleto exterior de 820 toneladas de peso que se activa trabajando en combinaciones de tracciones y compresiones.

Las losas estándar, losas cónicas y losas de anclaje de diagonales.

Un grupo de seis losas estándar con espesor de 27 centímetros configuran cada grupo de bloques o cubos (en total son 9 cubos) como se describió anteriormente están sustentadas fundamentalmente por el núcleo central, además una serie de pilares metálicos en la periferia de la forma pentagonal contribuyen a estabilizarlas y transmiten los esfuerzos a la losa inferior o losa cónica. Se impone una viga de cuelgue solidaria para compensar la luz en esa zona con un canto de 54 centímetros, que se apoya entre el núcleo central de hormigón y en el otro extremo por la columna de hormigón que aporta una sección de 1.50 x 1.50 metros que se sitúa en la punta en donde convergen los dos vértices rectos de la losa pentagonal. Las losas cónicas de sección variable entre 90 centímetros en el área próxima al empotramiento central y 40 centímetros en los bordes, son las encargadas de respaldar la solitud de los voladizos en las áreas que fraccionan cada uno de los nueve bloques que definen la composición.

Por último las losas de anclaje de diagonales, son unas losas ubicadas en la parte superior de cada uno de los nueve bloques que sirven de anclaje y reciben el encuentro de las barras horizontales y diagonales del exoesqueleto, para respaldarlo, estas losas tienen un recrido puntual de hasta 52 centímetros necesarios para acomodar la armadura y transmitir los esfuerzos recibidos de los puntos en los que conecta con el armazón o celosía exterior.

Los muros de cortante.

Los muros de cortante, vienen a ser solidarios con las losas de anclaje de las diagonales y contribuyen a la estabilización de la celosía exterior, existen dos muros de cortante articulados en disposición radial con referencia al núcleo central y dos muros de cortante directamente en el perímetro de las fachadas con un espesor menor de 30 centímetros. En general, los muros de cortante actúan como elementos mediáticos porque transmiten los esfuerzos horizontales de la celosía al núcleo central y particularmente los dispuestos de manera radial contribuyen a que el núcleo central y la celosía trabajen en conjunto y de manera solidaria, en una expresión del esfuerzo unificado.

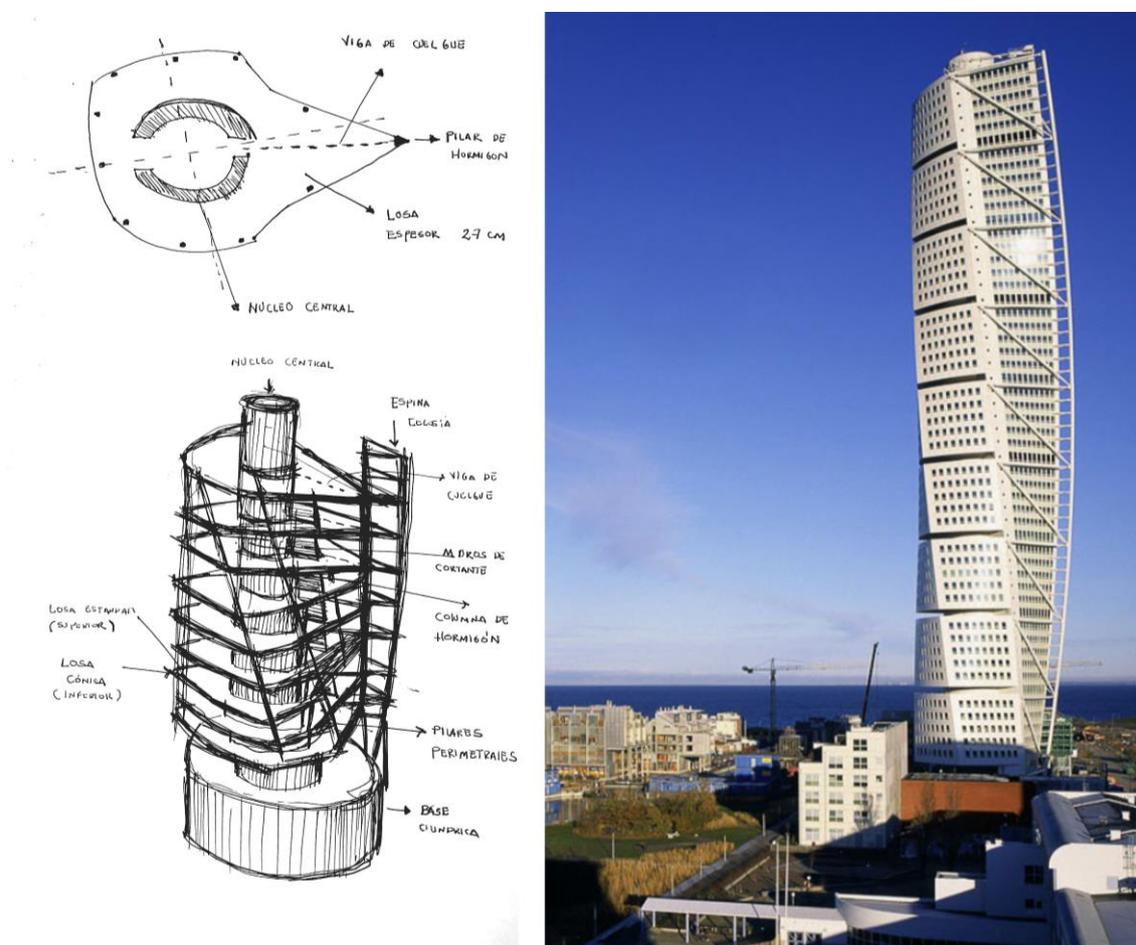


Imagen 37. "La composición"

Modelo conceptual del aparato constructivo del Turning torso (izquierda)

Fuente: Propia

Perspectiva general del Turning torso en el contexto horizontal de Malmö (Derecha)

Fuente: (Calatrava, calatrava.com, 2020)

El proceso de configuración estructural del edificio se expone en la anterior lámina (imagen 37)

Los cerramientos del Turning Torso.

La compleja forma obtenida de un edificio que se retuerce exige que la piel que lo configura sea maleable, que se adapte a la morfología del movimiento expresivo y explícito, las fachadas del Turning Torso está compuesta por una serie de paneles de aluminio curvados, (imagen 48) cerca de 2.800 unidades de paneles cubren el perímetro del rascacielos sueco, con 20.000 metros cuadrados de superficie total de fachada de los cuales 5.500 metros cuadrados son paneles de vidrio contenidos en las 2.250 unidades de ventanas.

En resumen, la superficie total edificada es de 31.900 metros cuadrados, con 190 metros de altura desde el nivel de la calle, 25.000 metros cúbicos de hormigón total empleado, 4.400 toneladas de acero empleado en la armadura y 820 toneladas de acero empleado en la celosía o exoesqueleto que arriostra la estructura. Las diferentes tipologías de viviendas que articula el Turning Torso están contenidas desde bloque 3 hasta el bloque 9 y varían entre los 45 metros cuadrados de dos dormitorios, 92 metros las de tres dormitorios y 190 metros cuadrados las viviendas de cuatro cinco dormitorios esta última tipología solamente disponible en la planta 51, la superficie construida por planta es de 400 metros cuadrados. Como reflexión, estructuralmente el edificio no presenta mayor novedad constructiva pues responde al núcleo portante de hormigón clásico, sin embargo la espina dorsal articulada a modo de gran celosía atirantando el edificio en un extremo si puede catalogarse como invención de un rascacielos retorcido sobre su propio eje y poderosamente icónico.

El diseño de interiores de las viviendas no estuvo a cargo de la firma de Calatrava, Samark Arkitektur & Desing AB, Malmö fueron los encargados de personalizar las viviendas. El edificio en planta baja articula un hall de acceso con un espejo de agua y algunas esculturas de Calatrava, el lobby es estrecho con una cortina de vidrio que apenas se separa del núcleo central revestido de madera que articula las escaleras tres ascensores para las viviendas y dos ascensores para las oficinas disponibles en los primeros dos bloques del edificio. Vivir en un edificio que imita a una escultura implica que eventualmente se

sacrifique la espacialidad en determinados puntos del edificio mismo, la pauta por crear un artefacto icónico a modo de gran faro u obelisco blanco en Malmo produce una fragmentación de la marcada horizontalidad de esta población, con lo cual se potencia su carácter de símbolo para la región, un elemento escultórico autónomo planteado dentro de un contexto urbano por contraste.

Además de conseguir ser la estructura habitacional con mayor altura en toda Escandinavia, el edificio es en sí mismo un proyecto de investigación porque planteó muchos desafíos para poder materializarse, surge de una determinada asociación antropomorfa, traducida hacia un determinado humanismo y se mantienen hoy por hoy como una de las referencias más potentes para catalizar el turismo en Malmo.



*Imagen 38.
"Poderosamente icónico"*

*Modelo a
escala sobre el
rascacielos
Turning Torso,
elaborada en el año 2010*

Fuente: Propia

Es evidente que con sus 190 metros de altura, el Turning Torso es seductor, yo recuerdo que en mi época de estudiante me fascinaba observar fotografías del edificio retorcido y me motivó a construir una maqueta a escala del mismo en mis vacaciones de verano hace diez años, elaborar el modelo me permitió indagar en la composición y particularmente indagar en la escultórica e iónica forma obtenida por Calatrava, una pieza que luego exhibía “como una escultura” en el salón de mi casa (imagen 38) la iniciativa nacía del interés plástico de la forma estructural del edificio en sí mismo, aunque fundamentalmente se sumaba al interés que ya despertaba en mí la singularidad del arquitecto español, llevo más de una década siguiendo de cerca sus obras y hoy estoy sintetizando estos conocimientos exponiendo al desnudo, los límites de esta estética tan seductora frente a la expresión canónica de la eficiencia estructural consigna de este trabajo de investigación.

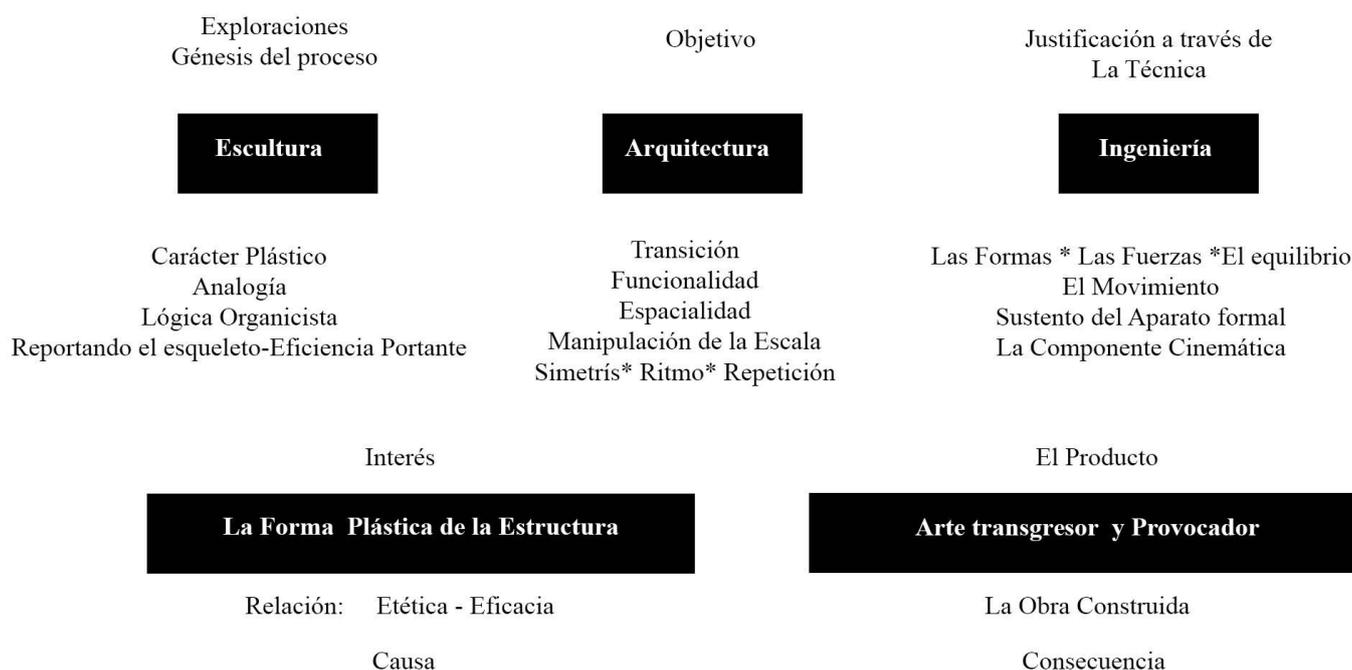
El edificio ha sido distinguido con el premio al mejor edificio residencial del mundo por la Feria Construcción de CANNES y el premio “FIB” Nápoles 2006 de reconocimiento a las estructuras sobresalientes.

1.8 El Escultor, el Arquitecto, el Ingeniero y el Artista.

EL VOCABULARIO CALATRAVA

ESQUEMA ESTRUCTURANTE

El Escultor + el Arquitecto + el Ingeniero = el Artista



En síntesis, **El Vocabulario Calatrava** intenta concebir la Arquitectura como un hecho plástico, la Ingeniería como un hecho plástico y la Escultura como un hecho plástico aunque autónomas las dos primeras en relación a la escultura, pero que mantienen determinados vínculos que Calatrava reconcilia en las tres disciplinas, con un especial interés de **expresar las fuerzas de la estática de la estructura y su capacidad resistente**. El resultado singulariza el producto Obtenido.

Tabla 1. El Vocabulario Calatrava

“Esfuerzo Unificado: Arquitectura-Ingeniería-Escultura” Esquema estructurante del proceso creativo de Calatrava a modo de síntesis (tabla 1) y las implicaciones con un desplazamiento hacia el interés por la expresión plástica de las estructuras y su capacidad estática.

Fuente: Propia

1.9 El caso de Valencia: El “Monocultivo Calatrava”

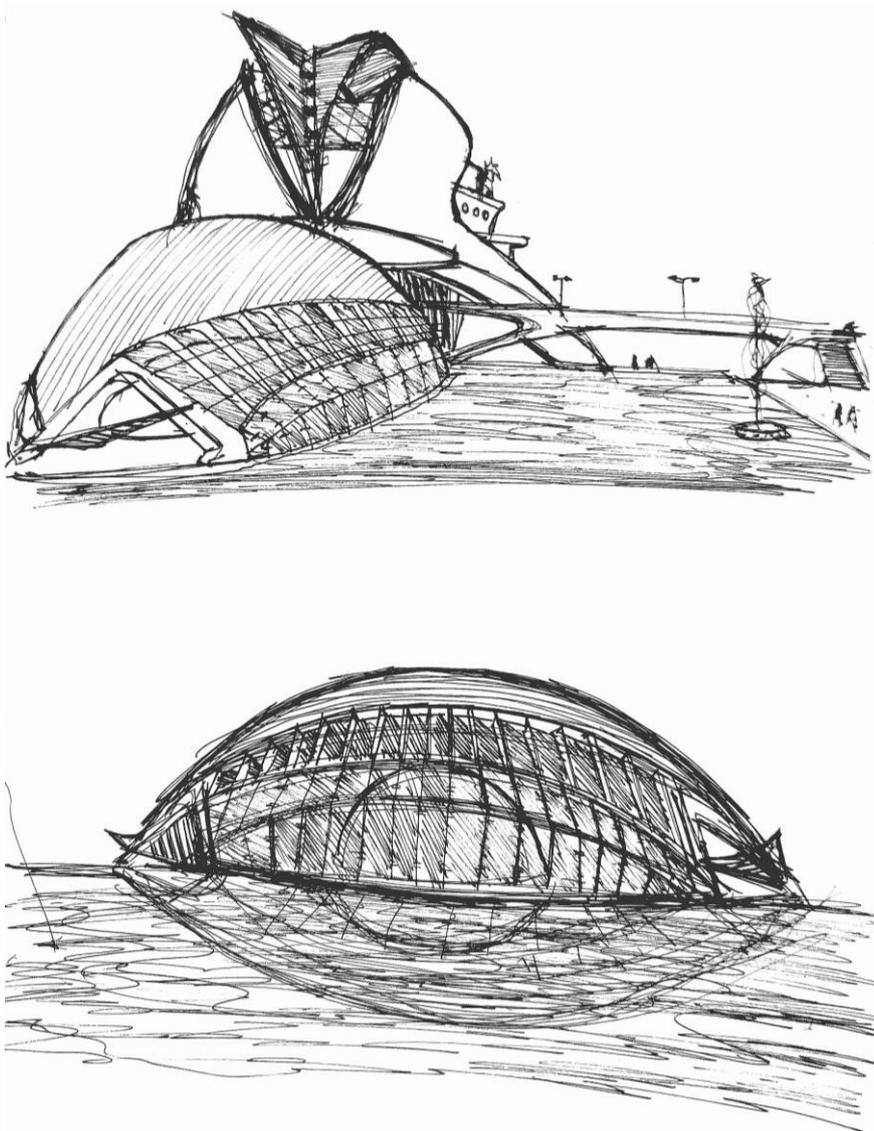


Imagen 39. “*La Arquitectura Espectacular*”

Perspectiva general Ciudad de las Artes y las Ciencias, destacan en la vista el Palacio de la Ópera y el Planetario.

Fuente: Propia

La Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia. (1994-2009)

En Valencia se practica el “monocultivo Calatrava” La Ciudad de las Artes y las Ciencias, (imagen 39) su obra nada silenciosa es el enclave más fotografiado de Valencia, es al mismo tiempo la ciudad con más “calatras” por metro cuadrado en el mundo, además, el complejo de ocio y cultura recibe anualmente más de

2.5 millones de visitas al año. Este proyecto despierta especial interés de mi parte para plantear las reflexiones desde la perspectiva de recualificación urbana que puede aportar la arquitectura espectacular, sumada a la sobreexposición mediática del arquitecto, siendo la obra que mejor conjuga sumas y restas, bondades y adolescencias y finalmente es importante porque es la obra que con mayor notoriedad en el globo del arquitecto hijo de Valencia. Además por un tema práctico aquí se instala el Puente de la Serrería, que será la obra que permite a modo de muestra de laboratorio, indagar en las cuestiones que más me preocupan personalmente como es inspeccionar la expresión estética de la forma estructural y su correlación con su capacidad resistente, su capacidad estática. Para poder concluir el presente tema de investigación, abordaré a profundidad el puente en el capítulo IV.

La Arquitectura Espectacular.

El termino arquitectura espectáculo es muy común en nuestros días, las posibilidades tecnológicas en el contexto contemporáneo plantea nuevas exigencias, esta arquitectura de impacto y visibilidad fue impulsada en gran parte por los políticos particularmente en Europa, que con un deseo de capitalizar y atraer inversión económica, estos edificios singulares se plantearon como los códigos del turismo edificios, vistos como artefactos de resolución llamativa, donde interesa más el cascaron, la piel el contenedor y no el contenido. Edificios que se viven mucho afuera, exteriorizados, se explota fundamentalmente el aspecto visual, contemplativo del edificio, Bilbao es la ciudad que encarna mejor esta tendencia de intenta revalorizar el territorio y potenciar la revitalización urbana con artefactos icónicos y el Guggenheim de Frank Gehry es el epicentro global de esta tendencia. El resultado es como un imán del turismo y la consecuencia es poner el territorio en el mapa. Lo que ocurre es que después de la crisis económica del 2008 la Arquitectura Espectáculo en Europa perdió a su patrocinador número uno la administración pública y se tuvieron que repensar los edificios con destino público, no solo tienen que ser bellos, pero útiles, y además resistir parece obvio porque ya esto es conocido en las reflexiones del tratadista romano Vitruvio, pero en algún momento el afán de destacar y competir olvidó la esencia del habitar. La arquitectura es tanto mejor cuando responde a

una necesidad que cuando se la inventa, el arquitecto está para ofrecer soluciones, para dar respuestas y no para crear la necesidad, de eso en parte adolece la arquitectura espectáculo.

Esta breve reseña para instalar el contexto que potenciaron por cerca de dos décadas la resolución extensiva de la Ciudad de las Artes y las Ciencias inicialmente llamada Ciudad de las Ciencias y las Comunicaciones que preveía tres edificios, el Planetario, el Museo de las Ciencias una gran torre de telecomunicaciones en el extremo oeste del complejo que fue desestimada, inicialmente el proyecto fue promovido por el PSOE con el cambio de gobierno al PP Calatrava consiguió reorientar el proyecto que en su momento se vio amenazado de no concluir más que el Planetario y el Museo, sin embargo con la nueva administración logró extender aún más de lo previsto su obra, instalando nuevos edificios y haciéndola colosal y visible.

Consolidando el vínculo de la ciudad con el puerto.

El objetivo del emplazamiento de la Ciudad de las Artes y las Ciencias, es para fortalecer el vínculo de la ciudad con El Puerto, motor de la economía y el turismo en casi veinte años de trabajo, con una inversión que superó los mil doscientos millones de euros por cada euro aportado de la administración pública el sector privado invirtió en la zona entre diez y quince euros para “generar ciudad” es decir, para revitalizar una zona que antes no se capitalizaba como hoy, el lugar es el remate del eje urbano de la desembocadura del antiguo cauce del Turia y ha implicado la revalorización del suelo. Una ambición urbanística con pauta inmobiliaria pero también un deseo de integrar el sector deprimido de Nazaret con la ciudad, el proyecto emerge como un ejemplo de intervención cultural para regenerar un área urbana de la ciudad. Esta zona del cauce era probablemente la más degradada de Valencia, la implantación del complejo permite acercar más la ciudad al puerto, una necesidad de integración que aún debe explotarse, aún falta terminar de afianzar el vínculo de Valencia con su puerto marítimo y necesariamente nuevos hitos con destino público deben tener cabida para establecer lazos entre la ciudad y el puerto (imagen 40).

Si bien es cierto que el complejo tuvo un sobrecoste del 285% no es menos cierto que se fueron añadiendo más edificios, por ejemplo el Umbráculo una serie de

arcadas paralelas que cubren el jardín no estaba contemplada en el proyecto inicial. Solamente estaba proyectada en éste punto la nave de aparcamiento, Calatrava sugirió que quedaba bien un jardín sobre la cubierta que cubría el parking y así aprovecharlo como deambulatorio a modo de pequeño boulevard, luego sugirió que un buen remate sería cubrir también el deambulatorio con esta estructura metálica arqueada que recuerda los nervios de una hoja de palma, del mismo modo el ágora tampoco estaba previsto y del cual se rumora que se origina en una cena entre el expresidente del gobierno Popular Francisco Camps y Calatrava que le dibuja un esquema del ágora en una servilleta.

“Uno llega a la conclusión de que un modo de dignificar el tedio, la decadencia, la ordinariéz de la periferia de nuestras ciudades construidas hace treinta o cuarenta años, es introducir edificios de calidad que recalifican el lugar, le dan identidad y hacen soñar a la gente que vive en sitios mejores”

(Calatrava, Conferencia magistral, Teatro de la ciudad, Monterrey, 2000)



Imagen 40. “Impacto Urbanístico, Regeneración Urbana”

Imagen aérea de Valencia, destaca el mar mediterráneo y el futurista complejo de Ciudad de las Artes y las Ciencias.

Fuente: (Cano, 2020)

Los componentes de la Ciudad del Ocio y la Cultura

El Planetario:

(Hemisféric 1998) fue el primer edificio inaugurado del complejo, una coraza ovoide de cien metros de longitud que acoge un domo de proyecciones, el más grande de España con una pantalla cóncava de 900 m². La analogía explícita del ojo humano se expone de manifiesto, la coraza tiene el arranque de dos marquesinas retráctiles que análogamente expresan el párpado y el efecto de movimiento en el cierre y apertura de estas marquesinas operadas por un mecanismo hidráulico que hace replegar las distintas lamas de vidrio, de nuevo la componente cinemática, el espíritu de movimiento es explotado aquí, el domo contenido representa la pupila y una serie de láminas de agua duplican la imagen del edificio reforzando el carácter del ojo pudiendo ver en el reflejo en espejo la lectura del órgano de la vista humana completo.

El Museo de las Ciencias Príncipe Felipe:

en su orden es la segunda edificación concretada del complejo, destaca la sistemática repetición de un mismo módulo para configurar el edificio, la búsqueda de plástica escultórica deja al desnudo la estructura que establece una serie de pilares ramificados que derraman en una cubierta plegada, es un edificio de líneas profusas, recargado, extravagante, los grandes voladizos que abrazan una especie de puente tendido en suspensión, finalmente se adhieren a sus extremos dos grandes escaleras que no estaban previstas inicialmente en el proyecto contempladas por Calatrava, tuvieron que ser añadidas a posteriori porque el edificio no contaba con escaleras de emergencia de salida directa del museo a la calle y el jefe de bomberos dijo que no firmaba el informe de seguridad de evacuación sino se contemplaban las escaleras de evacuación de emergencia, así pues, al final aparecen dos escaleras gigantescas que intentan a su modo permearse del carácter plástico del museo esculpiéndolas como dos extremidades del edificio (imagen 41).

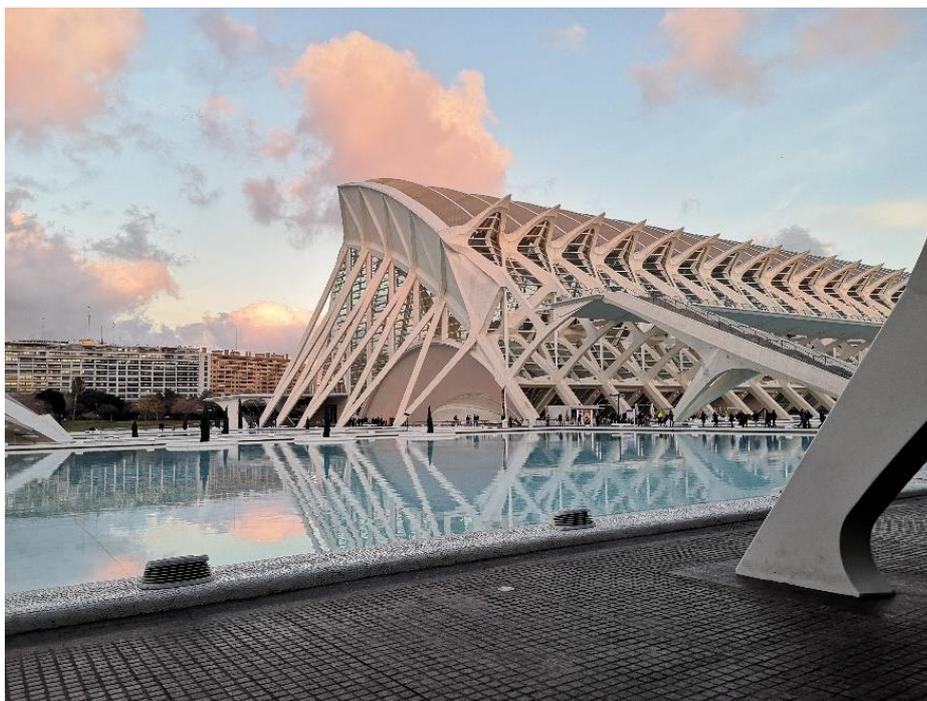


Imagen 41. “Neogótico profuso”

Captación del Museo de las Ciencias Príncipe Felipe

Fuente: Propia

El Palacio de la Ópera Reina Sofía:

encarna la faceta más formalista de Calatrava, sin embargo no siempre fiable en sus soluciones técnicas, él mismo declaró que era su obra más intensa, (imagen 42) éste coliseo operístico vino a reemplazar a la torre de telecomunicaciones que ya se había descartado pero las cimentaciones de la torre ya se habían materializado antes del cambio de gobierno y una de las peticiones era aprovecharla con un edificio potente de otro uso, la ópera es probablemente el edificio más impactante de todos los del complejo de la Ciudad de las Artes y las Ciencias, también el más costoso, la adherencia del trencadís sobre la plancha metálica que recubre la superficie de su fachada ha tenido problemas, las diferencias térmicas entre un material que dilata mucho como el acero y otro que dilata y contrae poco como el cerámico ha terminado por reventar el mosaico que recubre el Palacio, se tuvo que reemplazar todo el mosaico reestudiando su método de sujeción de un modo más resistente, también son famosas la inundación producto de las torrenciales lluvias que destrozaron la plataforma escénica, el retiro de decenas de butacas sin

visibilidad al escenario y los minúsculos ascensores para llenar y vaciar la sala. Un edificio que encarna la faceta más artística y a la vez más polémica de Calatrava.



Imagen 42. “El más emblemático”

Captación del Palacio de las Artes Reina Sofía desde los jardines del Turia

Fuente: Propia

La relación con el Oceanográfico

Aunque el Oceanográfico es parte integral del complejo ideado por Calatrava no están directamente vinculados, el edificio del ágora contribuye aún menos a que esta relación pueda darse porque su implantación, escala y alto grado de hermetismo introvertido que parece dar la espalda al Oceanográfico, el acuario más grande de Europa, que contiene la última intervención de Félix Candela con unos de sus típicos y elegantes cascarones, en el acceso y restaurante del acuario que recuerda a uno proyectado por el mismo Candela en Xochimilco México “los manantiales” para un restaurante también. Por otra parte, el ágora

no llegó a concluirse su remate con unas lamas móviles que tenían que coronar el edificio y que acabaron abandonadas en un solar de la zona, un edificio sin uso concreto que se ha explotado poco y que hoy por hoy CaixaForum intenta reorientar. El Umbráculo ya lo he mencionado y el puente de Serrería será objeto de estudio central.

Una segunda vida.

Hechas sumas y restas, la Ciudad de las Artes y las Ciencias tendrá una segunda vida, tendrá que reinventarse, posiblemente nuevos usos podrían alojarse para hacerla aún más atractiva y rentable, es indudable que es un complejo singular fundamental para proyectar a Valencia como ciudad cosmopolita con una visión contemporánea que integra nuevos e históricos hitos urbanos, la eterna convivencia entre pasado y presente respetando la memoria del pasado pero permitiendo que el presente se exprese.

SEGUNDA PARTE
La Construcción, el Vocabulario Tangible

La construcción, el Vocabulario Tangible

II

Calatrava y los puentes

“El hecho de construir un puente significa mucho más que unir dos lugares simplemente, significa dignificar el lugar y a través de la unión permitir el drenaje y la circulación alrededor, que puente en sí mismo sea lugar. Yo considero que el puente es un elemento vivo y que está todavía sujeto a la posibilidad de desarrollo, sea a través de la innovación del aparato técnico sea a través del aparato formal del puente. Mi búsqueda se ha limitado exclusivamente al aspecto más íntimo y más interno del puente que es su sistema estático”

(Calatrava, Tres Arquitecturas, 1989)

La segunda parte, indaga particularmente en los puentes, son estos últimos la muestra más explícita de la obra del valenciano frente a la problemática de la eficacia frente a la belleza. Establecer las sinergias vinculantes entre las solicitaciones que deben afrontar estructuras de estas características y su aparato formal expresivo constitutivo, con el fin último de comprender el dialogo de su sistema estático frente a su constitución formal. El puente tiene un carácter vinculante, usualmente permite salvar distancias, sin embargo, yo también comulgo con las reflexiones aportadas por Calatrava frente a que esta condición de salvar distancias ineludible a su sentido funcional de primer orden no necesariamente es la más concluyente, los puentes se constituyen como una de las estructuras a las que se les puede sacar mucho partido desde el punto de vista estructural y estético, los puentes trascienden al punto de reconvertir el lugar, significar, aportar al desarrollo de la técnica, expresar las posibilidades tecnológicas del momento. Se inicia con el caso de Barcelona, además de ser el primer puente proyectado por Calatrava, expresa un deseo, “el puente como lugar” aunque enfrenta también el fenómeno de la redundancia deliberadamente artística, acto seguido se establece la síntesis de la evolución de los puentes de arco, posteriormente se expone el caso de Sevilla expuesto como desafío e

innovación constructiva y finalmente se estudia el Puente de la Serrería (Valencia) como factor concluyente de las preocupaciones de esta investigación.

2.1 Barcelona, la excusa del puente traducido en escultura.

Puente Bach de Roda (1984-1987)



Imagen 43. “El puente escultura”

Puente Bach de Roda, Barcelona

Fuente (Propia)

La primera impresión que tuve cuando visité el puente barcelonés fue la de estar contemplando dos grandes esculturas blancas que habilitaban un tablero en el centro, la experiencia sensorial de dinamismo vino condicionada por una serie de arcos con diferentes orientaciones en el espacio configurando una especie de deambulatorio donde el pórtico virtual lo definen la serie de cables que unen los arcos y el tablero escoltando el recorrido del peatón. (Imagen 43)

Configuración del puente.

El puente tiene una longitud de 128 metros y se divide en tres tramos, el tramo central habilita el tráfico rodado, los dos tramos de borde habilitan dos calzadas peatonales. Dos pares de arcos gemelos (uno de ellos con orientación vertical en el espacio y el otro arco mantienen una inclinación de 60º uniendo los dos arcos arriba.) los arcos y tablero quedan unidos mediante cables a modo de tirantes. En particular la lectura del arco inclinado lo recibe su base con la misma lectura inclinada, un basamento estilizado y tremendamente formalista, que además habilita una escalinata en cada extremo de los arcos, cuatro escalinatas en total que establecen la conexión expedita entre el plano superior y la zona debajo del puente marcado por las huellas de la vía férrea, se preveía entonces revitalizar la zona con jardines integrando diferentes zonas de la ciudad para intentar reducir la brecha que imponía el paso de la vía férrea. Desafortunadamente hoy esa pauta de revitalización urbana al margen del puente no es una realidad, cuando he visitado la zona el verano de 2019, encuentro la conexión clausurada desde las escalinatas dejándolas infrutilizadas, bloqueadas con una valla, la maleza se ha apoderado de la cota inferior del puente y los grafitis colonizando el blanco imperante de su estructura no pasan desapercibidos.

Fenómeno de estructura redundante.

Es probable que el puente articule más elementos de los necesarios para que sostenga, ¿los arcos deberían ser dobles o bastaba con uno vertical por tramo? Si bien el arco en posición vertical puede oscilar, el arco inclinado contribuye a estabilizarlo a modo de contrafuerte, sin embargo ¿era la única solución? Desde luego que no, si el arco vertical no fuera tan esbelto y se incrementara su masa oscilaría mucho menos, aunque restringir la esbeltez del arco tiene una incidencia en la apariencia y naturaleza plástica del puente, el factor estético es capital para Calatrava, la apariencia deseada condiciona la sofisticación del diseño en función de una forma escultórica con una ambición de constituir un símbolo para la región. Los puentes se calculan fundamentalmente para satisfacer tres tipos de solicitaciones: peso propio, sobrecarga de uso y

sobrecargas especiales en determinados puntos. Los arcos no serían necesarios para que el puente soportara su propio peso pero si lo eran para las sobrecargas.

El puente escultura.

El puente Bach de Roda marcó un precedente porque inclinó la producción de Calatrava hacia una línea arquitectónica más expresiva y plástica que esencial. Este es su primer puente construido como su primera obra en España, pues su obra se concentraba en Suiza su país de adopción, se pudo concebir en Barcelona un puente de menor ambición formal, pero la ambición aquí de manifiesto era marcar el territorio creando infraestructuras públicas de aliento escultórico. El propio Calatrava declaró que había creado el puente como excusa para crear una escultura en el contexto barcelonés.

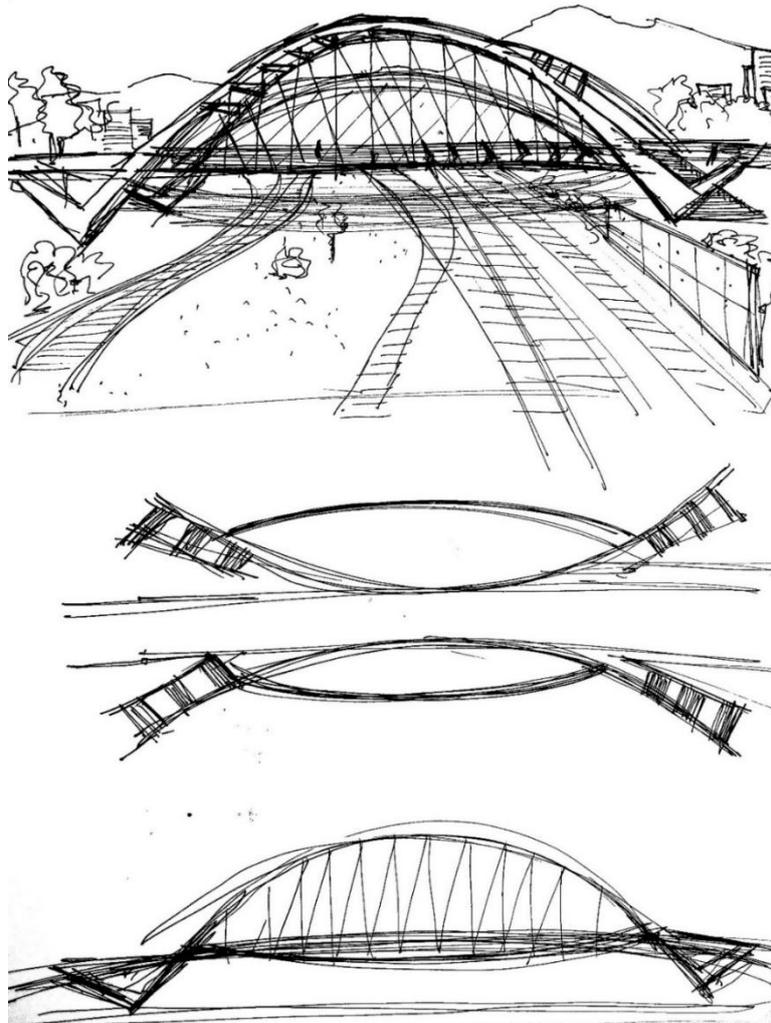


Imagen 44. *“Expresión plástica”*

Perspectiva general, planta y alzado del puente Bach de Roda, Barcelona

Fuente (Propia)

A grandes rasgos, la pauta expresiva y simbólica del puente es patente (imágenes 44 y 45) Esa ambición estilística trasciende del aparato formal del puente hasta significar los aspectos visuales y fenomenológicos a través del recurso lumínico nocturno, una retórica en los puentes del valenciano que apuesta por diseñar las luminarias del puente para que en la noche no pase desapercibido, y proyecten el vientre del puente iluminado. Es decir la cara inferior del tablero con proyectores direccionados.

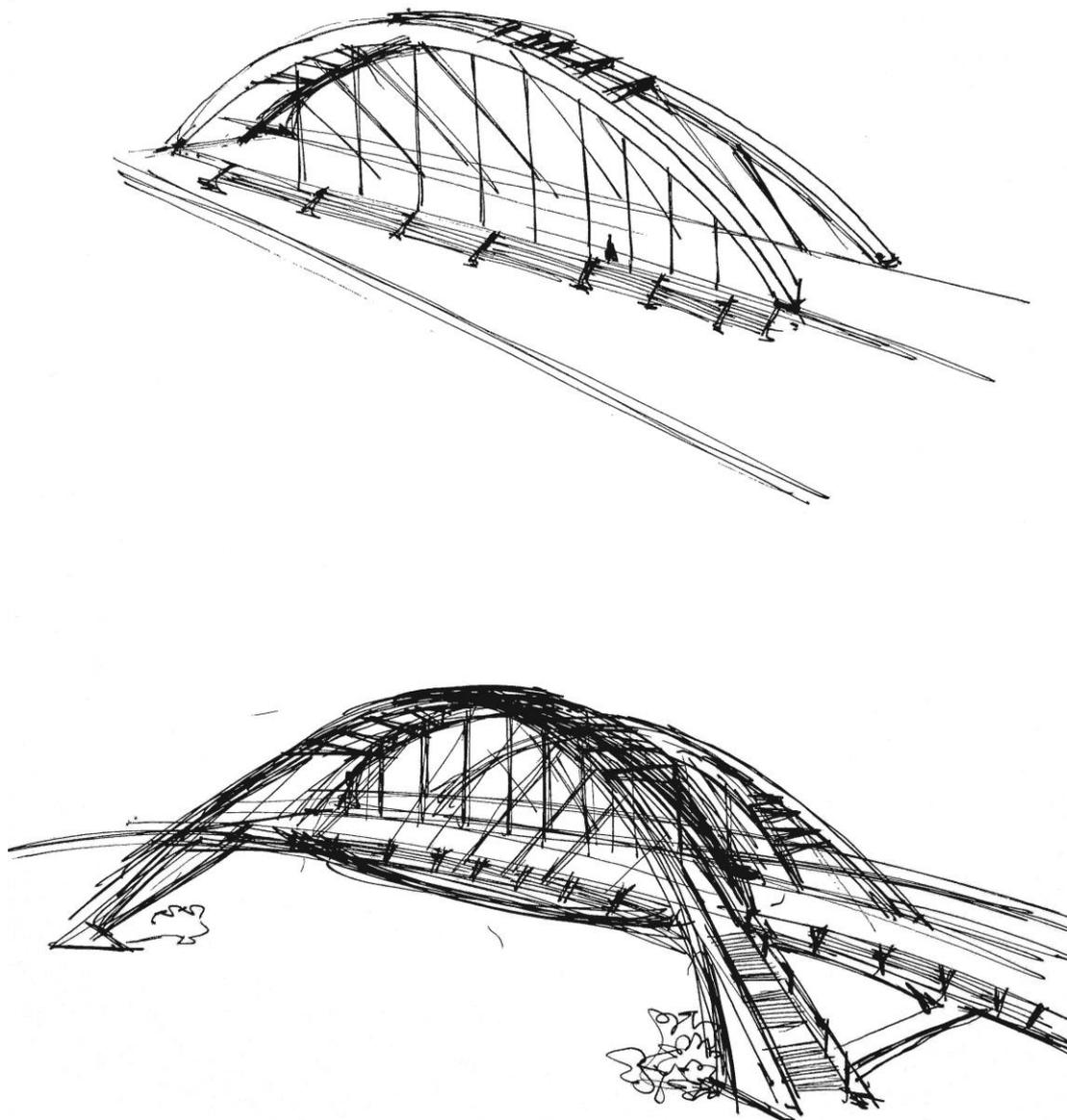


Imagen 45. "Alarde técnico"

Perspectivas generales, del puente Bach de Roda, destaca el desarrollo de los arcos que integran las escalinatas con una lectura de continuidad y tratamiento escultórico.

Fuente (Propia)

“Construir obras de ingeniería inspiradas en el alma del artista, a mí me parece adecuado plantar un objeto extravagante y hacer un alarde técnico en un contexto de subdesarrollo tecnológico como el de Mérida, no sé, ¡provocar! Y también mi interés se centra en introducir un nuevo vocabulario de formas blandas de carácter surrealista. Mis proyectos tienen un carácter utopista y visionario.

(Calatrava, Conferencia magistral, Teatro de la ciudad, Monterrey, 2000)

2.2 Síntesis de los Puentes de Arco.

Puente de Lusitania (Mérida 1988- 1991)

De la serie de puentes de arco el primero es el puente de Mérida en el que aparece un arco simétrico con un tubo de torsión y los dos tableros en voladizo a ambos lados. (Imagen 46).

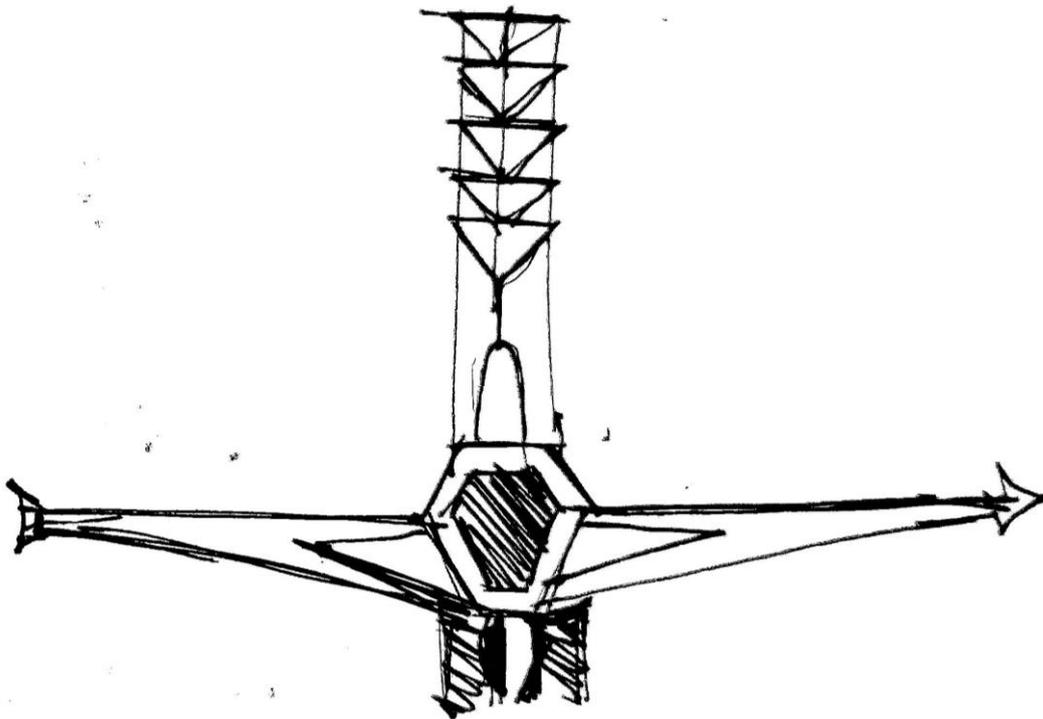


Imagen 46. Sección Puente de Mérida

Fuente: Propia

Puente de Puerto (Ondárroa 1989-1995)

En el puente de Ondárroa se introduce una variante que era hacer una situación asimétrica entre el arco y el tablero, creando un tablero de torsión con el tráfico rodado y a un extremo una calzada peatonal y peatones cara al mar a modo de gran balcón en el otro extremo. (Imagen 47).

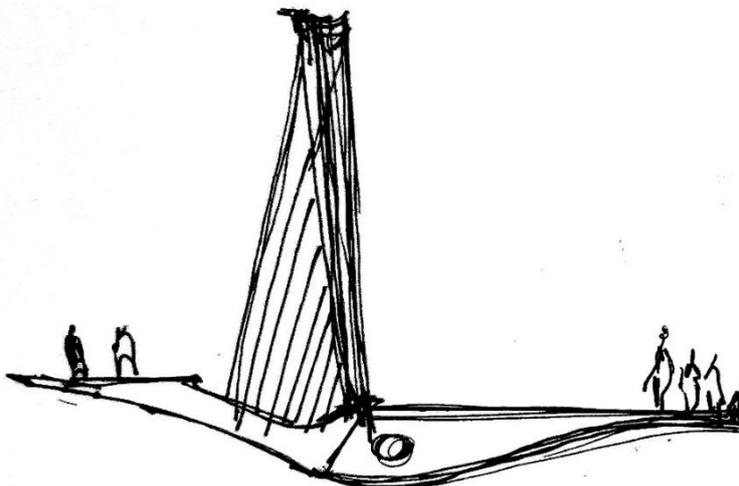


Imagen 47. *Sección Puente de Ondárroa*

Fuente: Propia

Puente Pasarela la Devesa (Ripoll 1989-1991).

El siguiente paso significativo es el puente de Ripoll de carácter minimalista en el sentido de tener exclusivamente dos tubos: un tubo longitudinal y el tubo en forma de arco y con costillas llevando el tablero de peatones en voladizo. (Imagen 48).

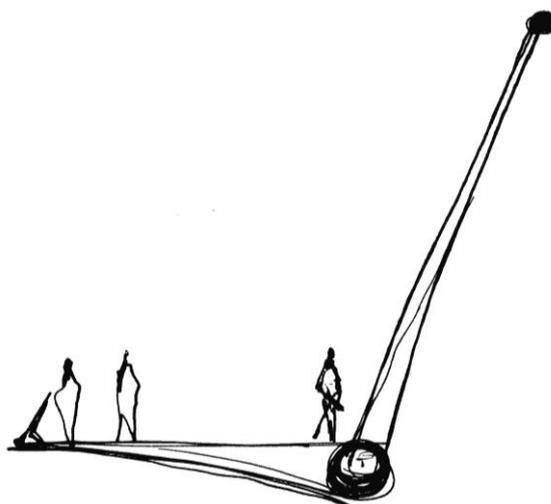


Imagen 48. *Sección Puente de Ripoll*

Fuente: Propia

Puente de la Exposición (Valencia 1991-1995)

La síntesis de estos dos puentes últimos (Ondárroa y Ripoll) es el puente de Valencia, en el cual el tablero de torsión está a un lado, el arco es inclinado el puente recto y hay cuatro líneas de tráfico unilateralmente distribuidas, más dos calzadas peatonales a ambos lados. (Imagen 49).

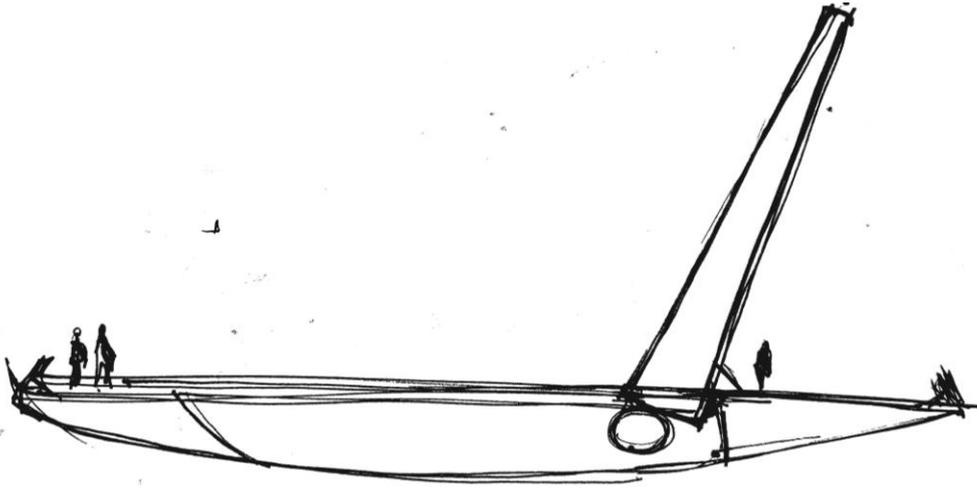


Imagen 49. Sección Puente de Valencia

Fuente: Propia

Puente Pasarela Campo Volantín (Bilbao 1990-1997)

El puente de Bilbao es el último de la serie de puentes de arco inclinado, no solamente tiene el arco inclinado sino que además tiene la planta del tablero en forma curva y es de una gran ligereza, la diferencia con el resto de puentes es el hecho de ver que representa una negación del concepto del estribo en la medida en que el estribo es una especie de dos brazos tendidos que soportan al puente enfatizando por la forma y por el hecho de estar en voladizo la ligereza del puente en sí mismo. (Imagen 50).

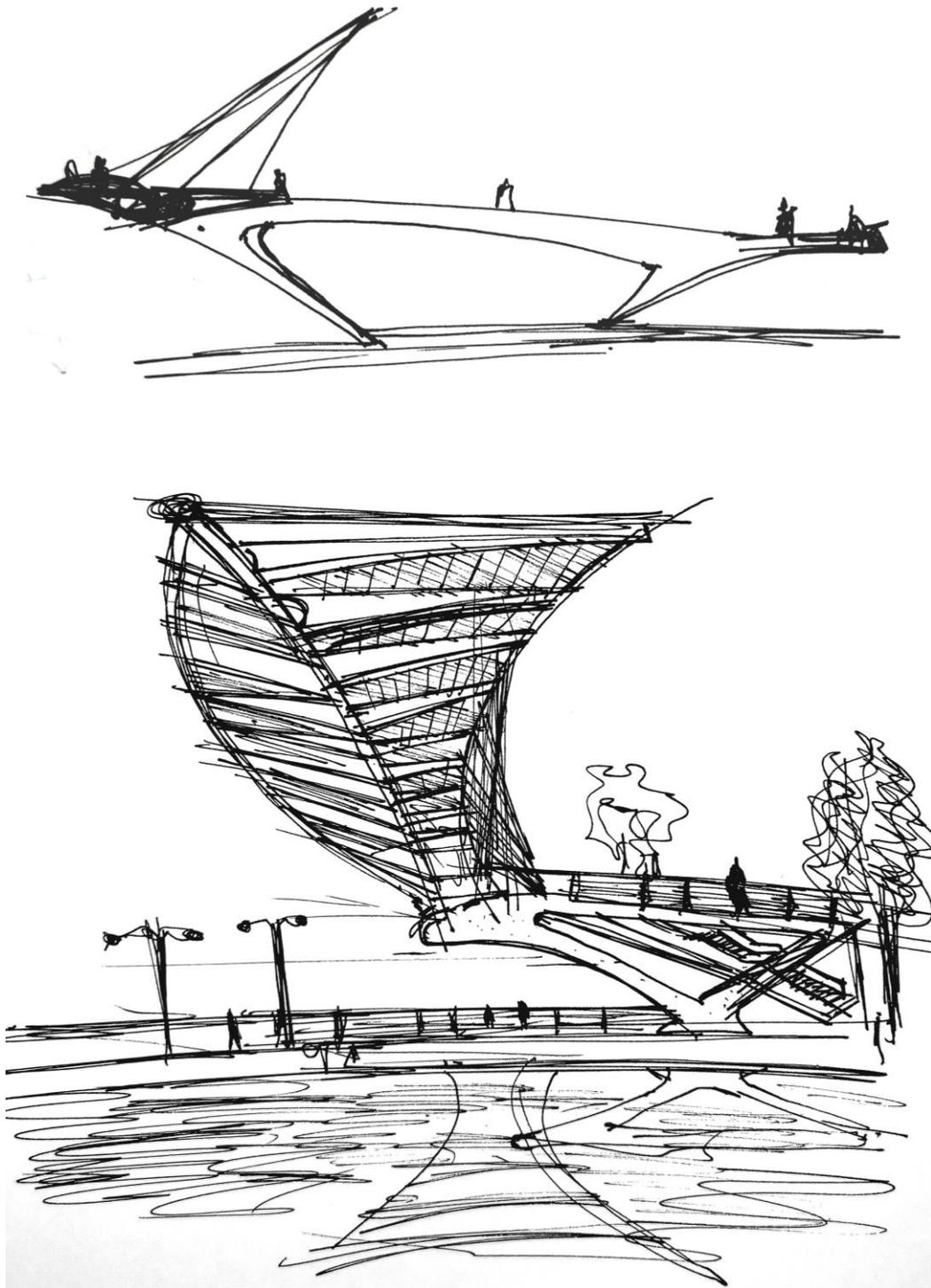


Imagen 50. Sección y perspectiva Puento de Bilbao

Fuente: Propia

2.3 El Alamillo... ¿Innovación o alarde constructivo?

Puente del Alamillo (Sevilla 1987- 1992)

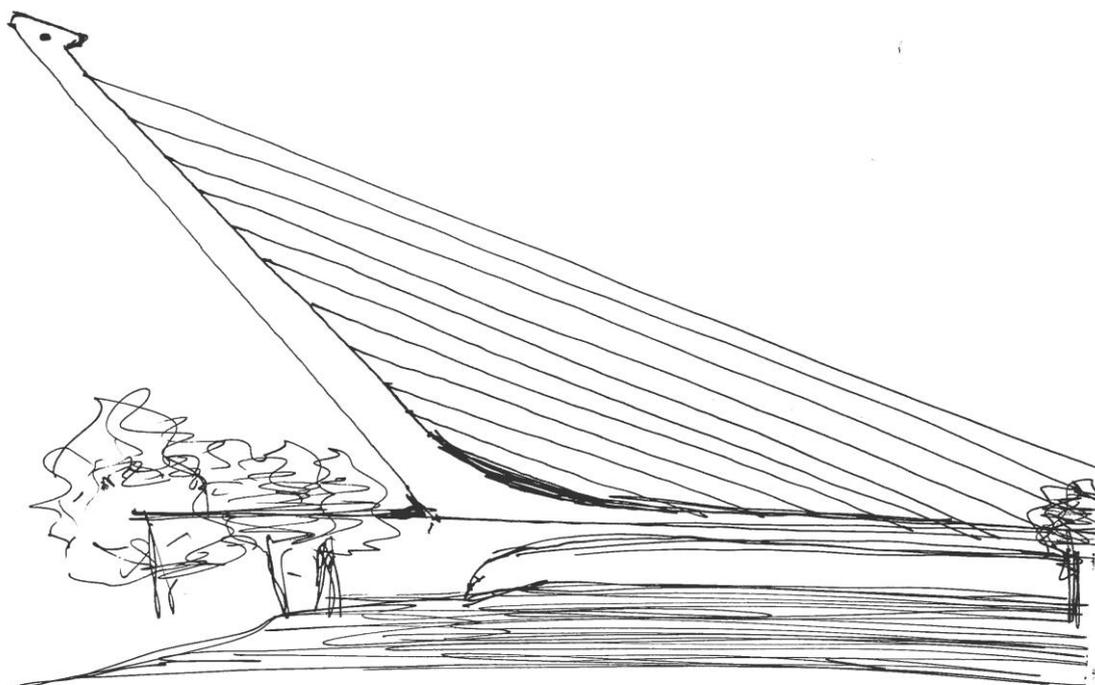


Imagen 51. "Juego de contrapesos"

Perspectiva general del Puente del Alamillo Sevilla

Fuente: Propia

Un pilono inclinado en un ángulo de 58° sostiene un tablero de 220 metros de longitud salvando una luz de 186 metros, la envergadura de este gran mástil alcanza los 134 metros de altura con trece pares de cable que sostienen el tablero partiendo de la parte delantera del pilono o mástil que no tiene cables de retenida, la imagen expuesta es de concepción y carácter minimalista (imagen 51). La propia masa e inclinación adecuada del pilono actúa como contrapeso para lograr obtener estabilidad del mismo y poder soportar el tablero. El tablero, de particular diseño: un gran cajón metálico de sección hexagonal con dos alas dispuestas en simetría respaldan el tráfico rodado (imagen 52) sin embargo para acometer el complejo sistema de contrapesos del puente fue requerida una poderosa cimentación de hormigón armado que respalda el pilono, que se configura a partir de cajones metálicos recubiertos de hormigón. La

cimentación del pilono acomete 54 pilotes de hormigón que descienden a 47,5 metros de profundidad.

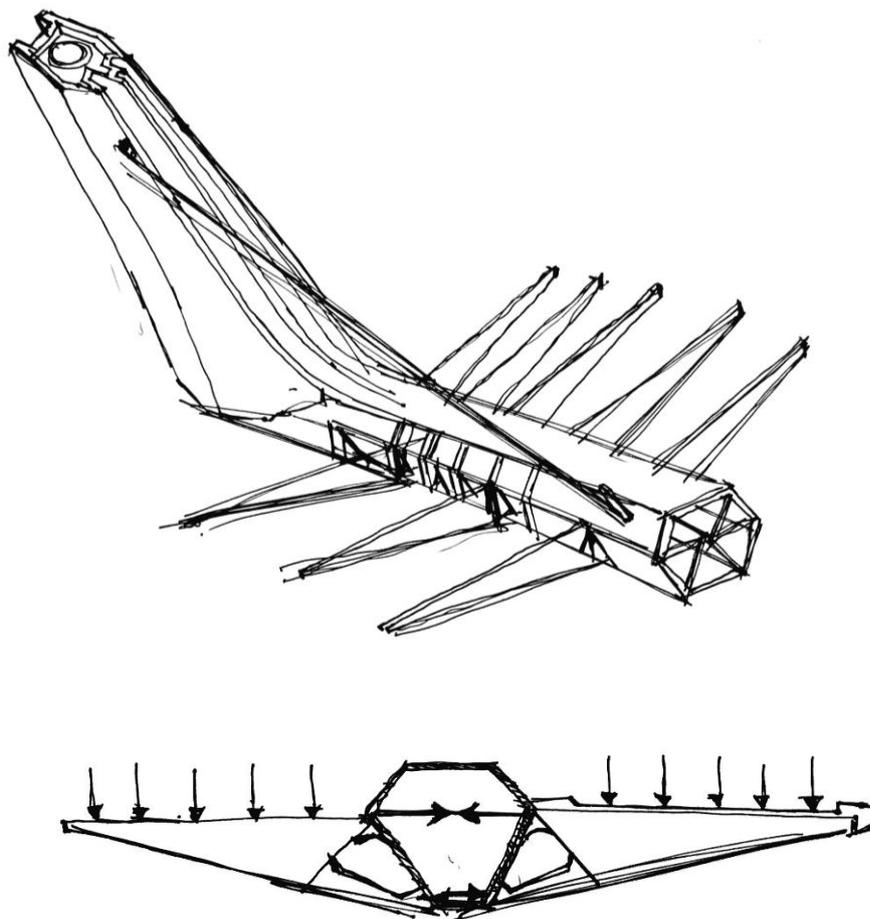


Imagen 52. Sección y alzado Puente del Alamillo

Isométrico y Sección transversal del tablero

Fuente: Propia

¿Innovación o a lazar constructivo? Pues confluyen ambas, en primer orden la innovación encarnada en la filosofía y concepción de un puente singular: La clave está en la capacidad estática del puente traducida en esfuerzos compensados, las deformaciones que experimentan el pilono y el tablero por su propio peso y por la acción que ejerce la gravedad, producen la tensión efectiva de los cables, así pues, en el proyecto de ejecución, basados en esta filosofía innovadora, unir los tramos del pilono y el tablero con sus respectivos cables para lograr el mutuo equilibrio limpio y honesto desde la perspectiva de sinceridad estructural supondría entonces ejecutar pilono, tablero y cables en simultaneo. Sin embargo de ejecutarse de este modo, el equilibrio de momentos entre el pilono y el tablero

no se daría y la construcción en simultánea de ambos (pilono y tablero) hubiera podido provocar tensiones y movimientos indeseados y peligrosos, según fuentes facultativas de la obra. El armado del tablero se montó sobre una cimbra impuesta sobre el cauce del río. En el desarrollo del Pilono, Calatrava quería que la apariencia externa fuera la del hormigón blanco, porque en el momento del encuentro del pilono y su base surge una curvatura que hace ver pilono como una extensión de la plataforma haciendo una suave transición. Se desestimó en la construcción ejecutarlo así y se optó por construir el pilono con cajones metálicos que además hacen las veces de formaleta para verter el hormigón dentro, ejecutando el puente de este modo, se evitaron también determinados esfuerzos estructurales que pudieran producir eventuales fisuras en el pilono.

El equilibrio de fuerzas en el puente.

Los esfuerzos equilibrados correspondientes a una pareja de cables no provocan momentos flectores en la cimentación del pilono. (Imagen 53) el esquema expresa las fuerzas distribuidas en la estructura del puente, el peso que ejerce la inclinación del mástil afronta una carga distribuida axialmente, produciendo una reacción en la base “como si intentara despegarse del suelo” comprimiendo el tablero por la acción de los cables en tensión que a su vez trabajan por la acusada inclinación del pilono, un sistema de compensación indisoluble entre el pilono, el tablero y los cables.

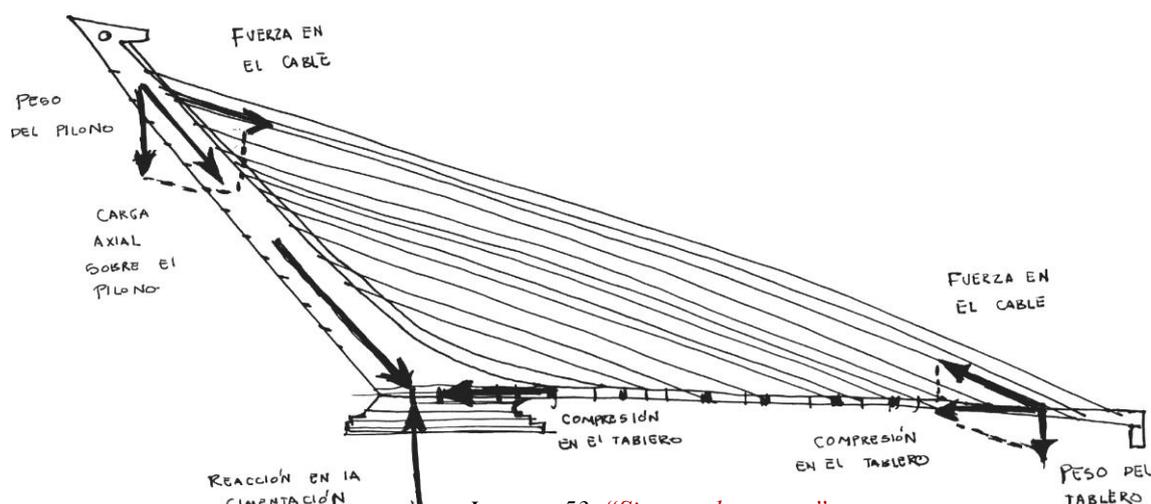


Imagen 53. “Sistema de cargas”

Sección longitudinal general del Puente del Alamillo

Fuente: Propia, tomado de (Pollalis, 2017)

Calatrava asegura que nunca hubiera podido llegar a la configuración del Puente del Alamillo si no fuera por el trabajo previo con sus esculturas. Los ensambles escultóricos del arquitecto reflejan ese carácter de misterio de impulsar las fuerzas al límite del desequilibrio expresado con los masivos cubos a compresión, orientando su masa con un ángulo desviado soportado por elementos esbeltos trabajando fundamentalmente a tracción, aumentando de forma deliberada el desconcierto en el observador (Imagen 54).

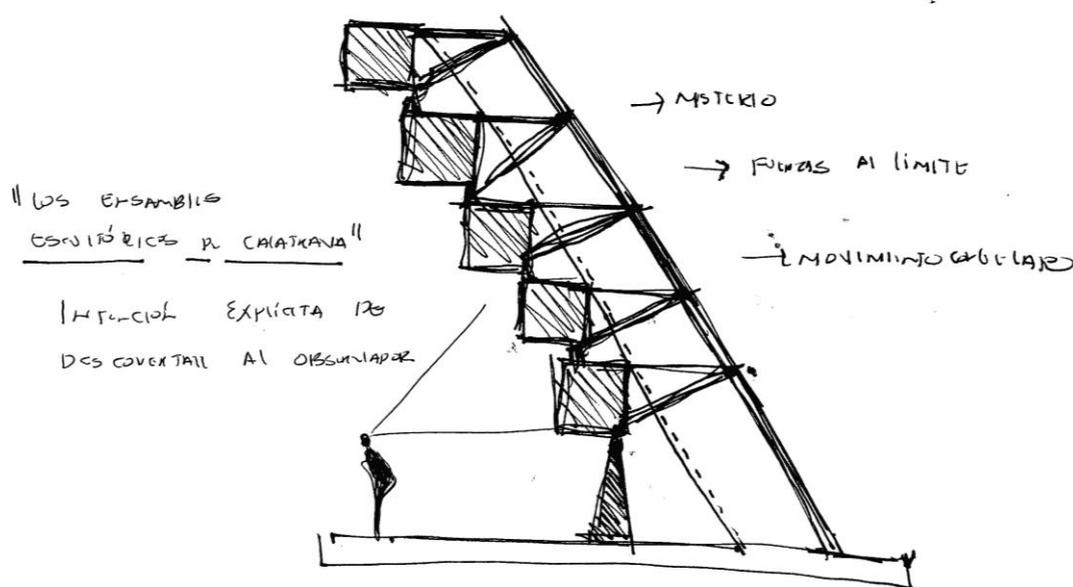


Imagen 54. "los ensambles escultóricos de Calatrava"

Dibujos sobre una de las esculturas de Calatrava, como génesis de la configuración del Puente del Alamillo

Fuente: Propia

Los límites de la estética

Los límites de la estética los marcó la ejecución depurando el aparato formal del puente a su esencia, es interesante indagar en los primeros esquemas desarrollados para el puente que paradójicamente si contemplaba cables de retenida y un pilono un tanto caprichoso con un elemento estilizado en la coronación del propio pilono (imagen 55)

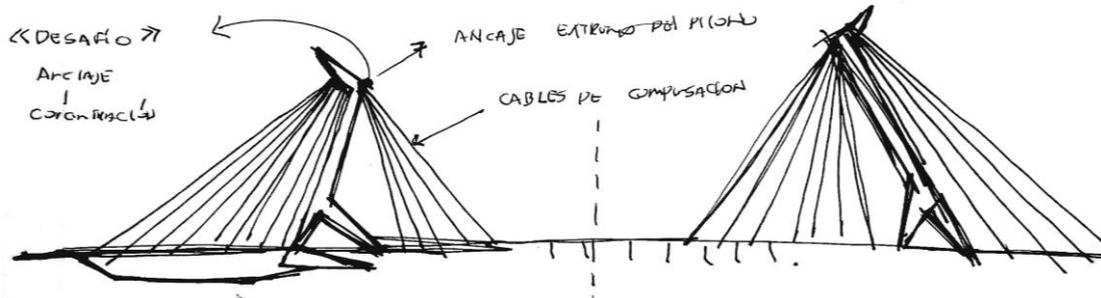


Imagen 55. "simplificando la estructura"

Dibujos sobre ideas primigenias de Calatrava en la lectura del Puente del Alamillo.

Fuente: Propia, tomado de: (Pollalis, 2017)

En un principio el sistema de atirantamiento del puente se diseñó de forma que los cables se anclaban en el extremo superior del pilono e incluía cables de compensación o retenida en otro extremo del pilono. El esquema se recibió con entusiasmo en una primera presentación del proyecto que ambicionaba a construir en un par simétrico dos puentes a propósito de la Exposición Universal de Sevilla de 1992, sin embargo pronto quedó claro que el innovador pilono tendría que modificarse. (Imagen 56).

Compromiso constructivo

El anclaje de los 20 pares de cables en una pequeña zona del extremo del pilono era técnicamente imposible a causa del limitado espacio disponible, la inclinación del extremo superior del pilono también generaba una dificultad geométrica en la conexión con los cables de retenida lo que provocaba excesivos momentos flectores.

Calatrava estudió varios esquemas para el pilono, al final la idea se fue depurando a una concepción de carácter más minimalista en los métodos de sujeción de los cables y también en la resolución de la forma estructural definitiva, el diseño de un pilono sin cables de compensación, fue el resultado de unas fuertes intenciones de diseño que no necesariamente estaban relacionadas con el uso del puente, la intención del creador se centró en la creación de un objeto llamativo para atraer la curiosidad de la Expo 1992 e incluso causar cierta

ansiedad en el espectador que inmediatamente se plantea el interrogante de cómo se estabiliza la estructura del puente llevada a gran escala.

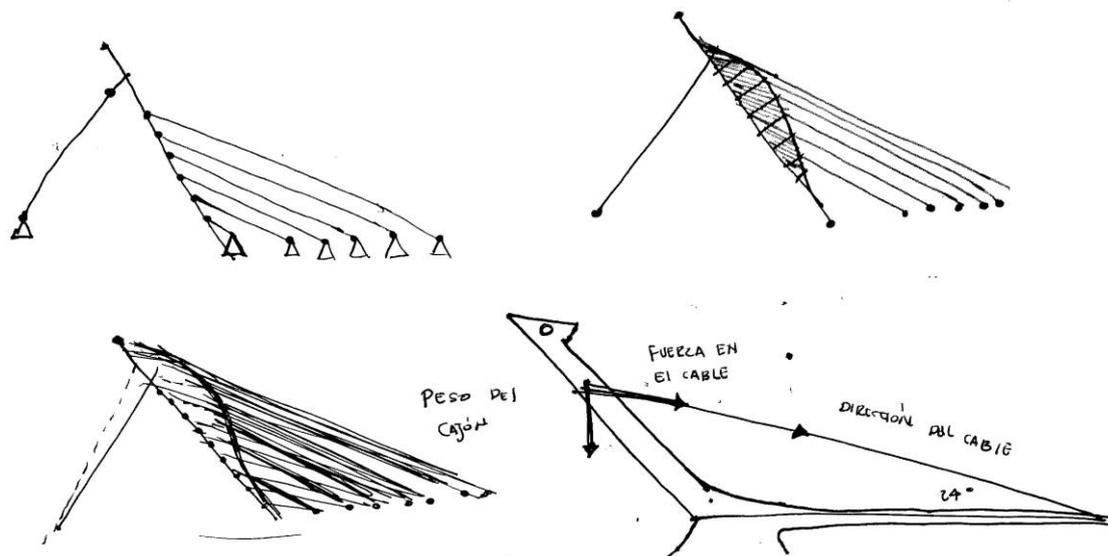


Imagen 56. *“Implicaciones del sistema estático del puente”*

Dibujos sobre la evolución en la configuración del Puente del Alamillo (el pilono y sus esfuerzos.)

Fuente: Propia, tomado de: (Pollalis, 2017)

2.4 Pont de l'Assut de l'Or (Puente de Serrería)

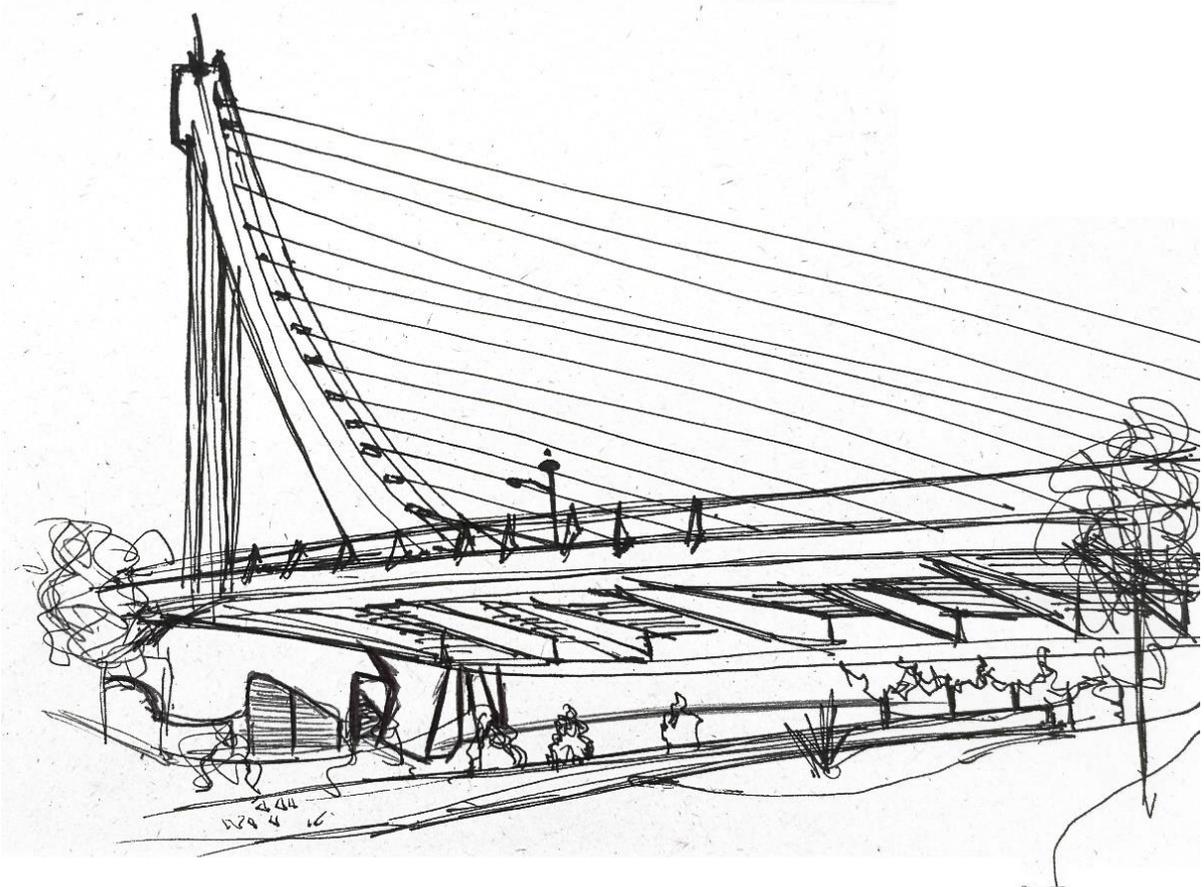


Imagen 57. Puente Azud del Oro (Puente de Serrería)

Dibujo sobre el Puente de Serrería en la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia

Fuente: Propia

“Es una gran obra de ingeniería y es también un alarde técnico por parte de aquellos que han trabajado en la ejecución y estoy muy orgulloso de haber contribuido al panorama de puentes de la ciudad de Valencia”

(Calatrava, 2008)

La dimensión simbólica viene dada por la escala de un puente que sugiere una especie de gran obelisco, que además ostenta ser el punto más alto de la ciudad de Valencia (imágenes 57 y 58)

DATOS GENERALES

Ubicación:

Antiguo cauce del Río Turia, Ciudad de las Artes y las Ciencias, entre el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe y el Ágora.

Año:

2004 a 2008

Cliente:

C.A.C., S.A. Generalitat Valenciana

Autor del proyecto y Director de la Obra:

Santiago Calatrava, S.A.

Dirección Técnica:

Mario Rando, Santiago Calatrava, S.A.

Empresas constructoras:

UTE FCC Construcción S.A. – Pavasal

Estructura metálica:

Fabricación y montaje, HORTA-COSLADA S.A.

Sistema de atirantado y montaje del mismo:

BBR-PTE S.A

Presupuesto:

23'2 € millones contractuales, 11€ millones de sobrecoste para un total de 34'2€ millones.

Uso:

Seis carriles vehiculares (tres por cada sentido de la calzada) una acera peatonal en el centro del puente que bordea el pilono y dos carriles bici en los bordes de la calzada peatonal.



Imagen 58. “El Puente de Serranía”

Atardecer, captación parcial del puente desde el estribo sur

Fuente: Propia

Antes de adoptar su nombre definitivo, se le llamó de diferentes formas, oficialmente en la página web de Calatrava aún se reconoce como el Puente de Serrería, en referencia a la conexión expedita que establece el puente entre la ronda sur con el bulevar de Serrería, en la plataforma de Google Maps se le denomina Puente del Grao, también se intentó poner el nombre del “puente de Fórmula 1”, motivado por su inauguración parcial durante la celebración de los campeonatos de la Fórmula 1, que dicho sea de paso, la apresurada pre-inauguración del puente motivó un mes más tarde, la ruptura de varias barras de anclaje por un fallo de montaje como se hace constancia en un artículo del diario El País:

El paso sobre el cauce se abrió provisionalmente el pasado agosto para el campeonato de Fórmula 1. Posteriormente, un fallo del montaje causó la rotura de unas piezas sin causar daños personales. Cerca de 40 camiones de gran tonelaje participaron el pasado agosto en la prueba de carga del puente, determinante para evaluar su seguridad. El resultado, positivo, permitió su apertura durante la Fórmula 1 con la infraestructura por terminar. Poco después, a mediados de septiembre, la obra sufrió la rotura de varias barras de anclaje de las fundas que cubren los cables de acero del arco atirantado, según admitió en noviembre pasado el consejero de Economía, Gerardo Camps, al diputado socialista José Camarasa. El parlamentario censuró la "precipitación" a la hora de abrir la pasarela en agosto "sin comprobar exhaustivamente todos los elementos", mientras que el estudio del arquitecto rechazó cualquier peligro para la solidez del puente.

(Velert, 2008)

Su nombre definitivo, Puente Azud del Oro corresponde al reconocimiento de una antigua acequia que reclamaba mayor presencia antes del desvío del antiguo cauce del Turia, cabe resaltar que éste último nombre fue motivado por un vecino de la zona que lo propuso al Ayuntamiento y se le dio el visto bueno. Hoy por hoy es reconocido popularmente como “El Jamonero” porque la forma de su estilizado pilono curvado y el impacto de la verticalidad de la retenida recuerdan especialmente el soporte del jamón, haciendo inevitable la comparación, o también como “el arpa” por los tensores inclinados paralelos que vinculan el pilono y tablero en el centro del mismo. En fin, la forma del

puede, hace que esté ligado a una serie de asociaciones perfectamente válidas y hasta incluso divertidas, evidencian su carácter simbólico. Personalmente cuando me refiera al puente para efectos del análisis me encuentro más cómodo con el nombre de Puente de Serrería.

El puente toma su nombre de la infraestructura que antaño permitía elevar el nivel del agua y canalizar las acequias para el riego de la huerta y que se llamaba Azud de Oro. El presidente de la Generalitat, Francisco Camps, calificó la infraestructura como una "excepcional obra de ingeniería y arquitectura" dentro de un proyecto, el de la Ciudad de las Artes y las Ciencias, "que año tras año va ganando fuerza y referencia en todo el mundo".

(Lledó, 2008)



Imagen 59. **Situación Urbanística del Puente de Serrería**

Fuente: Propia (edición tomada de Google Maps)

Situación Urbanística

El puente de Serrería se erige de manera potente como una especie de espina dorsal que escolta a Valencia, es rompedor, desvirtúa la horizontalidad del complejo de la Ciudad de las Artes y las Ciencias y moviliza cerca de 70.000 vehículos diariamente, el puente se instala en un contexto estratégico en el casco urbano de Valencia (imagen 59), su calzada establece la conexión del bulevar sur que conecta la calle Actor Antonio Ferrándiz y la rotonda de El Saler con la avenida de Serrería. “El dialogo visual entre el espectador y el puente” es un recorrido de asombro el punto de mayor vértigo se percibe desde la aproximación en el estribo sur, justamente donde se ubican los cables de la retenida, en la rotonda de cara al centro comercial El Saler, porque en este preciso punto se acentúa la verticalidad del puente (imagen 58) en contraste con el otro costado (norte) en las proximidades del Corte Inglés, donde la altura del puente se encuentra suavizada por la curvatura del pilono.

Su emplazamiento discurre entre las formas aparentemente extraídas del mundo natural, un gran esqueleto óseo de un lado (el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe) y esta especie de molusco en el otro margen del puente (el Ágora). Expresando como es la norma en Calatrava una arquitectura sólo de huesos, sin músculos y sin piel, de blanco imperante.

Voluntad escultórica en la pieza.

La imaginación escultórica de Calatrava se expresa en el puente de manera abrumadora que deslumbra y es fiel testigo de la impronta que deja el proyectista en su ciudad natal con su proyecto más colosal. El puente constituye el cierre del complejo de ocio y cultura más ambicioso de Europa, su estilizado pilono destaca sobremanera en el conjunto arquitectónico con el sello de unidad formal “Calatraveño”.

Quizá esa voluntad escultórica va más allá de lo explícitamente solicitado en las cuestiones funcionales esenciales de un puente que no es otra cosa que salvar un camino, pero aquí el puente es un lugar y es una referencia urbana, así pues también es arte y el arte comunica, el Vocabulario Calatrava se expresa particularmente en éste tipo de infraestructuras con mayor vehemencia, sus puentes que se cuentan por decenas en todo el mundo.

El puente es visible desde distinto ángulos, nunca lo pierdo de vista, es posible apreciar su verticalidad desde las playas de Pinedo, así pues su estilizado pilono se constituye en sí mismo como elemento guía y orientador urbano. Valencia es una ciudad afortunada, un accidente geográfico ha permitido la convivencia cívica volcada al eje estructurante de la ciudad, su “pulmón verde” los puentes en Valencia cobran la importancia de los puentes en Venecia, a diferencia de no ser un eje navegable, cohabitan actividades al interior del Turia y los puentes de la ciudad continúan estableciendo lazos comunicantes como especie de nervios, el de Serrería orgulloso alcanzando los 125 metros de altura el nuevo techo de la ciudad, se exhibe flamante, superando al hotel Hilton con sus 117 metros y La Torre de Francia con sus 115 y metros de altura.

Este puente, además de ser el punto más alto de la ciudad, permite cerrar el sistema de rondas por el sur y evitar que una gran cantidad de vehículos tenga que atravesar la ciudad diariamente para salir hacia la zona norte. Del mismo es una obra, sin duda, muy pertinente para los vecinos de Nazaret que se sienten aislados del resto de la ciudad y sin conexión directa. Una reivindicación de la intención del complejo de la Ciudad de las Artes y las Ciencias en conjunto por revitalizar las zonas urbanas deprimidas. He hecho énfasis en la posibilidad urbana que permite en este caso la convivencia sobre el tablero del puente haciendo expedita la interconexión vial de ambos costados del río, pero también debajo del “vientre del puente” coexiste la vida urbana y cívica, con la proeza de un solo vano despejado, un vientre de 72 costillas en suspenso sustentadas en voladizo, (imagen 60) nervio central del tablero hoy colonizadas varias de sus alas por algunas palomas rezagadas en el costado norte.

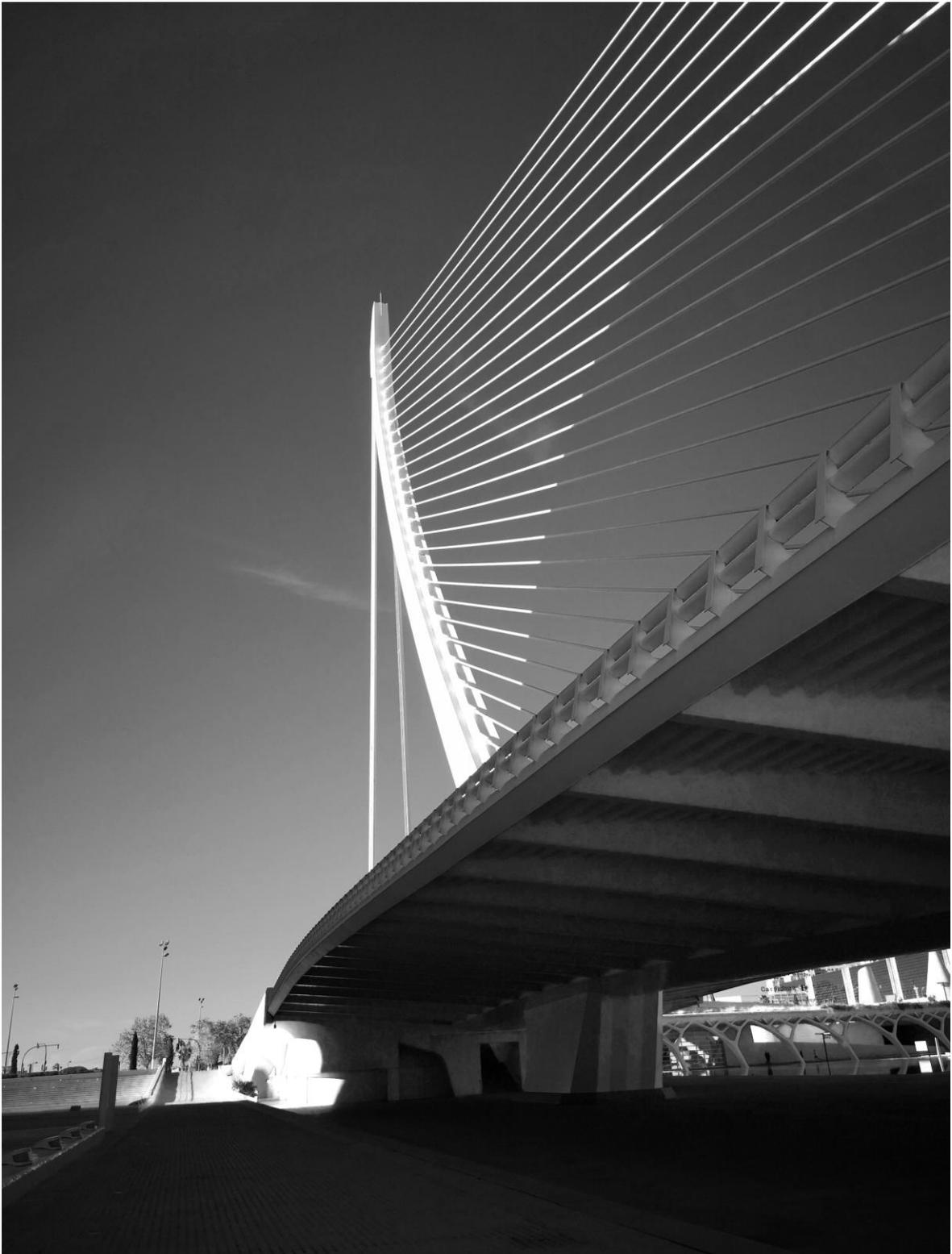


Imagen 60. El tablero... "El vientre del puente"

Captación parcial del puente desde el estribo norte,

Destacan las ménsulas en voladizo que superan los 14 metros de longitud escoltadas por el pilono

Fuente: Propia

2.5 Análisis de diseño del Puente.

2.5.1 Conceptualización

La expresión del Puente de Serrería fundamentalmente es la composición de una plataforma suspendida de un mástil o pilono de trayectoria curva inclinada, así pues la conceptualización sugiere que responde a la disposición de puente atirantado de un solo vano, que se constituye en un alarde de diseño que singulariza la concepción del puente en sí mismo, en primer lugar, la morfología del pilono que sustenta dicha plataforma con el empleo de unos tirantes desde un único eje central, exponiendo la plataforma o tablero con dos alas en voladizo en par simétrico y con la imposición de unos “contra-tensores” en vertical trabajando a tracción para cerrar el esquema de fuerzas y garantizar la estabilidad de la estructura (imagen 61).

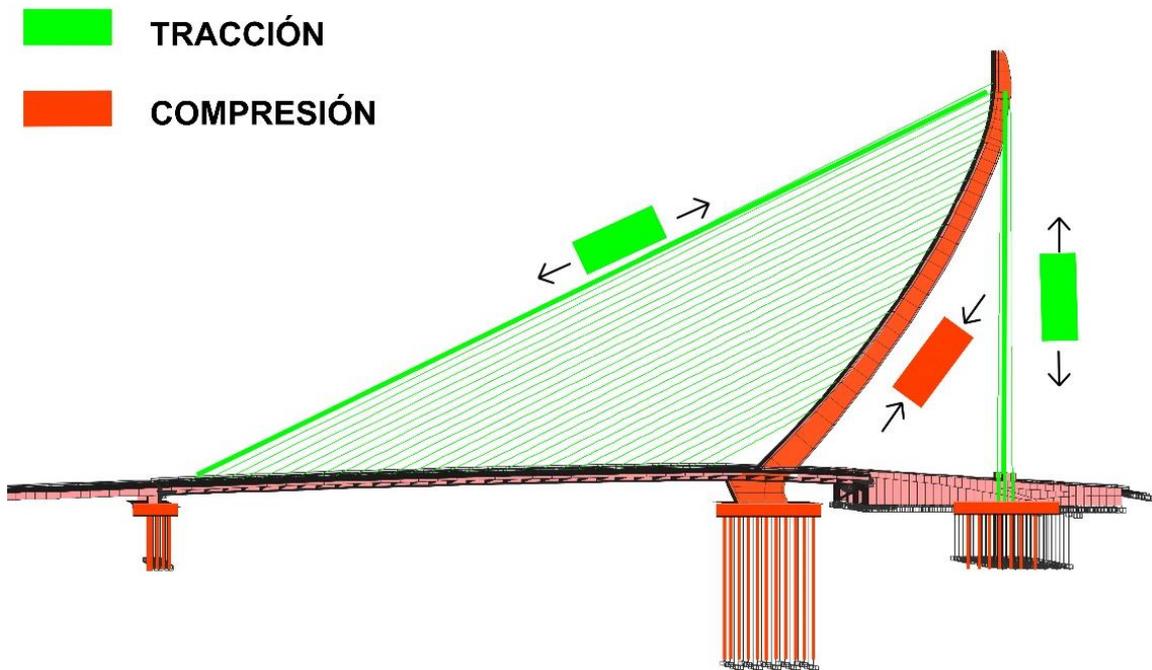


Imagen 61. Esquema de fuerzas implícitas en el puente

Construcción del modelo de elementos finitos, (visualización SAP 2000)

Fuente: Propia

El pilono es similar a una forma de curva en espiral, por ello me pareció interesante intentar inscribir la geometría del perfil del puente en la gráfica clásica de la proporción aurea e identificar si se establecen sinergias vinculantes a la problemática de proporcionalidad y simetría (imagen 62) dado que las implicaciones de carácter estético y estructural son capitales.

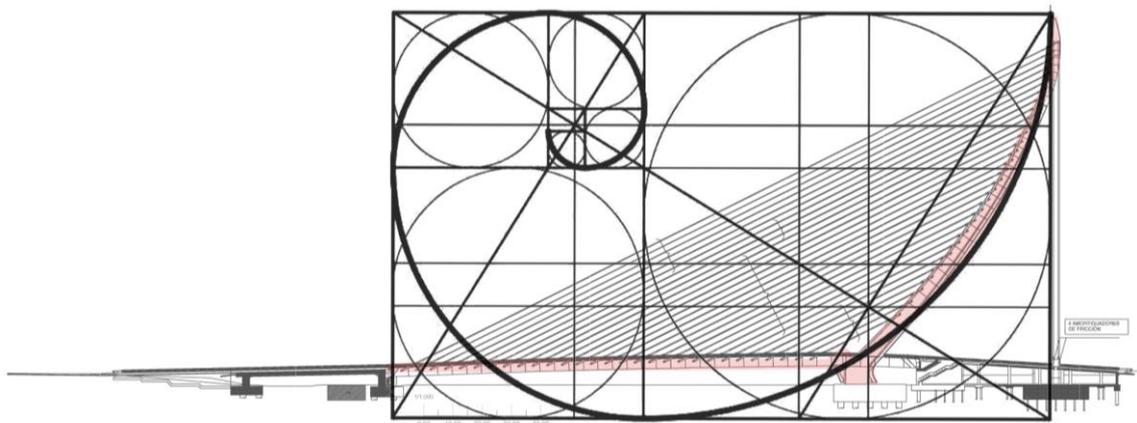


Imagen 62. **Circunscribir el Puente en la Proporción Aurea**

Fuente: Propia

Puede llegar a apreciarse que en el desarrollo de la curvatura que configura el pilono coincidir con la línea reguladora en espiral de La Proporción Aurea, el encuadre permite circunscribir el tablero desde las aristas del estribo norte hasta el extremo sur coronando el pilono.

Calatrava afirma que el efecto estético del pilono proviene directamente de la lógica interna de la estructura, es lo que yo intentaré corroborar y ratificar o por el contrario rebatir y rectificar dicha afirmación en la tercera y última fase de este trabajo de investigación que Yo he denominado: “Resistencia y Estática del Vocabulario al Lenguaje” que es la puesta en escena a modo experimental y de laboratorio donde la obra en sí misma es la que habla y nos dice lo que le pasa, las fatigas que experimenta, las solicitaciones que acomete, los axiles que intervienen. Por otra parte será interesante apreciar las deformaciones al clausurar los cables de retenida y exonerar al puente del contra-atirantado para obtener una solución más limpia y elemental.

“La curvatura expresa las fuerzas estáticas de la estructura, determinadas por un análisis del esfuerzo mínimo de flexión. El ángulo del pylon se determinó mediante un análisis de las fuerzas contrarias contra los tirantes de cable. El efecto estético del pylon proviene directamente de la lógica interna de la estructura”.

(Calatrava S. , Puente de la Serrería, Valencia, 2005)

2.5.2 Los componentes del Puente

El puente atirantado, de un solo vano está compuesto de los siguientes elementos:

Tablero metálico de chapa ortótropa de 160 metros de luz cuyo ancho varía entre 35,5 y 39,2 metros, éste último en su intersección con el pilono.

Torre-Pilono metálico, de 125 metros de altura, inclinado, de directriz curva y sección metálica (imagen 63)

Cables de atirantamiento central del tablero. (El número de tirantes es 29)

Tirantes de retenida, que en número de 4, atirantan el extremo del pilono al hormigón de un contrapeso que se integra en uno de los vanos de acceso.

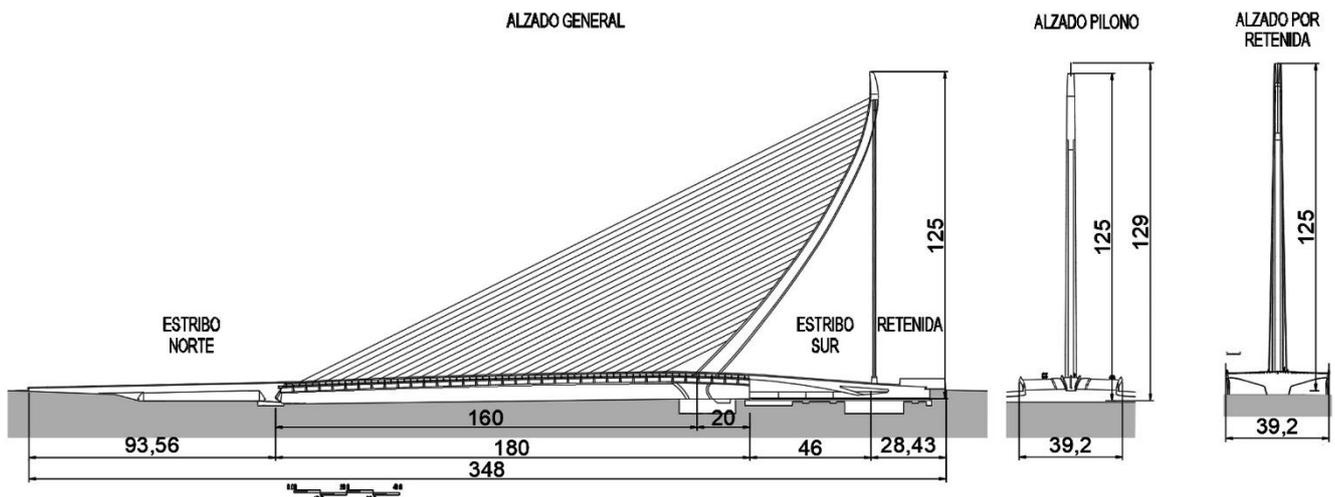


Imagen 63. Alzados generales Puente de Serrería

Fuente: Ayuntamiento de Valencia /Archivo Histórico

Hago la siguiente salvedad, La descripción técnica y dimensionado de los componentes del puente, proceden de la bibliografía aportada por el informe estructural de fabricación y montaje Puente Azud del Oro de Luis Viñuela y José Martínez Salcedo, información valiosa, con la cual sea podido dimensionar el modelo que he construido del puente para el correspondiente análisis.

2.5.3 Esquema Estructural del puente

Para comprender el esquema funcional que estructura el puente morfológicamente, el esfuerzo unificado entre tablero y pilono es fundamental, así como lo es la articulación de los dos extremos del tablero Norte y sur respectivamente. El conjunto tablero-pilono está empotrado entre sí, uniéndose a su vez con la base que es una gran pieza metálica que a modo de pila se empotra en la cimentación (imagen 64).

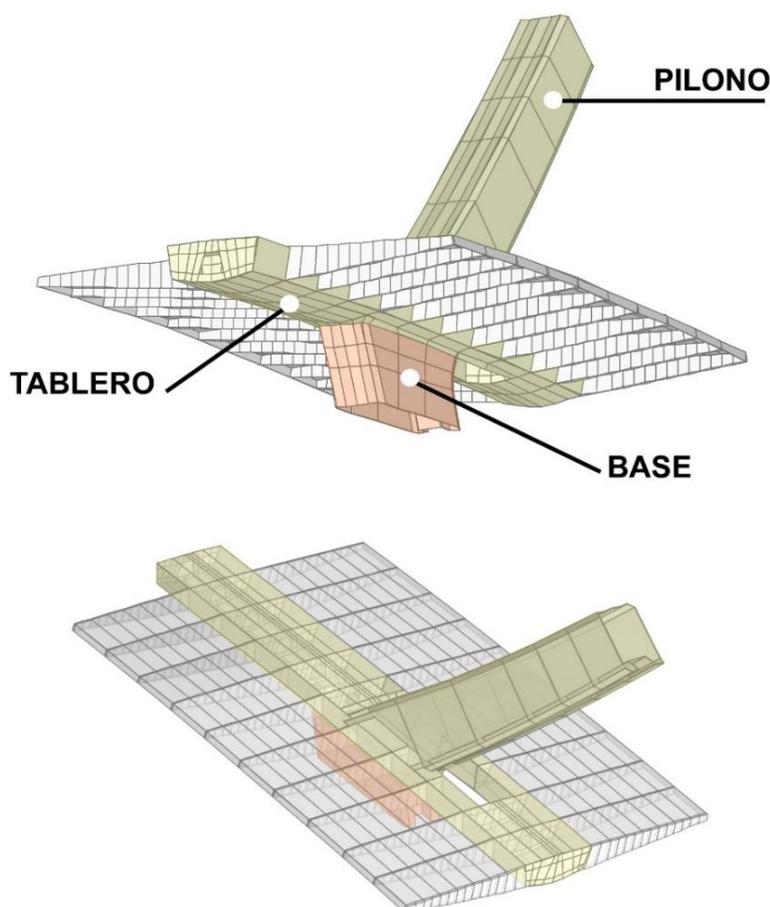


Imagen 64. *Desarrollo tablero-pilono*

Modelado 3d de elementos finitos del puente, Auto CAD, visualización SAP 2000

Fuente: Propia

Conexión en el estribo Norte:

El tablero está apoyado en y atirantado en el estribo Norte, opuesto al pilono, con dos barras articuladas tipo biela (imagen 65), no se colocan apoyos que tomen las reacciones positivas, sino que se utilizan esas barras que trabajan a tracción o a compresión, y que con cuatro metros de altura permiten los grandes movimientos horizontales del tablero respecto al estribo. De esta forma se evita la complicación de colocar apoyos convencionales y a la vez atirantar, dado que cuando además los movimientos son importantes, no es fácil esa solución. Estas dos barras articuladas descansan en una pantalla de hormigón y en síntesis son un par de cojinetes que brindan resistencia a la torsión.



Imagen 65. Apoyo Articulado del tablero en el estribo Norte

Fuente: Propia

Conexión en el estribo Sur:

El segundo apoyo del tablero es la base del pilono, donde la espina dorsal del tablero se conecta con la gran pieza metálica que conforma la base creando una conexión totalmente fija con el pilono.

Conexión en el estribo más al Sur:

El tablero continúa más allá de su intersección con el pilono, 20 metros hacia el estribo más cercano, estribo Sur, abriéndose en dos cajones independientes para salvar el ancho del pilono, esta pequeña parte del puente es irrelevante a efectos estructurales, sus apoyos en este estribo, sólo recogen reacciones positivas; se ajusta la reacción en montaje para que así sea.

El Pilono inclinado de trayectoria curva, correspondiente al funicular de cargas que le transmiten los cables de atirantamiento y los de retenida, en el estado de carga permanente. De esta forma, el pilono, bajo estas cargas tiene un trabajo prácticamente de compresión con momentos muy pequeños, aunque bajo las sobrecargas aparecerán momentos que se superponen a los axiles. Al tener el atirantamiento de retenida tanta longitud, y a causa del alargamiento por axil del mismo, éste no ejerce una función de apoyo rígido del extremo del pilono de ahí la composición de su sección que más adelante se describirá, en la que se busca aumentar el área de la misma, para reducir ese alargamiento.

(Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

2.5.4 Descripción de cada una de las partes del puente

Cimentaciones.

La cimentación del pilono:

Consiste en 20 pilotes de 2 metros de diámetro, la longitud de los pilotes es de 43 metros y se empotran 6 metros en unas gravas muy compactas que aparecen en profundidad, atravesando unos espesores potentes de arcillas y gravas medianamente compactas. En coronación de los pilotes se sitúa un encepado de 19x25 metros de superficie y canto variable (imagen66), llegando a ser de 6 metros en las secciones intermedias. A pesar del canto del encepado, debido a los vuelos existentes en la cimentación, se postesó el encepado con 20 tendones de 42Ø0.6”.

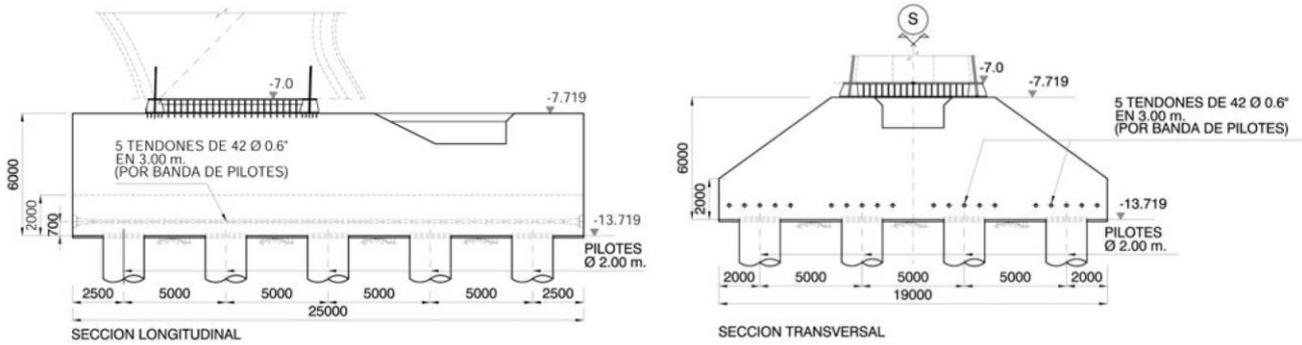


Imagen 66. **Cimentación del Pilono**

Detalle del encepado sustentado por los 20 pilotes que conforma la cimentación del pilono, destaca el arranque de la poderosa base que unifica la espina dorsal del tablero con el pilono.

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

El contrapeso de retenida del puente:

Está integrado en el estribo hueco de acceso sur (imagen 67). La estructura de éste estribo está formada por un entramado de pilares de 1.60 metros de diámetro dispuestos en una retícula de 9 m x 10.40 m, continuación del tablero del puente, que soportan una losa armada de 0,50 metros de canto. Los cuatro cables de retenida se anclan a esta estructura mediante un sistema de pretensado formado por 10 tendones de 31Ø0.6" dispuestos en bucle con un radio de 2 metros.

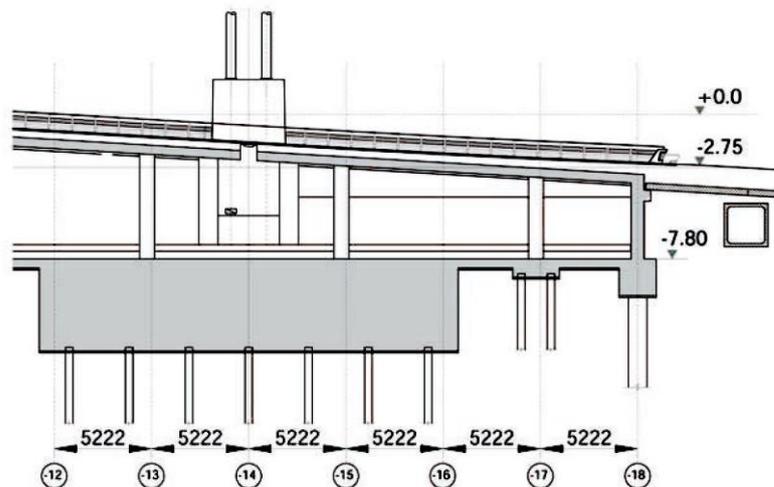


Imagen 67. **Contrapeso de Retenida**

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Para equilibrar el tiro de los cables de retenida se aumentó el canto de la losa de cimentación del estribo bajo su anclaje, generando un contrapeso de hormigón de 40 m x 22.5 m x 5 m. El conjunto del estribo descansa sobre un estrato de arcillas muy blandas, susceptibles de importantes asientos de consolidación que haría colgar el contrapeso del pilono. Para evitarlo, esa losa de contrapeso se apoya sobre 84 pilotes prefabricados de hormigón, de 0.40 m x 0.40 m de sección dispuestos en una retícula de 3.25 m x 3.25 m y empotrados en un estrato de gravas densas a unos 15 metros de profundidad (imagen 68).

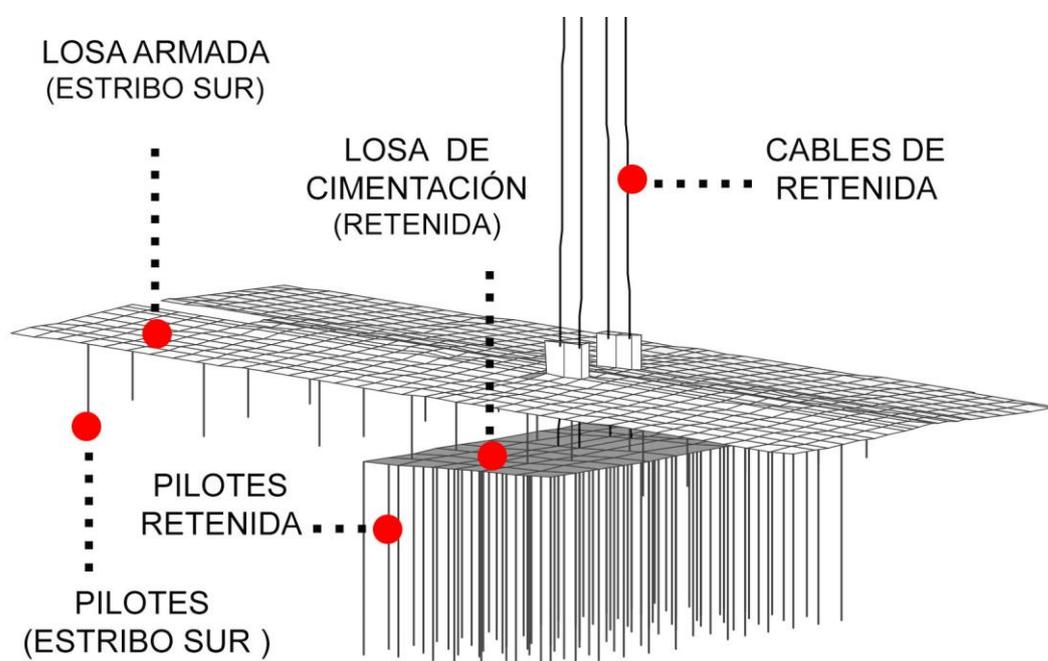


Imagen 68. Estribo Sur: Cimentación de la Retenida

Modelado 3d de elementos finitos del puente, Auto CAD, visualización SAP 2000

Fuente: Propia

El Tablero del Puente.

El tablero salva una luz de 160 metros, si se considera la distancia desde el apoyo en el estribo más alejado de la pila, al eje de la misma, aunque por la gran dimensión de la pila, tiene 150 metros desde el borde de la misma hasta el apoyo en el estribo norte. La longitud total del tablero es de 180 metros.

El cajón central:

La sección del tablero, desde pila al estribo Norte puesto, está formada por un cajón unicelular trapecial de canto constante y unas ménsulas a ambos lados, todos ellos metálicos.

El ala inferior del cajón es curva en su zona central y recta en los laterales y tiene un espesor de 30 mm (milímetros) en la mayor parte del desarrollo del tablero, en la zona próxima a su intersección con el pilono el espesor llega hasta los 50 milímetros. El ala inferior está rigidizada por perfiles en “T” armados, con separación del orden de 1.200 mm, que pasan a través de los diafragmas. Las almas tienen un espesor habitual de 22 mm, aunque alcanzan los 30 mm en zonas de estribo y encuentro con el pilono. También llevan rigidización en “T” que atraviesan los diafragmas del cajón (imagen 69).

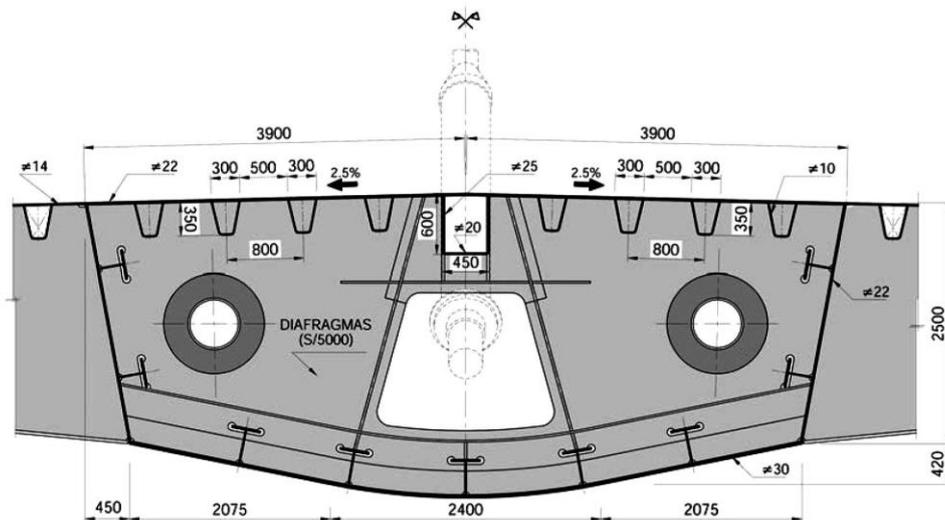


Imagen 69. Sección tipo del cajón central unicelular

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

El ala superior del cajón, forma parte del tablero ortótropo, aunque con mayor espesor de chapa por su trabajo como ala superior del cajón y por estar sometida a los esfuerzos concentrados de los tirantes. Su espesor habitual es de 22 mm, esta ala está rigidizada por bulbos de chapa plegada de canto 350 mm y espesor de 10 mm separados a distancias variables por el cambio de ancho de ala. Sobre el ala superior con un recrecido de hormigón, se sitúa el paso peatonal; por ello esta zona del cajón no experimenta problemas de fatiga en su chapa ortótropa.

Este aspecto y sobretodo las fuertes cargas concentradas que introducen los cables en los diafragmas, llevó a diseñar los bulbos de esta zona no continuos sino interrumpidos en los diafragmas para que estos no tuviesen aligeramientos, soldados a tope contra la chapa de diafragma inspeccionando las soldaduras bulbos-diafragmas al 100% para evitar fisuras en la soldadura.

En esta misma ala superior, en su zona central, se sitúa un pequeño cajón de 600x450 mm, que es el que recibe, a través de un tubo donde se ancla el tirante, la carga concentrada de los tirantes (imagen 70).

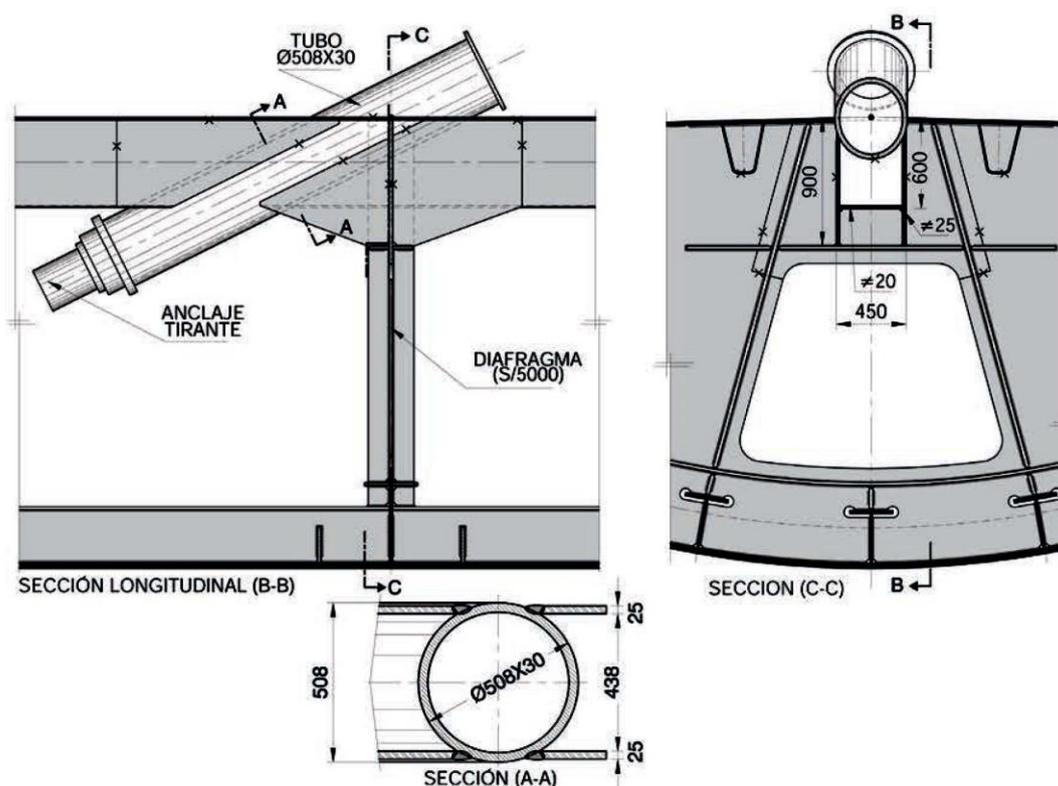


Imagen 70. Anclaje de tirantes en el cajón central

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Los diafragmas

Los diafragmas (imagen 71) se sitúan cada 5 metros que es la separación de los tirantes. Están situados en la vertical del punto de intersección del eje del tirante con el ala superior del cajón. Es una chapa de 20 mm, con un paso central para inspección y tesado y dos pasos circulares para instalaciones.

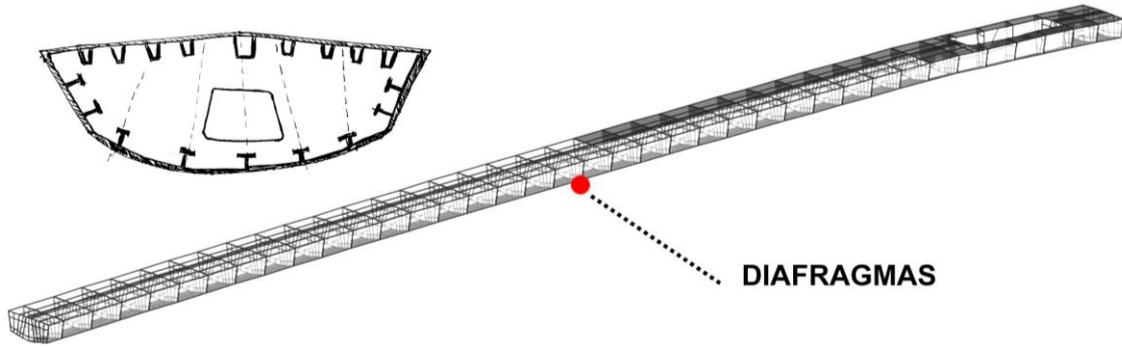


Imagen 71. Diafragmas en la extensión del cajón central

Modelado 3d de elementos finitos del puente, Auto CAD, visualización SAP 2000

Fuente: Propia

Las ménsulas:

De ambos lados del cajón central, salen unas grandes ménsulas de longitud de voladizo constante de 14.20 metros, tienen un canto, en su unión con el cajón central de 2.5 metros que va variando hasta los 0.70 metros en el extremo de la ménsula (imagen 72), con un alma de espesor de 15 mm en la zona más exterior y 20 mm en la cercana al cajón, su ala inferior de espesor 30 mm tiene un ancho variable de 400 a 800 mm; el ala superior es la chapa ortótropa y dado que esta zona soportará el tráfico, se cuidaron al máximo los detalles que minimicen los riesgos de futuras fisuras de fatiga.

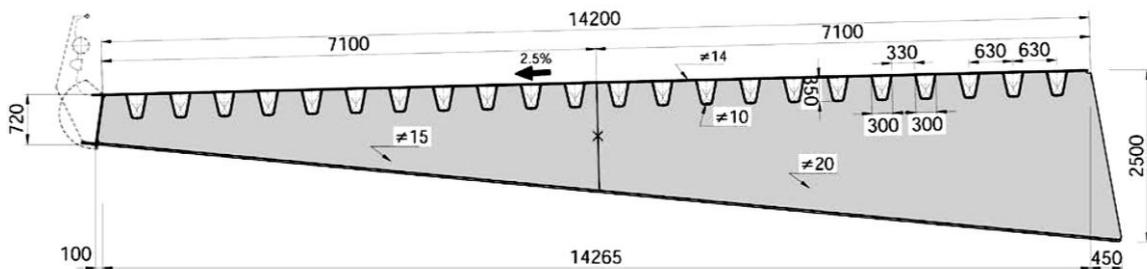


Imagen 72. Alzado de ménsula lateral

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)



Imagen 73. *Las ménsulas*

Captación de las ménsulas desde un costado del puente, se enfatiza la presencia de los bulbos de chapa plegada que colaboran también con la rigidez de las ménsulas perpendicularmente.

Fuente: Propia

La chapa de piso:

La chapa de piso tiene un espesor de 14 mm, y los bulbos trapeciales que la rigidizan, formados con chapa de espesor de 10 mm (imagen 73) el pavimento que se extiende sobre la chapa de piso tiene un espesor considerado entre 40 y 60 mm.

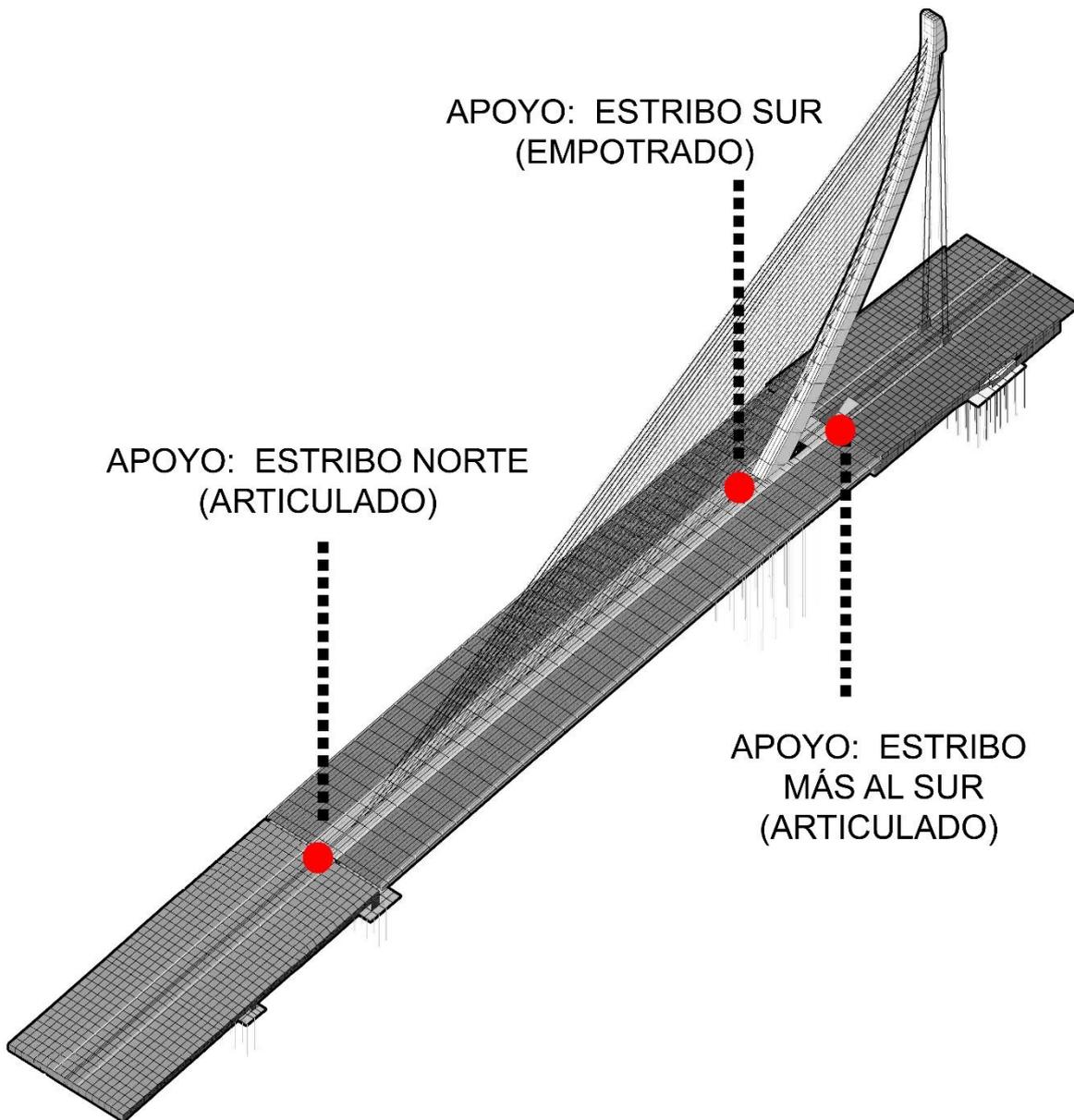


Imagen 74. **Articulación del Tablero**

Modelado 3d de elementos finitos del puente, Auto CAD, visualización SAP 2000

Fuente: Propia

Una vez clasificados cada uno de los componentes que conforman el tablero: cajón central, diafragmas, ménsulas, bulbos, perfiles en “T” y la chapa de piso, y definidos los tres puntos de apoyo del mismo tablero: los dos extremos articulados y la sólida unión al pylon (imagen 74).

El Pilono

Está formado por una sección cajón metálica poligonal, de directriz curva y de canto y ancho variable (imagen 75), está fuertemente inclinado, comenzando con un ángulo de 40° en su intersección con el tablero y llegando vertical en su coronación, donde le atacan los cables de la retenida. A medida que sube en altura van disminuyendo las dimensiones de la sección. La directriz del pilono se adapta al anti-funicular de las cargas de los tirantes y los cables de retenida en su coronación, de forma que ante las cargas permanentes, todo el pilono está trabajando fundamentalmente a compresión, con momentos muy reducidos.

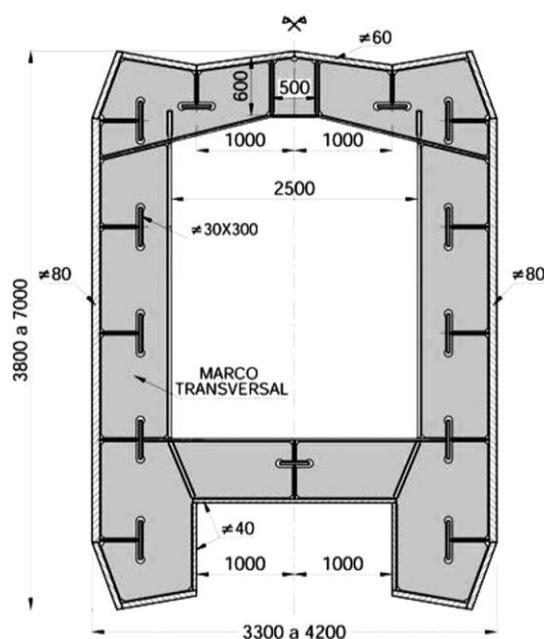


Imagen 75. Sección tipo del pilono

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Los espesores de sus chapas varían entre 40 y 80 mm y la calidad del acero es S460 N, para espesores inferiores a 60 mm y S460 NL para espesores superiores. El pilono al igual que el cajón central del tablero, también cuenta con rigidizadores longitudinales en "T" a base de chapas armadas, en realidad su misión principal es aportar área a la sección, y no tanto por el hecho de evitar las abolladuras de las chapas exteriores que conforman el pilono porque éstas

últimas tienen espesores muy fuertes o recoger las tensiones de la curvatura. Las soldaduras longitudinales de la sección, que tienen numerosos quiebros, son de penetración parcial, ya que estructuralmente no es necesaria la penetración completa, optimizando los recursos con la notable disminución de soldadura.

Rigidización del Pilono:

Debido a la curvatura de sus alas (chapas por donde ingresan los cables) es necesario una fuerte Rigidización transversal que recoja las cargas de desvío de las tensiones longitudinales (imagen76).

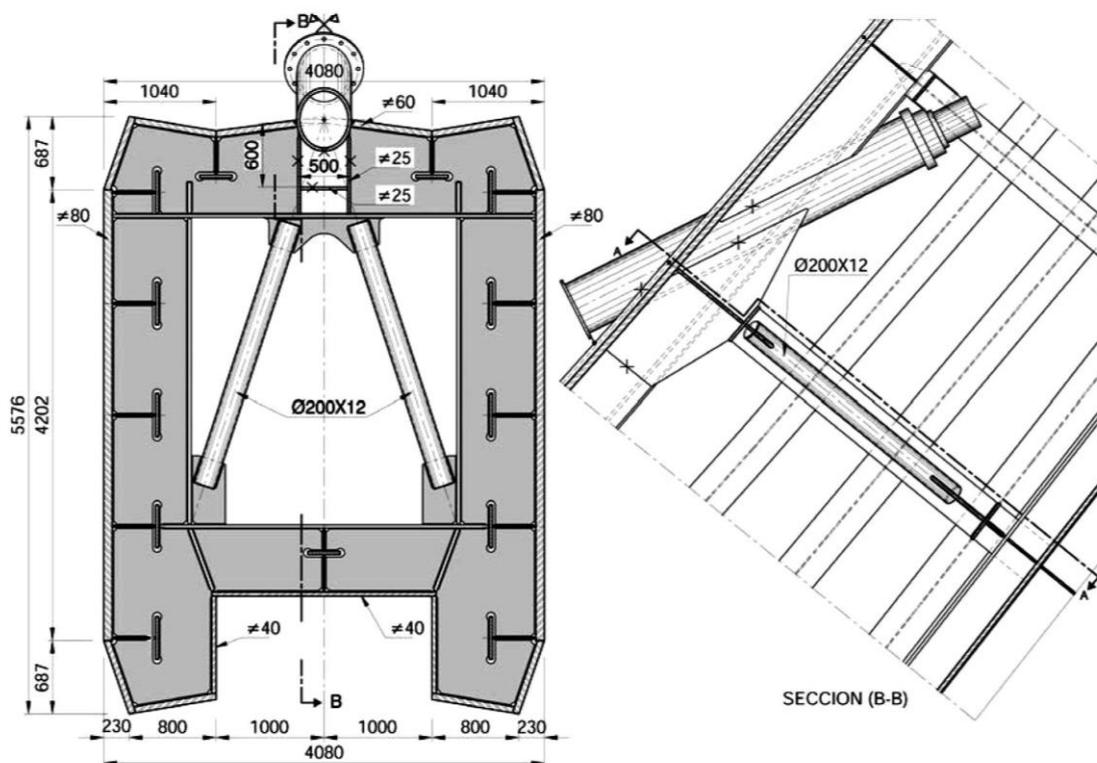


Imagen 76. Anclaje de tirante en pilono

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Debido a que los cables son paralelos entre sí y el pilono es de directriz curva inclinada, la transmisión de la tensión de los cables al pilono se efectúa con un tubo metálico Ø200x12, que recoge toda la tracción del tirante (imagen 77) y transmite su componente perpendicular a la directriz del pilono, al marco transversal y su componente según la directriz, a un pequeño cajón de chapa armada, soldado al alma del pilono.

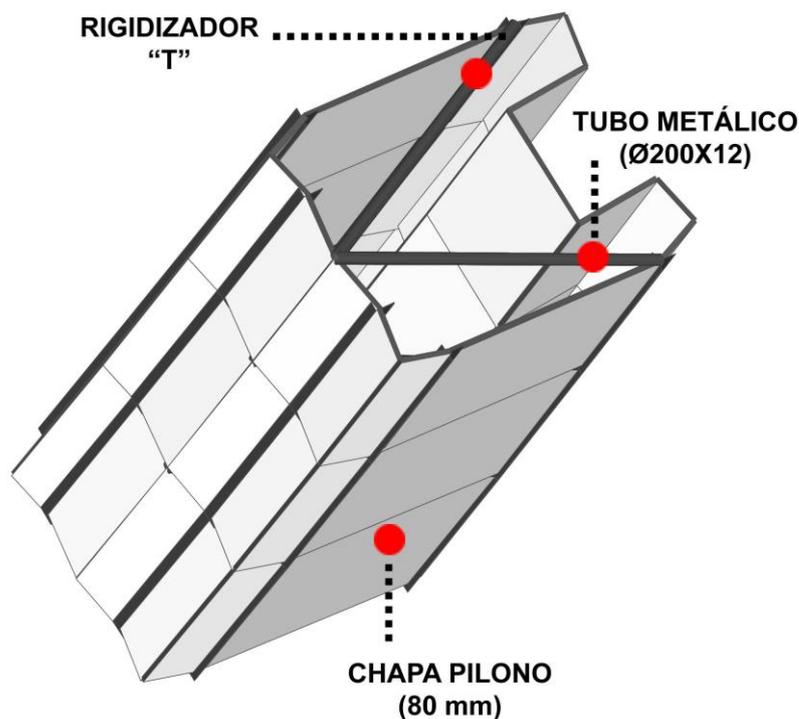


Imagen 77. Rigidización del pylon

Modelado 3d de elementos finitos del puente, Auto CAD, visualización SAP 2000

Fuente: Propia

En el extremo superior del pylon se anclan los cables de la retenida, éste detalle no queda visto porque se sitúan unas chapas en coronación de carácter arquitectónico. Para el cálculo en segundo orden del pylon, se consideraron las imperfecciones fuera del plano de los tirantes y en el plano de los tirantes. En el plano de los tirantes se consideraron los dos primeros modos de pandeo, al ser de sección variable y curva su directriz, si se considerase solo un modo de pandeo, existirían secciones en las que no se amplificarían los momentos. En el caso del pylon al tener con las cargas permanentes momentos muy pequeños en un cálculo en primer orden, es importante la influencia de las imperfecciones en segundo orden que produciría flexiones procedentes del axil y considerar las tensiones de esas flexiones.

(Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

La base del pylon

Es la gran pieza metálica que integrada con el nudo tablero-pylon (imagen 78) lleva los esfuerzos a la cimentación. La dificultad de esta pieza proviene de las

secciones con formas complejas, que acometen a ella: el cajón del tablero con su ala inferior curva y el pilono con sección muy poligonal. Las chapas que lo forman tienen un espesor entre 60 y 80 mm, rigidizadas, en calidad 460 NL.

El peso total de los tres elementos metálicos descritos, tablero pilono y base (imagen 79) es de 5600 toneladas (ton) aproximadamente.

(Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

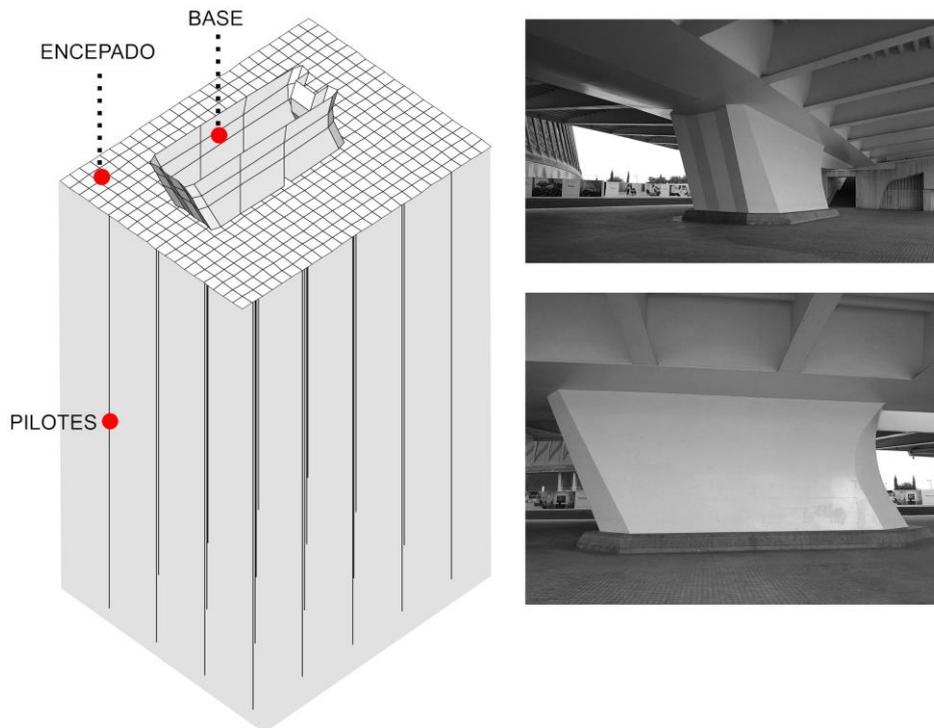


Imagen 78. La “estilizada base del pilono”

(Izquierda) Modelado 3d de elementos finitos del puente, Auto CAD, visualización SAP 2000

(Derecha) captaciones: de perfil y en perspectiva, de la moldeada base que sustenta el pilono

Fuente: Propia

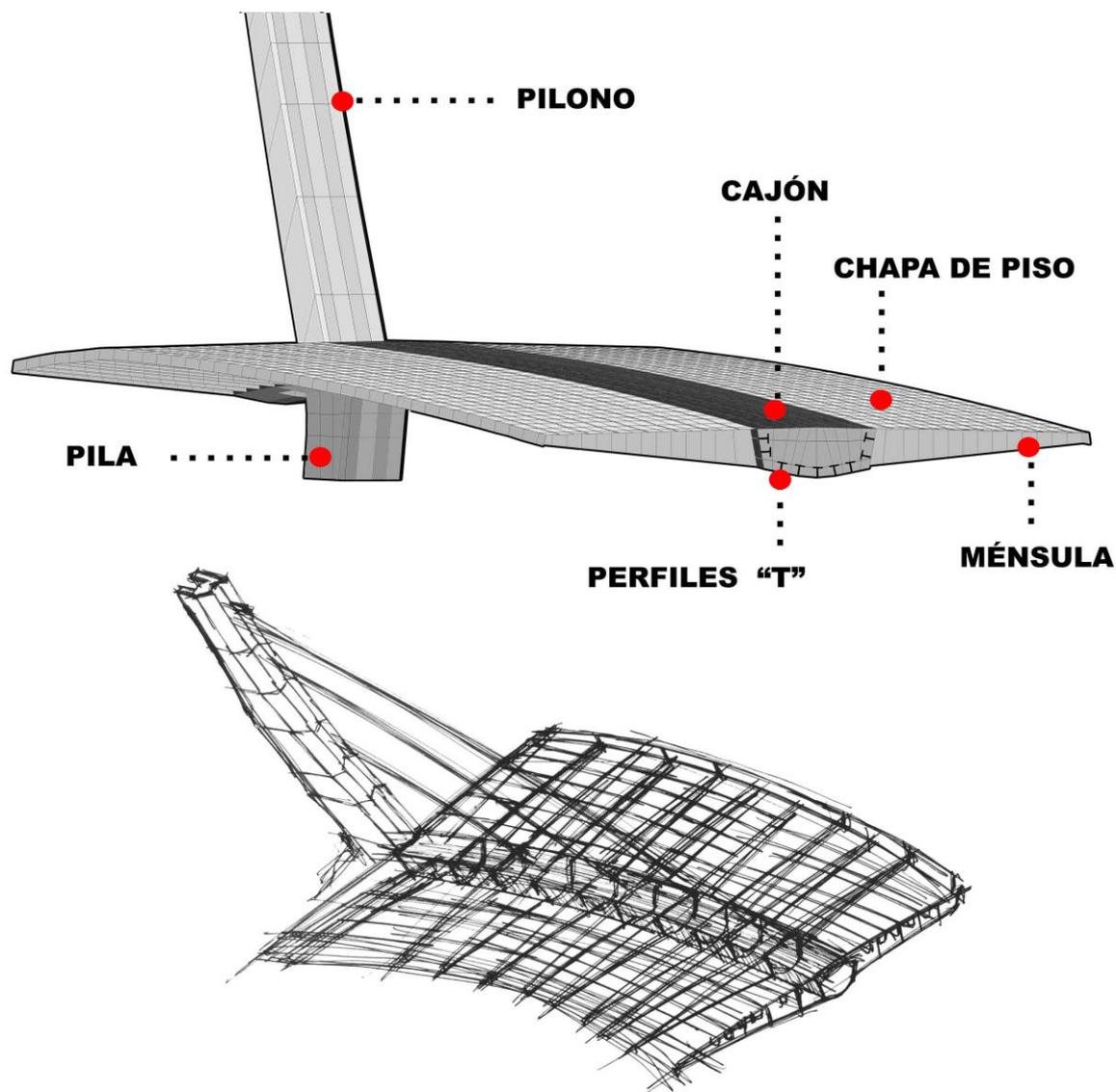


Imagen 79. Integración tablero, pilono y base

(Arriba) Modelado 3d de elementos finitos del puente, Auto CAD, visualización SAP 2000

(Abajo) Boceto espontaneo unificación: tablero, pilono y base

Fuente: Propia

Atirantado

El puente tiene 29 tirantes, situados en arpa, con una inclinación de 26° respecto a la horizontal. Cada cordón de 0.6" tiene sus alambres galvanizados y está protegido con cera en una vaina coextruida de HDPE (polietileno de alta densidad). Los anclajes de los tirantes son aptos para un rango de tensiones de 300 Mpa (Megapascal) y han sido homologados.

Tirantes 1 a 6:

Los seis tirantes más cortos (tirantes 1 a 6) están compuestos por 31 unidades de Ø 0.6”.

Tirantes 7 a 20:

Los tirantes 7 a 20 están compuestos por 61 unidades de Ø 0.6”.

Tirante 21:

El tirante 21 está compuesto por 55 unidades de Ø 0.6”.

Tirante 22:

El tirante 22 está compuesto por 49 unidades de Ø 0.6”.

Tirante 23:

El tirante 23 está compuesto por 43 unidades de Ø 0.6”.

Tirantes 24 a 29:

Los tirantes 24 a 29, los más largos, están compuestos por 31 unidades de Ø 0.6”.

(Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Compensación visual:

La vaina exterior que recubre los tirantes es de HDPE acabado de color blanco, con doble hélice exterior para contrarrestar el fenómeno de las vibraciones conocido como “rain-wind” (viento-lluvia) en cuanto al diámetro exterior era, por motivos estéticos, que todas tuviesen el mismo diámetro. No obstante, por causas aerodinámicas no fue así, aunque son sensiblemente iguales (imagen 80). Los tirantes de 1 a 6 tienen una vaina interior de HDPE negro de Ø180 mm y una vaina exterior de Ø225 mm, los tirantes 7 a 23 una vaina Ø225 mm y los más largos y alejados del campo visual, los tirantes 24 a 29, su vaina es Ø180 mm. De esta manera y bajo un criterio de unidad estética en la composición, percibimos el diámetro de los tirantes proporcionados.

La Retenida del pilono

La retenida o atirantamiento del extremo del pilono, lo forman 4 grandes elementos tubulares, paralelos en la vista en alzado del puente, (imagen 81) separados 1.9 metros y que, por motivos aerodinámicos se abren ligeramente en la vista longitudinal, partiendo de 2 metros en coronación a 6 metros en la cimentación.

La longitud entre el anclaje en el extremo del pilono y el anclaje en el contrapeso de hormigón es de 115 metros. El anclaje activo se sitúa en el extremo del pilono. Cada uno de estos cuatro tirantes está compuesto por unos cordones de pretensado, 85 unidades de 0.60" auto-protegidos, igual que los de los tirantes, además el sistema incorpora un tubo exterior de 508 mm de diámetro y 36 mm de espesor, la calidad del acero empleado es S460 NL. El motivo de esta composición no es solo por la resistencia de estos tirantes, sino por dotarles de rigidez de modo que el alargamiento elástico de los mismos sea lo más pequeño posible; así se consigue reducir los momentos que podrían aparecer en el pilono y en el tablero, debido al alargamiento elástico de éste sistema.

Al tubo exterior metálico se le adosó una hélice metálica para evitar vibraciones por el fenómeno "wind-rain" de nuevo. Cercano al anclaje inferior, pasivo, se coloca un amortiguador de fricción a cada tirante y se dispone también de centrador de neopreno. En el anclaje superior en el pilono, solo se dispone de centrador.

(Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Pertinencia formal o imposición para garantizar la estabilidad:

En este punto bien vale la pena cuestionarse si la imagen que proyecta la retenida, tiene pertinencia en el código formal del puente o viene dada como imposición imprescindible para respaldar la estabilidad del pilono. La respuesta se efectuará en los resultados que arrojen las deformaciones del pilono y verificar del lado de la seguridad, si son o no admisibles las deformaciones que experimenta el pilono al clausurar estos, los cables de la retenida.



Imagen 81. **La Retenida**

Pertinencia formal o imposición para garantizar la estabilidad

Fuente: Propia

2.6 El sistema constructivo del puente

Una vez definidos cada uno de los componentes del puente (imagen 82) se procede a exponer la estrategia del montaje de las piezas o de sus componentes, en un sentido amplio la construcción es el sustento y materialización de “La Forma”, después de todo, “la construcción es el vocabulario tangible” en relación al tema que nos ocupa.

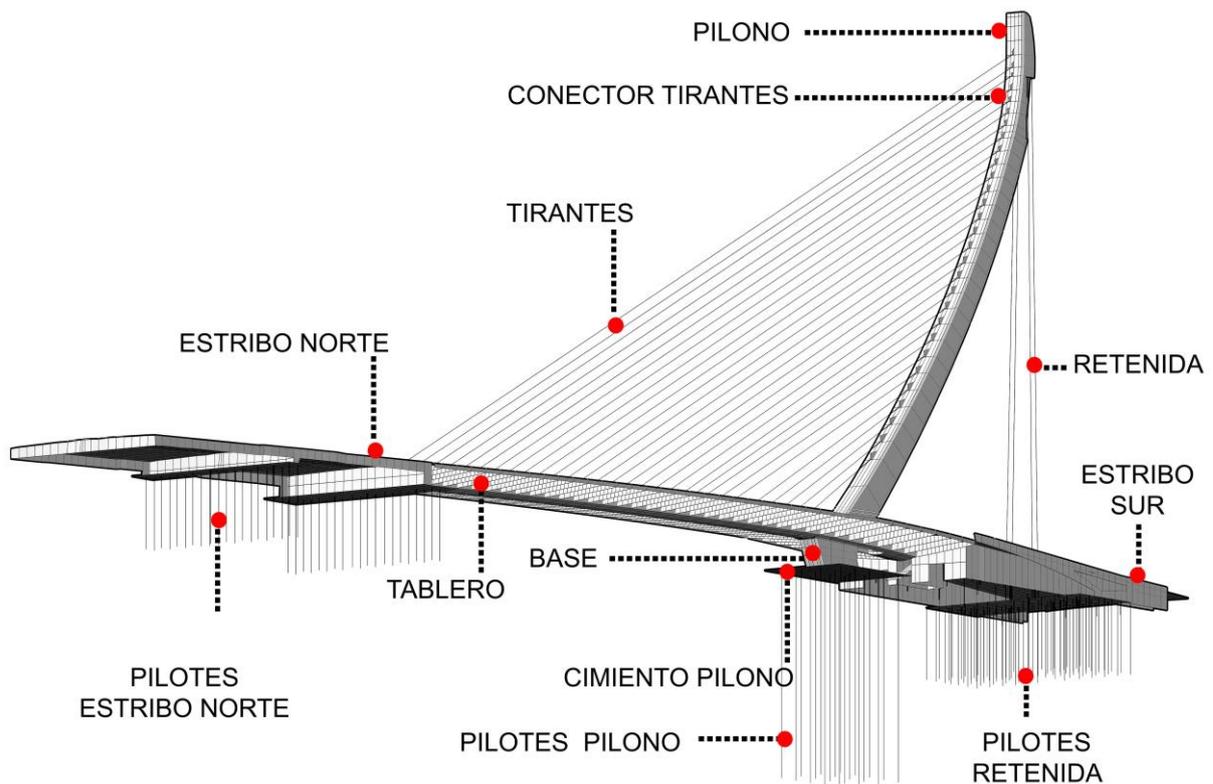


Imagen 82. Resumen, componentes del puente

Modelado 3d de elementos finitos del puente, Auto CAD, visualización SAP 2000

Fuente: Propia

La construcción se inicia con el montaje de la gran base metálica, se sigue con el tablero y cuando está sensiblemente avanzado el tablero, se comienza con la construcción del pylon.



Imagen 83. Unión de pilono, tablero y base

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Es interesante ver el arranque del pilono desde su base, la gran pieza metálica en el estribo Sur (imagen 83), que también recibe el cajón “la espina dorsal del tablero” se conforma entonces un nudo de formas plásticas, expresivas y con diferentes orientaciones en el espacio. Cabe destacar que debido al fuerte espesor de las chapas que conforman la base, esta fue transportada por piezas a la obra para soldarlas en situ. El montaje del tablero inicia desde el centro con la conformación de la espina dorsal, a la que se van integrando en sus laterales las ménsulas (imagen 84) todas las uniones son soldadas, durante la construcción del tablero, se sustentó sobre apeos separados a 20 metros, (apeos tanto en el cajón o espina dorsal y los extremos de las ménsulas). Así pues, una estructura auxiliar de la cual depende el tablero provisionalmente hasta que lo sujeten definitivamente los cables de atirantamiento central.



Imagen 84. **Secuencia constructiva**

Fuente: (skyscrapercity, 2008)

Transición Constructiva

La transición constructiva permite el avance controlado del tablero y el pilono, esto es, que una vez sensiblemente avanzado el tablero, comienza a erigirse el pilono que a su vez, a medida que gana altura es necesario sujetarlo con tres cables temporales, pues durante la ejecución el pilono no era capaz de soportar su propio peso sin atirantamiento al tablero por aparecer flexiones no admisibles.

Por otra parte, el pilono llega a obra a modo de dovelas que se van apilando en obra y se verifica que el empalme entre las piezas, sea el correcto previo al proceso de soldar las mismas, el cordón de soldadura entre las dovelas eventualmente dejan huella que permite identificar el arranque de un nuevo módulo de dovela. Estas piezas que conforman el pilono fueron montadas unas súper grúas con capacidad de montar las últimas dovelas que conforman el pilono de 100 toneladas de peso maniobrando a 125 metros de altura (imagen 85). Una vez concluido el montaje del pilono se procede con la

colocación de los tirantes definitivos que atirantan el tablero y se procede entonces con la ejecución del montaje de los tubos metálicos del atirantamiento de la retenida.



Imagen 85. Maniobras en el montaje del pilono

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Los cables de retenida se montan de arriba hacia abajo, y dado que no son paralelos entre sí, es necesario arriostrarlos provisionalmente y posicionarlos correctamente para efectuar la soldadura a tope entre tramos en altura. Los tubos metálicos no se anclan al contrapeso en esta fase, una vez terminado su montaje, se colocan los cordones interiores de 0.6", enfilándolos por el extremo superior de los tubos en la coronación del pilono. A medida que se va avanzando en el montaje y tesado de los cables de atirantamiento del tablero, se van tesando en cuatro fases, los cordones de los tirantes de los cables de la retenida con cuatro gatos actuando simultáneamente en los cuatro anclajes (imagen 86). Hasta este momento el tubo exterior metálico de esos tirantes, no ejerce ninguna función estructural, toda la función de retenida la efectúan los cables de pretensado.

Una vez montados todos los cables de atirantamiento, se realiza el último tesado a los cordones de la retenida, hasta 10700 KN por retenida y se conecta el tubo

metálico al contrapeso. Se suelta, entonces, desde el anclaje activo situado en la coronación del pilono, parte de la carga que tenían los cordones, carga que se transfiere como tracción a los tubos metálicos, y se anclan definitivamente los cordones y los tubos. De esta forma el estado final resistente de los componentes de la retenida, cordones y tubos, es el mismo que si hubiesen estado trabajando juntos frente a las cargas de tracción 8600 KN al tubo estructural y 2100 KN que quedan en los cables, para cada tirante. Por último, se inyecta de lechada de cemento el espacio entre los tubos en los que alojan los cordones, de forma individual y el tubo metálico. Con estas actuaciones se da por finalizado el proceso de puesta en carga de tirantes y retenida.

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)



Imagen 86. **Montaje de la retenida**

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)



Imagen 87. *La función de la hélice en la retenida*

La hélice soldada a cada uno de los tubos metálicos de Ø 508 mm que contienen los tirantes de la retenida

Fuente: Propia

Aspectos aerodinámicos en tirantes

En este puente había dos aspectos que estudiar al respecto de la estabilidad aerodinámica de los tirantes y de la retenida, por una parte el debido a vibraciones por viento y lluvia que, aunque habitual en todos los tirantes de puentes, aquí se complicaba ya que se prefería, por motivos estéticos que todas las vainas de los tirantes tuviesen el mismo diámetro y por otra, se tenía el problema de la proximidad entre sí de los tubos de la retenida (cilindros) que quedaban alineados frente al viento, situación que puede producir inestabilidad aerodinámica.

Los dos métodos prácticos para controlar este fenómeno, están claramente establecidos, la textura superficial y un número de Scruton adecuado: En este puente, los tirantes del tablero tienen una doble hélice en su vaina, mientras que en la retenida, en el tubo exterior metálico, se dispone de una hélice soldada al mismo con lo que se les dota de la textura superficial (imagen 87)



Imagen 88. **Amortiguador en tirantes del tablero**

Fuente: (Salcedo, ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural, 2009)

Amortiguadores en tirantes

Se observa en primer plano al desnudo, el grupo de cables que conforman un tirante (imagen 88), aún desprovistos de la vaina que los recubre, se aprecia también, la recepción de los tirantes en el amortiguador que les aguarda. La función de los amortiguadores, distribuidos en el cajón central del tablero y el eje central del pilono es precisamente contrarrestar o compensar las cargas aerodinámicas que experimentan los tirantes.

2.7 Criticas a la obra

Una queja recurrente en el Puente de Serrería es el brusco cambio de rasante del tablero desde el centro del mismo hacia la conexión con el estribo sur de la retenida, cuando se cruza el puente no es posible divisar o vislumbrar el estribo opuesto por la acusada curvatura del tablero (imagen 89), un aspecto no menor, pues esta situación ha llegado al punto de causar fatalidades, se tiene constancia de que al menos un motorista ha perdido la vida en el puente recién inaugurado, al no alertarse de que habían coches aguardando el semáforo en la cota más baja del tablero justo antes de tomar por la rotonda y produciendo la colisión del motorista con los vehículos. Esta situación llevó a las autoridades de movilidad a plantear una señalización intermedia en el puente para controlar el tráfico y evitar los impactos o choque de vehículos. Por su parte Calatrava afirma que la morfología del tablero no obedece a un capricho estético, sino que el cambio de rasante obedece a una aplicación estricta de la normativa, que obliga a que la obra civil en cuestión tenga un gálibo que permita el tránsito de vehículos de emergencia por debajo del puente, también asevera que hay diferencias de nivel entre los costados de tablero. Aun así la percepción en el colegio de Ingenieros es que ha primado la estética sobre la seguridad vial, como recoge la cita en el diario Levante:

“El puente de l'Assut de l'Or carece del visado del Colegio de Ingenieros. El decano cree que Santiago Calatrava ha primado la estética sobre la seguridad.”

(parrilla, 2009)

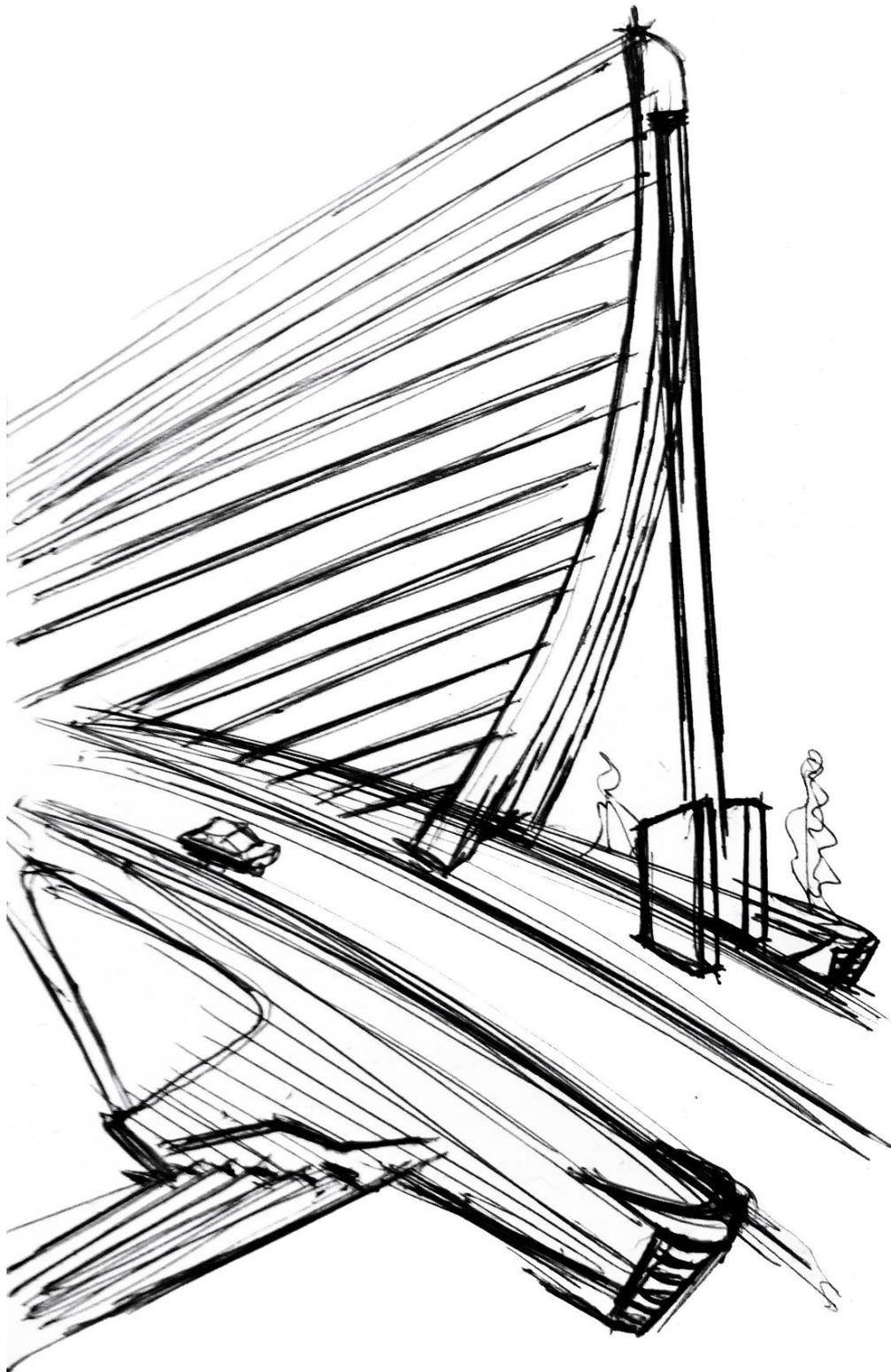


Imagen 89. **El pronunciado cambio de rasante en el estribo Sur**

Boceto sobre el Puente de Serrería, se enfatiza la llegada del tablero con el estribo Sur, destacan las luminarias al borde del estribo, que también reciben tratamiento estético... un mensaje de unidad formal.

Fuente: Propia

Otro dato curioso se centra en los orígenes de la concepción del puente, Calatrava preveía la instalación de un mirador “el techo de Valencia” con una cabina de ascensor para ascender, sin embargo se descartó esa idea por la inviabilidad económica, existe una maqueta de una etapa primigenia del puente (imagen 90) logré captar una versión temprana del Puente de Serrería en la bibliografía dedicada a los puentes, con la prolongación del mirador en el extremo superior del puente. Con una distribución del atirantamiento en la coronación del pilono y no uniformemente distribuido a lo largo del eje central del mismo pilono, esta versión temprana no ofrece la morfología de trayectoria curva definitiva que adoptaría la resolución final del proyecto, sin embargo, tampoco descarta el contra-atirantado “la retenida”.



Imagen 90. *Versión temprana del Puente de Serrería*

Fuente: (Tzonis, 2006)

Critica Personal

Personalmente, establezco una crítica constructiva, resaltando la unidad plástica en la obra, todos sus elementos reciben el tratamiento estético, desde la morfología de la base hasta los elementos no estructurales como las barandillas ya se empiezan a esculpir los pliegues con los rasgos formales característicos del puente en su conjunto.

Otro aspecto interesante, es la dedicación de Calatrava como proyectista a la iluminación del puente, aprovechando las carcasas que recubren los amortiguadores de los tirantes que sustentan el tablero en la calzada central del puente, para introducir luminarias que se proyectan hacia los cables para resaltar la presencia de los mismos en el ambiente nocturno (imagen 91). Al borde del estribo Sur, se encauza una luminaria incrustada en una base de hormigón, la estilizada línea de tendencia formalista explícita y explotada al límite en cada trazo del puente.



Imagen 91. *“El efecto lumínico de la obra”*

(Izquierda) Captación nocturna desde la calzada central del puente, destaca la singular iluminación que Calatrava proporciona al puente (derecha) vista de una de las luminarias en el extremo del estribo Sur.

Fuente: Propia

TERCERA PARTE

Resistencia y Estática: del Vocabulario al Lenguaje

3.1 Antecedentes

Adentrados en esta etapa final del proceso de investigación porque consolida a través de la práctica experimental, las preocupaciones que encarna fundamentalmente la tesis de establecer los límites de la Estética y la Eficacia estructural, los tres grandes pilares han sido expresados metafóricamente como “*el enriquecimiento del vocabulario construye el lenguaje*” y entre otras cosas El Lenguaje es por excelencia la forma de comunicar y transmitir, del mismo modo que el lenguaje no solo se expresa con las palabras pero también con la música y la expresión corporal etcétera, en el caso que nos atañe, el lenguaje del aparato formal, el lenguaje de la forma estructural y su capacidad resistente.

Cronológicamente desde un origen, la génesis del lenguaje, y las implicaciones de estructuración durante el proceso de gestación hasta la depuración madurez y consolidación del mismo, como la vida misma:

1. *El Vocabulario Calatrava:*

“las formas Calatrava” me permitió abordar con conocimiento de causa el porqué de la forma, las preocupaciones del autor, su identidad y la singularidad como las adolescencias de algunas de sus obras. También me permitió identificar las filiales que en sinergia establecen vasos comunicantes entre el vocabulario formal de Calatrava y el de otros personajes que ineludiblemente desarrollaron con criterio personal aportes a las preocupaciones por el carácter plástico de las estructuras.

Del semillero de obras seleccionadas, puedo atreverme a afirmar que la estación de Stadelhofen en Zúrich, es la obra que mejor concilia o establece la sana convivencia entre estética y eficacia estructural, se consigue un proyecto integral que recrea una atmosfera que magnifica a la estructura, saca partido a un accidente geográfico, esto es, proyectando en el vientre de la colina, que permite que el vocabulario de Calatrava se exprese sin derroche, sin excesos y sin adolescencias estructurales.

Acto seguido el enriquecimiento del vocabulario se tiene que ir depurando y consolidando.

2. La Construcción: El Vocabulario Tangible:

En esta fase el recurso metafórico apremia que en el lenguaje de las formas el cómo se sustentarlas es capital porque no es obra hasta que no se puede palpar y de ahí la importancia que tiene la construcción porque es en sí misma un vehículo de aprendizaje con errores y aciertos. Dedicando fundamentalmente en este apartado a la lectura de los puentes de Calatrava y donde dicha lectura del vocabulario es cada vez más cercana al punto de encuentro entre la capacidad estética y la capacidad resistente del “lenguaje”.

3. Resistencia y Estática del Vocabulario al Lenguaje:

En este último punto se pone de manifiesto que las reacciones mecánicas y físicas implícitas en una obra con un vocabulario tan personal consolidan un lenguaje amplificado, la capacidad de equilibrio estático de resistencias de Estructura y Forma unificadas e ineludibles, que intentan comunicarnos algo, ese algo está regido fundamentalmente por las leyes que gobiernan la naturaleza, fundamentalmente la de la gravedad, y las reacciones y consecuentes deformaciones que experimentan estructura y forma frente a las sollicitaciones e implicaciones que debe acometer demostrarán el tipo de “Lenguaje expresado” del vocabulario al lenguaje, del lenguaje a la realidad.

3.2 Metodología

“La belleza es el esplendor de la verdad”

Platón

Se emplea el método experimental: mediante la construcción de un modelo tridimensional detallado del Puente de Serrería se analiza su comportamiento estructural y en una segunda fase se altera el modelo de una forma simplificada para introducir variables fundamentalmente en el pilono o mástil que permitan responder a la inquietante pregunta: ***¿El efecto estético del pilón del puente proviene directamente de la lógica interna de la estructura?***

A continuación se explican los pasos realizados para llegar a la respuesta.

3.2.1 Modelización

El propósito de la modelización, especialmente lo encarna la observación a las consideraciones de diseño, esto es, las implicaciones estéticas y las sollicitaciones estructurales que derivan en una depuración de la forma, el especial interés en la carga formal tiene consecuencias en su capacidad resistente. Por tanto, a nivel experimental se somete el puente a las acciones que permiten comprobar sus reacciones físicas que permiten ejercer un juicio crítico con la evidencia de la realidad y observar si Calatrava saca partido estético para potenciar las estructuras de forma eficaz como afirmaba Platón en El Banquete “la belleza es el esplendor de la verdad”.

3.2.2 Información

Para la elaboración de los modelos tridimensionales se recopiló toda la infografía disponible en la bibliografía dedicada al puente, además se consultó con el despacho del autor del mismo Santiago Calatrava en Zúrich y se hizo registro en el Ayuntamiento de Valencia la solicitud de acceso a los planos

arquitectónicos del puente, alojados en el Archivo Histórico. Para la asignación de materiales, definición de barras y espesores y clasificación de aceros fue capital contar con el informe técnico: HORTA COSLADA Construcciones Metálicas “Fabricación y montaje Puente del Azud del Oro 5.300 Toneladas”

3.2.3 Elaboración del modelo detallado

La construcción del modelo detallado la he desarrollado en AutoCAD, con los parámetros línea y 3Dcara, una vez concluido el modelo éste es trasladado al Programa de Análisis Estructural (SAP2000), para la respectiva definición de materialidad y cálculo de acciones usando el *Método de Elementos Finitos*. Una vez hecho esto, se observan las deformaciones y los esfuerzos resultantes.

3.2.4 Transición del modelo detallado

La introducción de una variante fundamental al modelo original detallado, con especial interés en el pilono, permite de una manera más práctica poder abordar variantes en el diseño del puente como poder identificar si el cambio de giro del pilono permite clausurar o no los cables de retenida porque el brazo que sustenta el tablero tiene mayor margen de maniobra al tener un radio de giro mayor, en fin, son hipótesis que deberán ser corroboradas con la ayuda del programa informático de cálculo SAP2000, que me permitirá observar que ocurre al alterar la disposición formal y ***plantear unas conclusiones a partir de las deformaciones que experimenta el puente y poder demostrar si la forma del puente en sí mismo es o no la efectiva.***

3.3 Acciones

Se han considerado las acciones pertinentes a la construcción de puentes:

1. Acciones permanentes: se consideraron todas
2. Acciones variables: se consideraron todas las sobrecargas de uso, además la de nieve y especialmente la de viento considerada la altura y desarrollo del mástil
3. Acciones accidentales: Se considera el sismo, más no los impactos porque no son objetivo del presente TFM.

3.3.1 Valores de Cálculo de las Acciones

Se consideran:

1. Estados Límite últimos (E.L.U)
2. Estados Límite de Servicio (E.L.S.)

3. 3.2 Comportamiento Estructural

Con las deformaciones resultantes tanto del modelo detallado original como las variantes propositivas, se pudieron establecer las líneas de tendencia de deformación del puente de Serrería, cada una de las variaciones explícitas: inclinación del mástil y exoneración de la retenida, permiten valorar el nivel de adecuación del aparato formal del puente, conocer cuál es “la forma efectiva”, la más adecuada.

En cuanto a las fuerzas resultantes, estas posibilitan a través de la observación el reconocimiento del comportamiento real de la estructura que para mí está intrínsecamente ligado al aparato formal del puente, “la estructura como arquitectura”. Los resultados arrojados se expresan en las láminas aportadas desde el software SAP 2000, que posibilita cristalizar conclusiones.

MODELIZACIÓN

Modelo 3D Auto CAD:

Previo al análisis estructural del Puente de Serrería, desarrollé un modelo 3D que está compuesto de barras y 3D Caras, elaborado en el software de Auto CAD de la familia de Autodesk, el modelado 3D es detallado, para inspeccionar la morfología del puente e identificar el aparato forma-estructural del mismo. Sin embargo por el tiempo disponible y la necesidad de acotar coherentemente en modo tiempo y lugar el Trabajo de Fin de Máster, se analizará solamente la estructura del tablero central y el desarrollo del pilono y la retenida, no solo tiene el mayor interés por ser el punto que presenta los mayores desafíos, al exponer el tablero del puente con un vano de 160 metros, y experimentando las deformaciones derivadas de las cargas aplicadas.

El modelado 3D en su totalidad consta de 9076 ELEMENTOS mismos que están divididos entre 2635 elementos de tipo línea 6441 elementos de tipo 3D Cara (imagen 92) y se han creado las capas necesarias para expresar e identificar cada una de las partes que componen el puente. La determinación que conlleva a construir determinadas secciones del modelo con la herramienta línea o 3D Cara, obedece a que en cada caso se emplea el recurso que mejor representa un componente constitutivo del puente, es así como se emplea la herramienta Línea por ejemplo en las viguetas del tablero, los rigidizadores del pilono, los pilares, las barandillas y los tensores. Los elementos construidos con 3D Cara expresan mejor los componentes como el cajón central del tablero, las ménsulas, los forjados, y especialmente las chapas que conforman el pilono de particular y excepcional morfología se ha hecho un esfuerzo por representar de forma fidedigna la constitución formal del puente para poder analizarlo en la etapa siguiente que consiste en la exportación del modelo de Auto CAD al Software de cálculo SAP 2000, por ello, para la construcción del modelo, fue capital contar con los planos arquitectónicos del puente, previamente solicitados al Ayuntamiento de Valencia, como anteriormente se ha detallado.

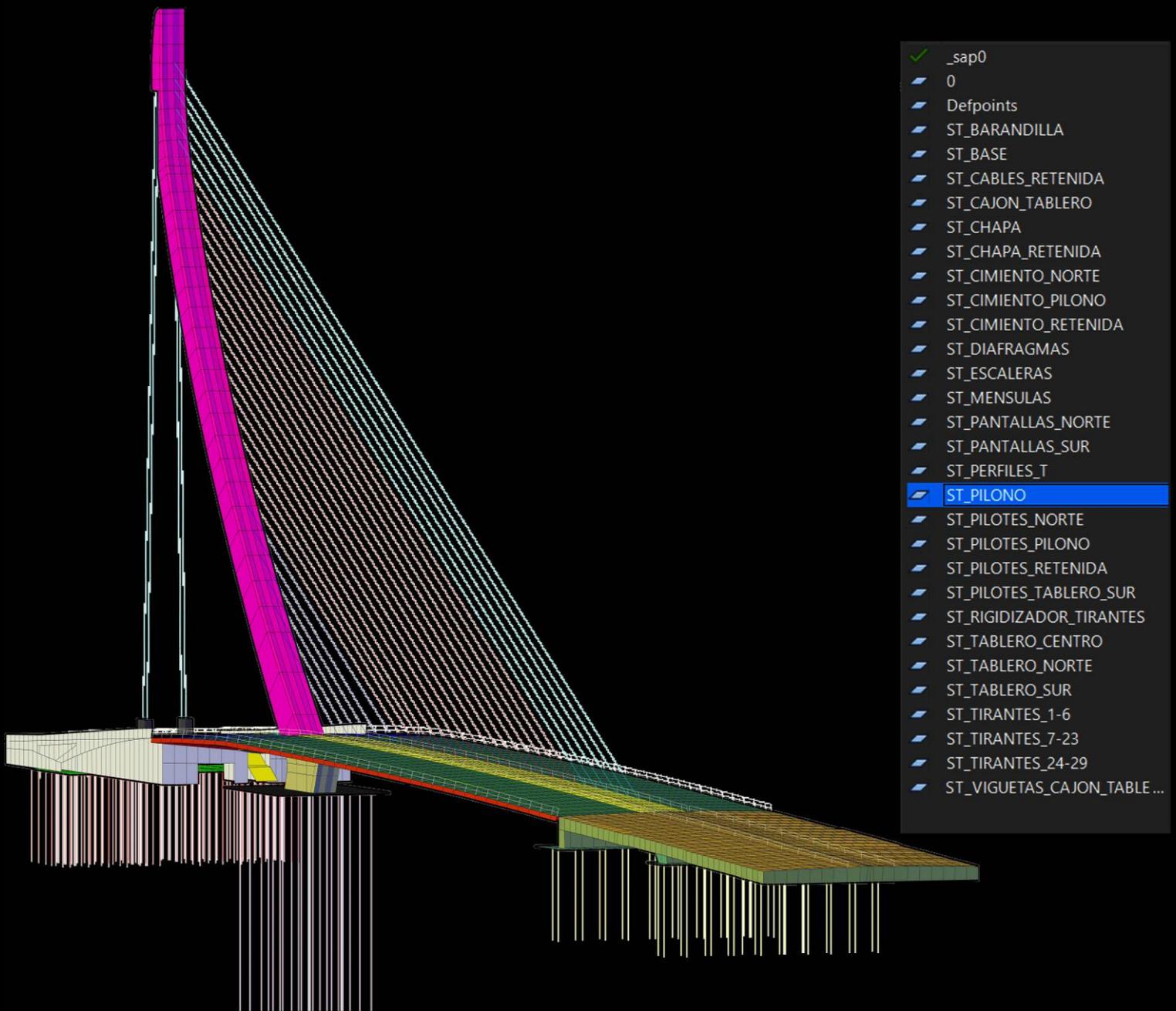


Imagen 92. Modelado 3D Auto CAD

Modelado 3d detallado del puente con elementos finitos línea y 3D Cara,

(2635 elementos de líneas y 5400 elementos de 3D Cara)

Visualización Auto CAD

RECURSOS PLANIMÉTRICOS PARA LA MODELIZACIÓN

En las siguientes páginas se expone la planimetría del puente, que constituyen la base para la construcción del modelo tridimensional detallado original (imágenes 93 a 101) y las variaciones transicionales del mismo.

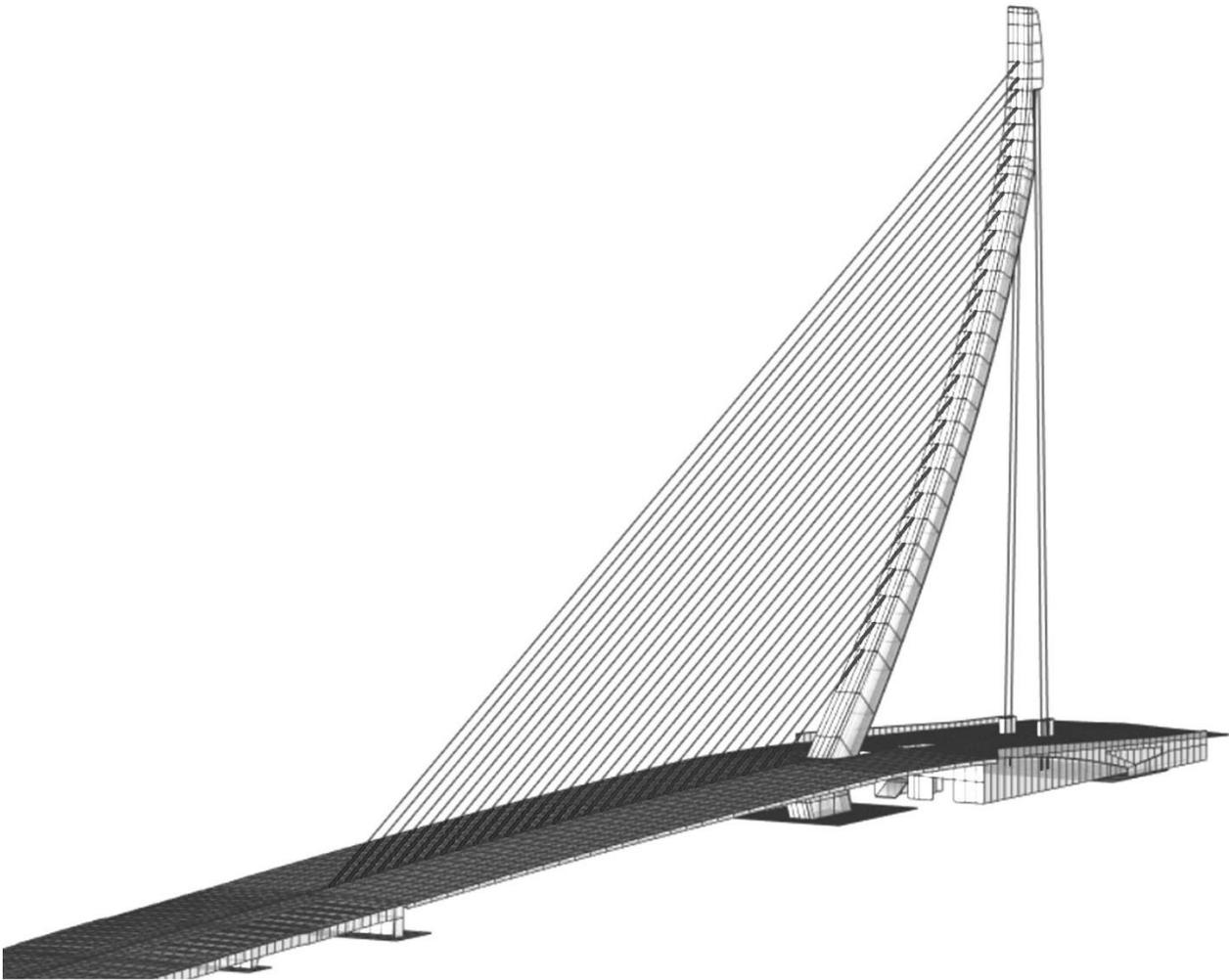


Imagen 93. Modelado 3D detallado SAP2000

Fuente: Propia

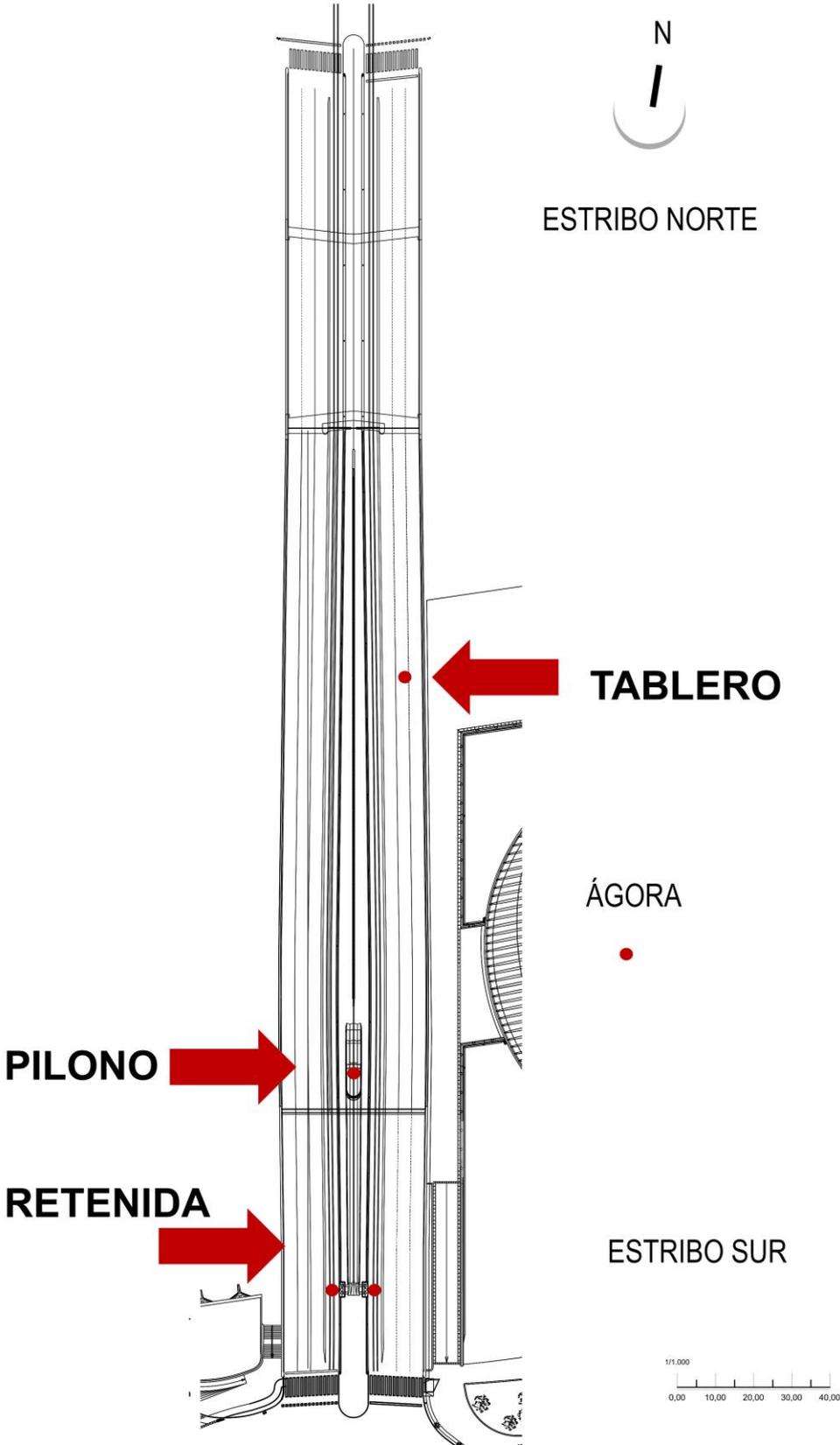


Imagen 94. Planta general del puente

Fuente: (Archivo Histórico, 2008)

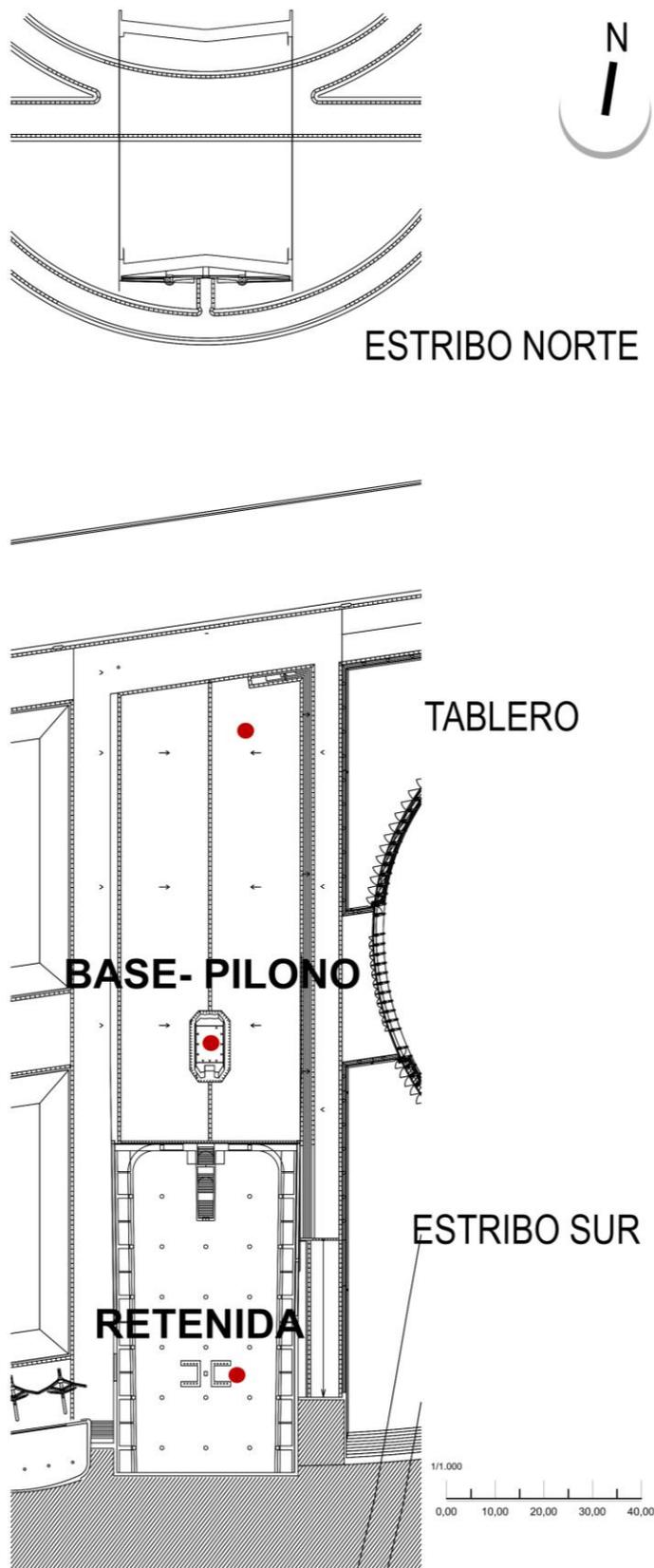


Imagen 95. Planta Urbanización bajo el puente

Fuente: (Archivo Histórico, 2008)

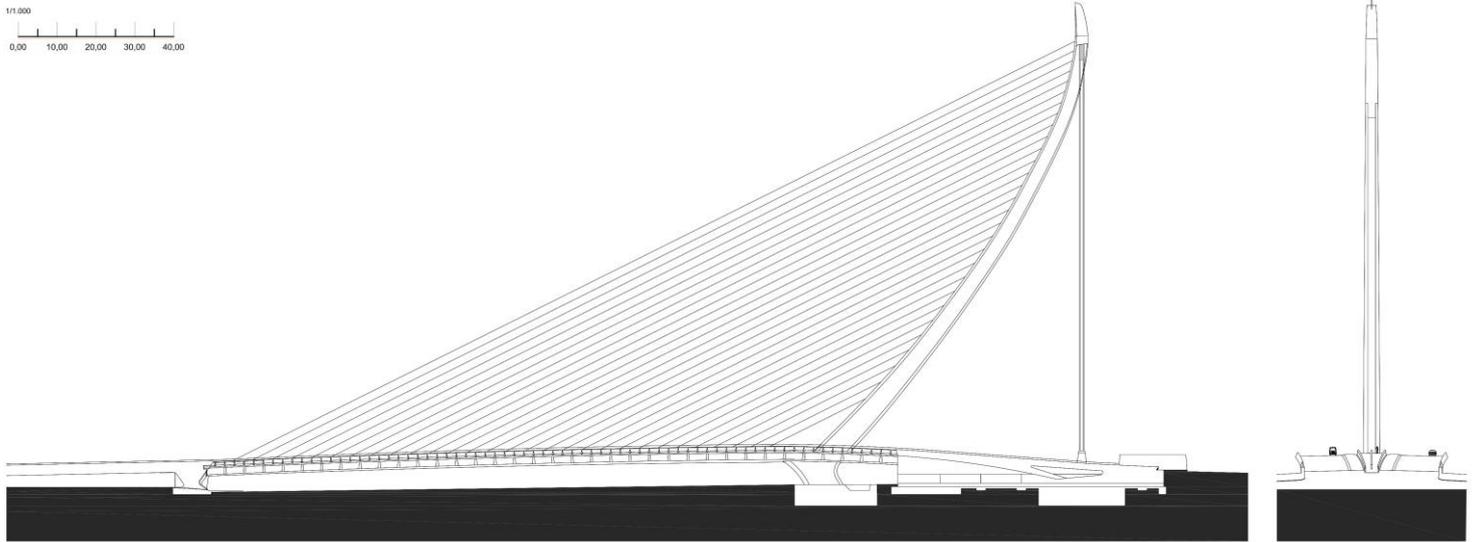


Imagen 96. Alzados Generales

(Archivo Histórico, 2008)

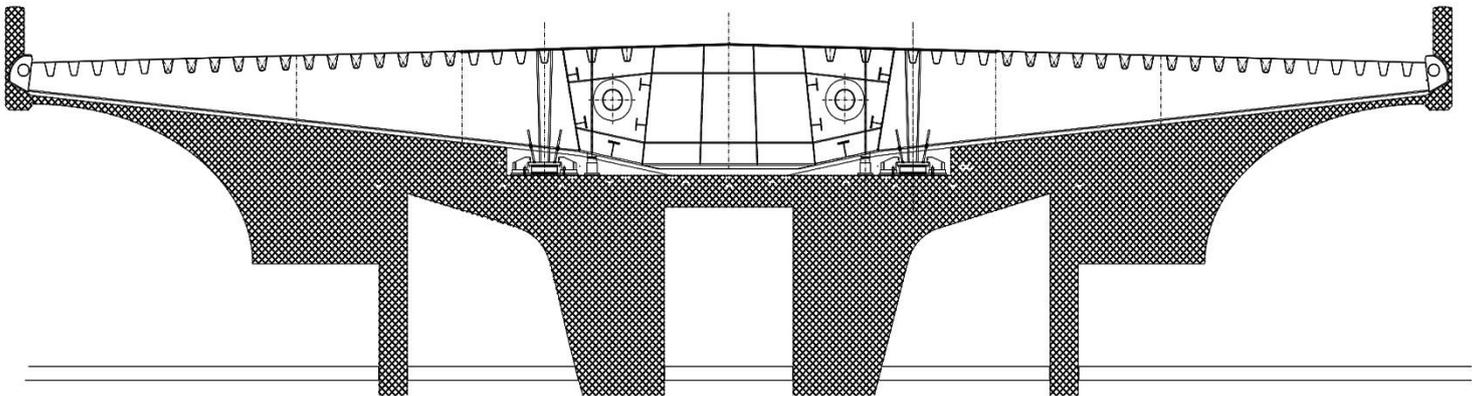


Imagen 97. Sección tipo del tablero en conexión con el estribo Sur

(Archivo Histórico, 2008)

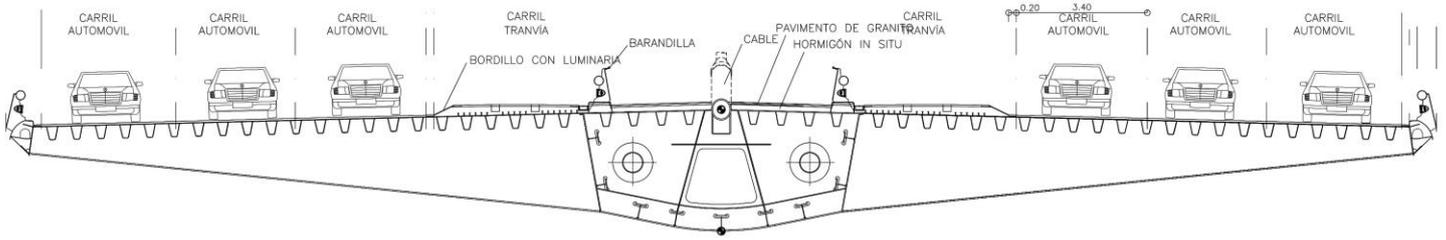


Imagen 98. Sección tipo del tablero tramo central

(Archivo Histórico, 2008)

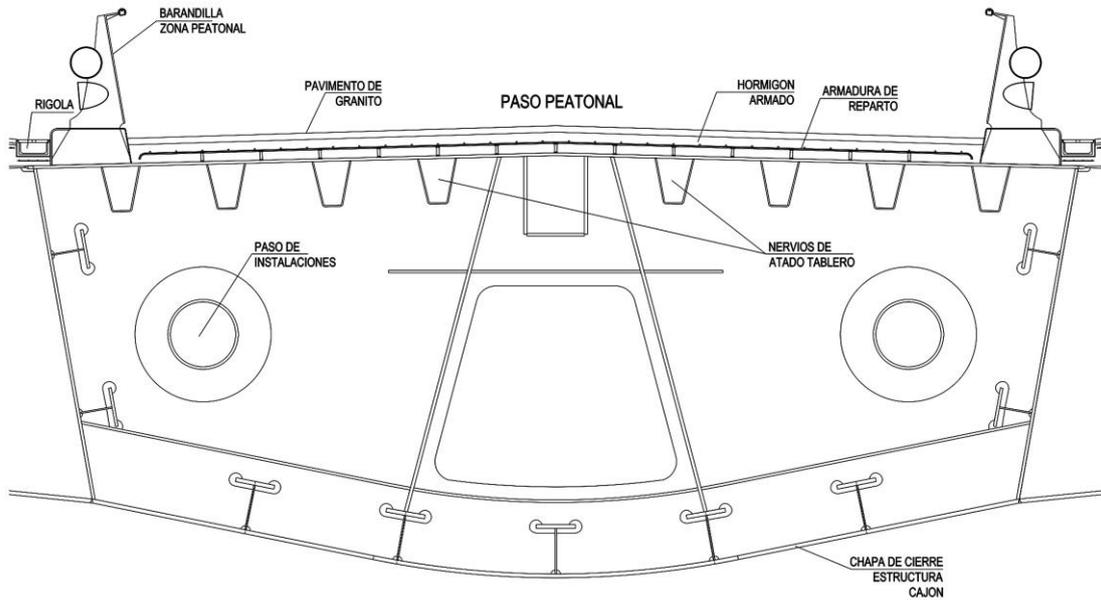


Imagen 99. Sección tipo del cajón central del tablero

(Archivo Histórico, 2008)

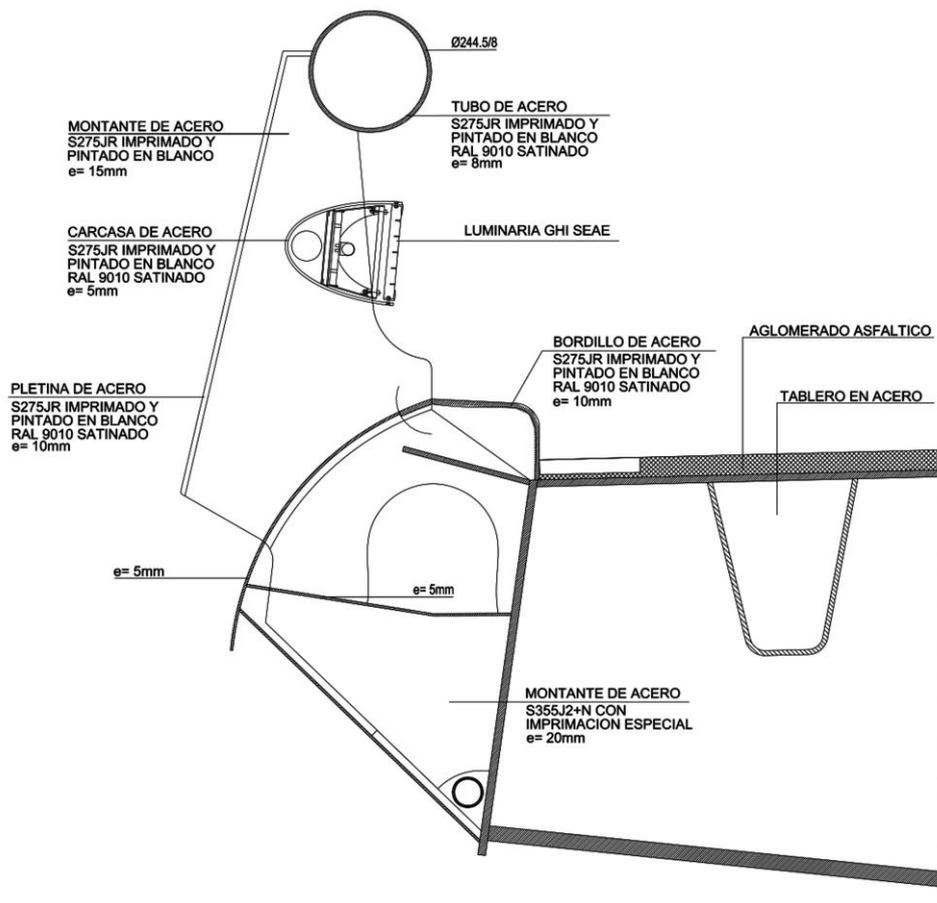


Imagen 100. Sección tipo de barandilla

Fuente: (Archivo Histórico, 2008)

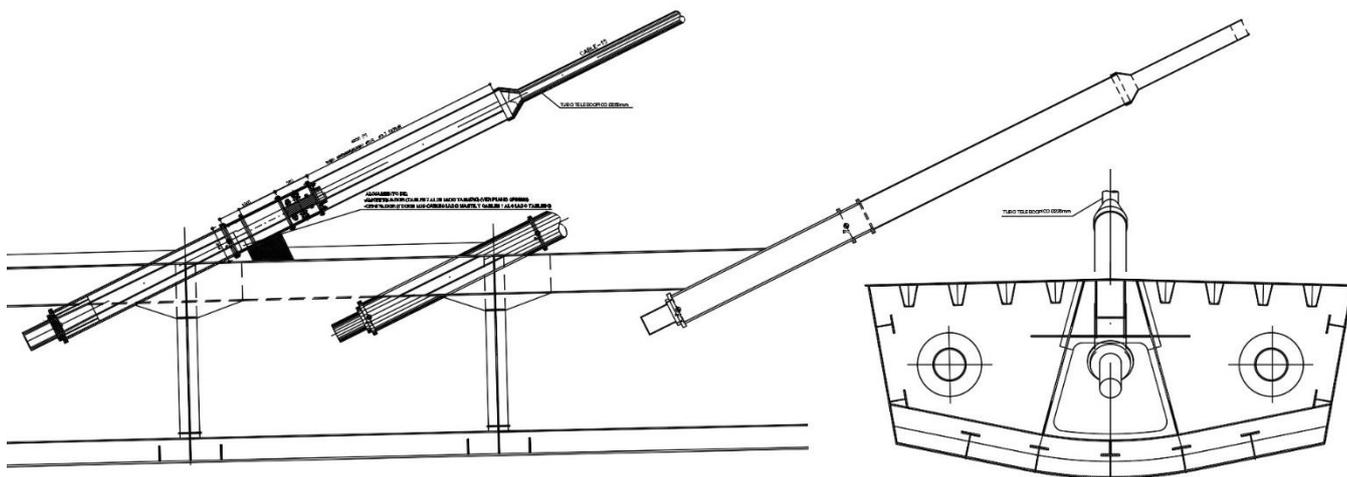


Imagen 101. Sección tipo, anclaje de tirantes

Fuente: (Archivo Histórico, 2008)

3.3.3 Exportación del Modelo 3D y desarrollo de cálculo en SAP2000

El modelo requiere ser optimizado porque en realidad su tridimensionalidad es el producto de unos elementos bidimensionales con orientación tridimensional en el espacio, es decir que no hay espesores, toda la definición de cada una de las capas anteriormente creadas, son definidas en SAP2000, software de la empresa *Computers and Structure Inc*, se optimiza la orientación de cada uno de los elementos que conforman el modelo en Auto CAD (líneas y 3D Caras) con la herramienta *SAPDXF* para exportar el modelo a SAP. En adelante los elementos que fueron construidos con líneas se identifican como Frames y los elementos que se materializaron con 3D Caras se identifican como Shells.

Asignación de secciones:

Previa recepción de las capas que conforman el modelo a SAP 2000, se crean los grupos que facilitan asignar de manera práctica las secciones. Se definieron el tipo secciones correspondientes al puente en los apartados *Frame Sections / Área Sections* respectivamente, las secciones fueron asignadas con apoyo en la bibliografía obtenida del informe técnico de Luis Viñuela y José Martínez Salcedo, publicado por la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE) en 2009, informe que detalla las dimensiones de los perfiles, los espesores de las chapas y calidades de acero empleados en la fabricación y montaje de la estructura metálica del puente, previamente detallado en el *apartado 2.5.4 descripción de cada una de las partes del puente*.

Para asignar la sección de los cables de atirantamiento central y los de la retenida, estos fueron modelizados en SAP2000, para poder fijar las características de cada grupo de cables como se expresó en el apartado 2.5.4 en la descripción del atirantado. Así, por ejemplo, el número de segmentos de un cable es 61 unidades de $\varnothing 0.6''$ en el grupo de cables del 7 al 23 (imagen 102) y por contraste el número de segmentos de un cable es 31 unidades de $\varnothing 0.6''$ en el grupo de cables del 24 al 29 (imagen 103).

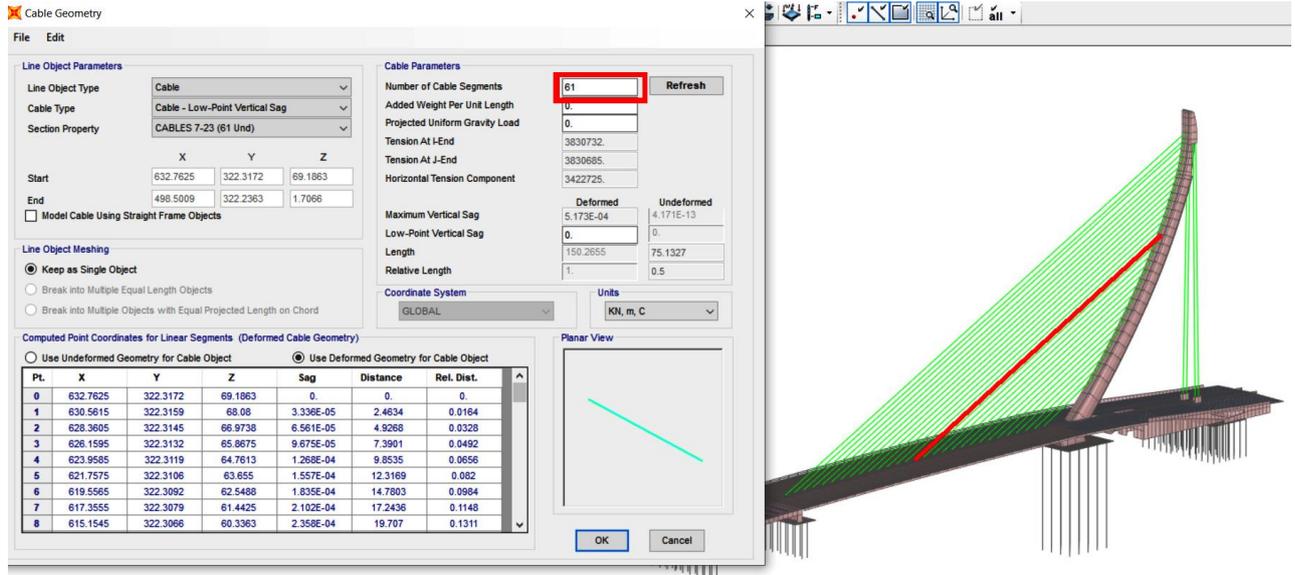


Imagen 102. Sección de cables, grupo (7-23)

Fuente: Propia

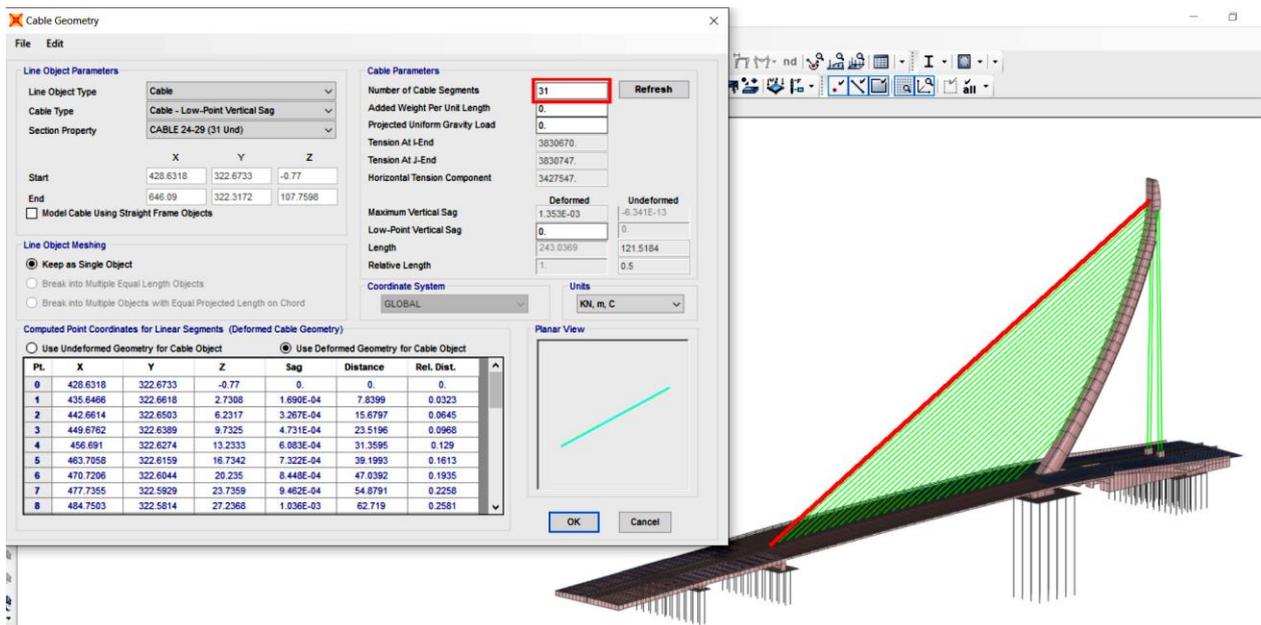


Imagen 103. Sección de cables, grupo (24-29)

Fuente: Propia

ACCIONES

Todas las acciones fueron calculadas en base a la *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11)*.

3.3.4 ACCIONES PERMANENTES

Peso propio

Corresponde al peso de los elementos estructurales, SAP 2000 incorpora por defecto el peso propio de los elementos dibujados con líneas (identificados como barras o Frames), una vez definidas las secciones, hace falta incorporar el peso propio de los elementos dibujados con las 3D caras, identificados como Shell, El peso propio se calculó en base al peso específico de los materiales (tabla 2) expresados en la *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11)*.

TABLA PESOS ESPECÍFICOS DE DIVERSOS MATERIALES [kN/m³]

Fundición	72,5
Acero	78,5
Aluminio	27,0
Madera seca	6,0 a 9,0
Madera húmeda	10,5
Hormigón en masa	23,0 a 24,0
Hormigón armado y pretensado	25,0
Elementos de basalto, pórfidos y ofitas	31,0
Elementos de granito o caliza	30,0
Materiales granulares y rellenos (zahorras, gravas y arenas)	20,0
Pavimentos de mezcla bituminosa	23,0
Material elastomérico	15,0
Poliestireno expandido	0,3
Vidrio	25,0

Tabla 2. Pesos específicos de diversos materiales (KN/m³)

Fuente: (Fomento, 2011)

Haciendo la conversión para pasar de KN/m³ a KN/m² del peso específico de los materiales que se expresan en la tabla anterior y poder asignar en SAP 2000 las cargas correspondientes de manera uniforme en KN/m² (tabla 3).

MATERIAL	KN/m ³	ESPESOR (PROYECTO)	KN/m ²
ACERO (UND) mm	PESO ESPECÍFICO	UND (m)	
CHAPA-TABLERO (16 mm)	78.5	0.016	1.256
CHAPA-PILONO (80 mm)	78.5	0.08	6.28
CHAPA-BASE PILONO (80 mm)	78.5	0.08	6.28
CHAPA SUPERIOR -CAJÓN (22 mm)	78.5	0.022	1.727
CHAPA INFERIOR CURVA -CAJÓN (30 mm)	78.5	0.03	2.355
CHAPA INFERIOR CURVA -CAJÓN UNIÓN CAJÓN-PILONO (50 mm)	78.5	0.05	3.925
CHAPA LATERALES (ALMAS- CAJÓN) (22 mm)	78.5	0.022	1.727
CHAPA LATERALES (UNIÓN ALMAS -CAJÓN-PILONO) (30 mm)	78.5	0.03	2.355
CHAPA-DIAFRAGMAS	78.5	0.02	1.57
CHAPA DE BORDE (20 mm)	78.5	0.02	1.57
ALMA MÉNSULAS (ZONA MÁS EXTERIOR) (15 mm)	78.5	0.015	1.1775
ALMA MÉNSULAS (CERCANA AL CAJÓN) (20 mm)	78.5	0.02	1.57
CHAPA-RETENIDA (30 mm)	78.5	0.03	2.355
BULBOS TABLERO CHAPA (10 mm)	78.5	0.01	0.785
HORMIGÓN (UND) M			
HORMIGÓN SOBRE TABLERO (CARRIL PEATONAL) (0.15 M)	25	0.15	3.75
ESCALERA (0.25 M)	25	0.25	6.25
FORJADO ESTRIBO SUR (0.50 M)	25	0.5	12.5
FORJADO ESTRIBO NORTE (1.50 M)	25	1.5	37.5
PANTALLAS ESTRIBO NORTE (0.50 M)	25	0.5	12.5
BASE-PEDESTAL CIMENTACIÓN PILONO (5 M)	25	5	125
PAVIMENTOS DE MEZCLA BITUMINOSA (UND) M			
ASFALTO SOBRE TABLERO (0.06 M)	23	0.06	1.38
ELEMENTOS DE GRANITO O CALIZA (UND) M			
PAVIMENTOS DE GRANITO (CALZADA PEATONAL) (0.03 M)	30	0.03	0.9

Tabla 3. Asignación de Carga Muerta Permanente (CMP)

Fuente: Propia

Carga Muerta

Se consideró además del peso de todos los elementos estructurales, la carga muerta de los elementos no estructurales como el pavimento de la calzada peatonal revestida con baldosas de granito (*ver imagen 98 “sección tipo del cajón central del tablero”*) y las barandillas del puente que podrían considerarse como el mobiliario del puente (el peso de las barandillas está calculado automáticamente por SAP al ser elementos dibujados con la herramienta línea e identificados como Frame, y al haber definido las sección correspondiente al tipo de acero y perfil empleado en estas barras que constituyen las barandillas).

3.3.5 ACCIONES VARIABLES

Sobrecarga de uso

Se consideró el modelo de carga definido en el apartado para representar la acción del tráfico rodado (UNE –EN 1991-2) *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11)*.

Se procede entonces a la división del tablero en los carriles virtuales para la asignación de los diferentes tipos de carga como lo demanda la norma (tabla 4)

TABLA 4.1-b VALOR CARACTERÍSTICO DE LA SOBRECARGA DE USO

SITUACIÓN	VEHÍCULO PESADO $2Q_{ik}$ [kN]	SOBRECARGA UNIFORME q_{ik} (ó q_{rk}) [kN/m ²]
Carril virtual 1	2 · 300	9,0
Carril virtual 2	2 · 200	2,5
Carril virtual 3	2 · 100	2,5
Otros carriles virtuales	0	2,5
Área remanente (q_{rk})	0	2,5

Tabla 4. Valor característico de la sobrecarga de uso

Fuente: (Fomento, 2011)

Se crea entonces la hipótesis de asignación de las cargas en la serie de carriles virtuales sobre el tablero de 36 metros de longitud así:

Sobrecarga vehículo pesado

Se establecen virtualmente 3 carriles con la aplicación de una única carga de vehículo pesado, dicha carga se ubica de forma estratégica en el centro del tablero de 160 metros de luz por ser la más desfavorable (imagen 105). En el *carril 1* esa carga puntual es de 600kN, en sección transversal del tablero este carril se ubica en la calzada de tráfico rodado situada al extremo izquierdo, del mismo modo, se impone una única carga puntual de 400kN en el *carril 2*, este carril se ubica en la calzada de tráfico rodado situada al otro extremo (derecho). El carril 3 de tráfico rodado, se impone la carga puntual de 200 KN este carril se ubica al lado del carril 1.

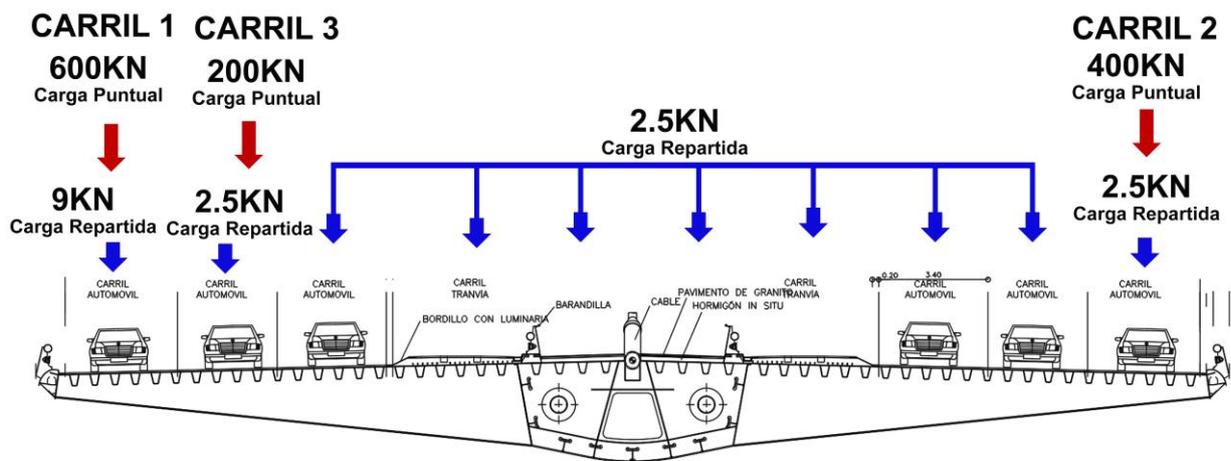


Imagen 104. **Asignación de sobrecarga uniforme y sobrecarga puntual de vehículo pesado**

Fuente: Propia

Sobrecarga uniformemente repartida

Además de la sobrecarga puntual de vehículo pesado, es necesario aplicar una carga uniformemente distribuida así: en el carril 1 una carga repartida de 9 kN,

en el resto de carriles incluidos los carriles destinados a la calzada peatonal, una carga uniforme repartida de 2.5 KN (ver imagen 104)

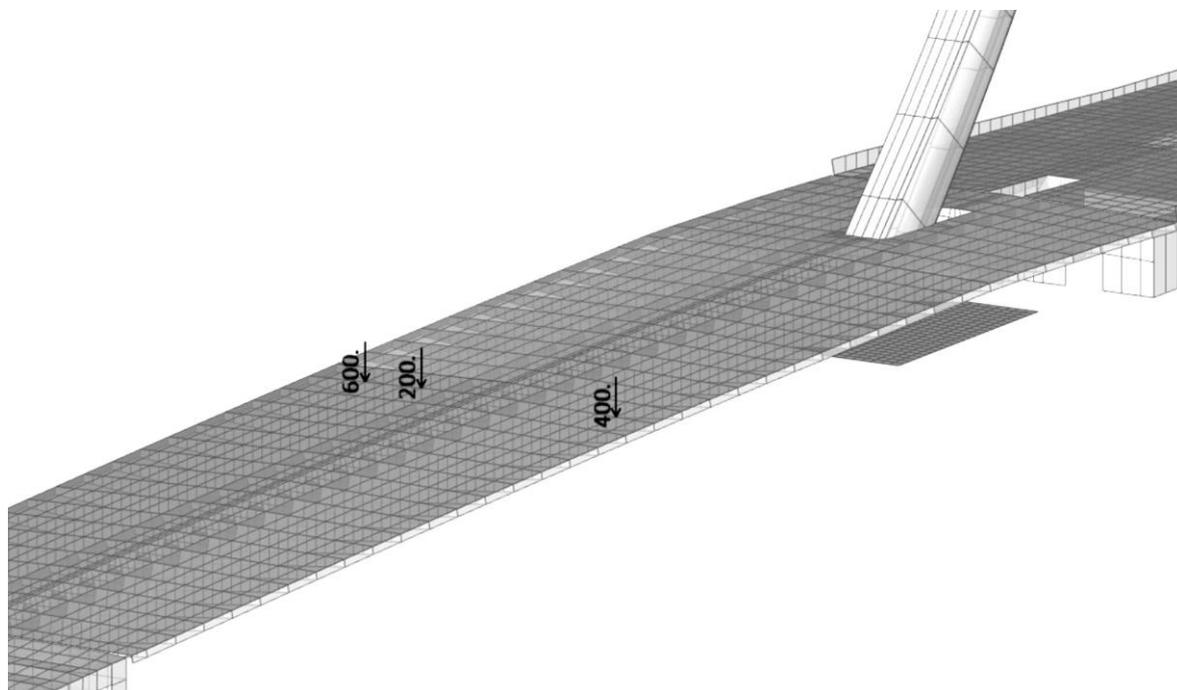


Imagen 105. Sobrecarga puntual de vehículo pesado al tablero

*Asignación de cargas puntuales (600KN / 400 KN/ 200 KN) en puntos neurálgicos del tablero
(modelado 3D visualización SAP 2000)*

Fuente: Propia

3.3.6 ACCIONES CLIMÁTICAS

Sobrecarga de nieve

Se consideró la sobrecarga de nieve fundamentalmente en el tablero del puente, por ser la superficie horizontal clave del análisis, el territorio español está dividido en cuatro zonas climáticas, Valencia pertenece a la zona III y se encuentra en el

rango de 0 a 200 msnm. El valor característico de la sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal (s_k) correspondiente es de 0.4 KN /m².

Así pues, el valor característico de la sobrecarga de nieve aplicada a la superficie del tablero del puente (q) aplicando la fórmula de la IAP:

$$q=0.8 \times s_k = 0.32 \text{ KN /m}^2$$

Dónde:

S_k (sobrecarga característica de nieve sobre un terreno horizontal)= 0.4 KN /m²

Fuente: (Fomento, 2011)

Sobrecarga de viento

Aunque no se trata de un edificio, donde es interesante analizar el efecto del viento recayente en las fachadas, el caso que nos ocupa destaca poderosamente el pilono de trayectoria curva de 125 metros de altura y que de hecho supera los 127 metros con el pararrayos que tiene en su coronación o remate, por ende se plantea la hipótesis de equiparar el pilono a un edificio por su envergadura y por otro lado también el tablero, considerando la luz que salva, es interesante poner la sobrecarga de viento en su superficie como en la cubierta de un edificio.

Valencia está ubicada en la zona A de presión dinámica del viento, la carga básica de viento característica para esta zona es de 0.42 KN/m², se determina el cálculo con la siguiente expresión:

$$q_b \cdot C_e \cdot C_p / s$$

Dónde:

q_b es la carga básica, **C_e** es el coeficiente de exposición, **C_p/s** coeficiente de presión/ coeficiente de succión.

El cálculo se efectuó con la tabla de viento simplificado aportada por el tutor del presente trabajo (tabla 5), valorando las condiciones de esbeltez en el plano paralelo al viento y el tipo de entorno para determinar el coeficiente de exposición, finalmente se determinan los valores para asignar en SAP los coeficientes correspondientes redondeados así: $C_p = 0.88 \text{ KN/m}^2$ representado SCVx (sobrecarga de viento en “x”) $C_s = 0.77 \text{ KN/m}^2$ representando SCVy (sobrecarga de viento en “y”)

		VALENCIA		
	qb	0.42	kn/m ²	
COEF. EXPOSICIÓN	Ce	2.6	0.8736	0.88
COEF. PRESION	Cp	0.8	0.7644	0.77
COEF. SUCCIÓN	Cs	0.7		

3.3.4 Coeficiente eólico de edificios de pisos

- 1 En edificios de pisos, con forjados que conectan todas las fachadas a intervalos regulares, con huecos o ventanas pequeños practicables o herméticos, y compartimentados interiormente, para el análisis global de la estructura, bastará considerar coeficientes eólicos globales a barlovento y sotavento, aplicando la acción de viento a la superficie proyección del volumen edificado en un plano perpendicular a la acción de viento. Como coeficientes eólicos globales, podrán adoptarse los de la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coeficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coeficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e

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

Tabla 5. *Calculo de viento simplificado*

Coeficiente de viento simplificado

Fuente: (Gallardo, 2021)

Tablas coeficientes eólicos y de exposición

Fuente (AE, 2019)

3.3.7 ACCIONES ACCIDENTALES

Acciones sísmicas

El cálculo de sismo se efectuó en base al Análisis Modal Espectral, el Sismo Modal genera unos esfuerzos en la estructura en función de los modos de vibración que ha calculado y comprender cuanta masa se ha movilizadado en la estructura. Para comprobar la estructura frente a Sismo Modal, se emplea la combinación *ELUSIM*, haciendo uso de una tabla programada suministrada por el tutor del presente trabajo para introducirla a SAP2000, en la tabla están consignados los parámetros para el caso de Valencia.

Donde:

K (coeficiente de contribución por la situación geográfica) = 1.0

ab/g (aceleración sísmica básica) = 0.06

μ (ductilidad) = 2

C (coeficiente del terreno) = 1.6

ρ (grado de importancia del edificio) = 1

Ω (coeficiente de amortiguación) = 5%

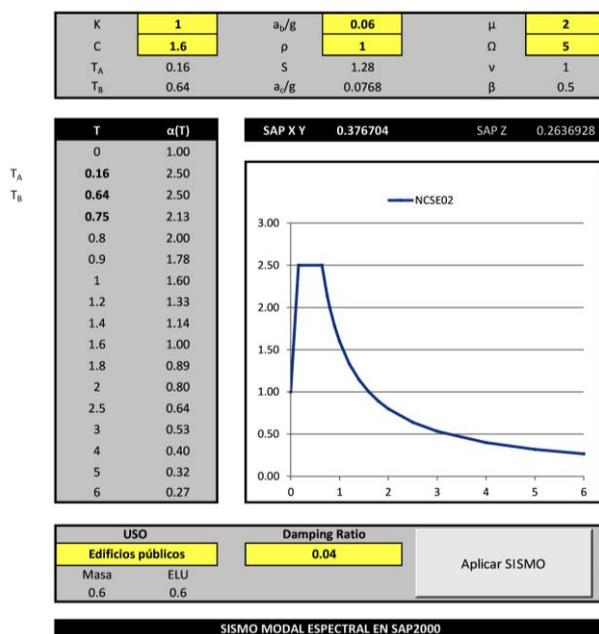


Tabla 6. Sismo Modal Espectral en SAP2000

Fuente: (Gallardo, 2021)

3.4 Estados Límite de Servicio (ELS)

Son aquellos tales que, si se sobrepasan, la estructura dejará de cumplir el cometido para el que fue proyectada por razones funcionales, de durabilidad o de aspecto, sin que ello suponga el colapso de la misma.

(Fomento, 2011)

Flechas

El Estado Límite de Deformación

Se debe verificar que la flecha vertical máxima correspondiente al valor frecuente de la sobrecarga de uso no supera los valores siguientes:

$L/1000$ en puentes de carretera

$L/1200$ en pasarelas o en puentes con zonas peatonales

Siendo L la luz del vano.

(Fomento, 2011)

Para el caso que nos ocupa abordaremos $L/1200$ al ser un puente que vincula calzadas de tráfico rodado y pasarela de peatones. El valor de L será considerado por la distancia que cubre el vano de 160 metros entre el estribo Norte y el empotramiento con el pilono, aunque el tablero en su extensión es de 180 metros, los 20 metros restantes están después del apoyo del tablero en la base del pilono y su posterior encuentro con el estribo Sur.

3.4.1 Estados límite últimos (ELU)

Son aquellos tales que, si se sobrepasan, se produce el agotamiento o colapso de la estructura o de una parte de ella.

3.4.2 Deformaciones (DEAD)

Eje Z

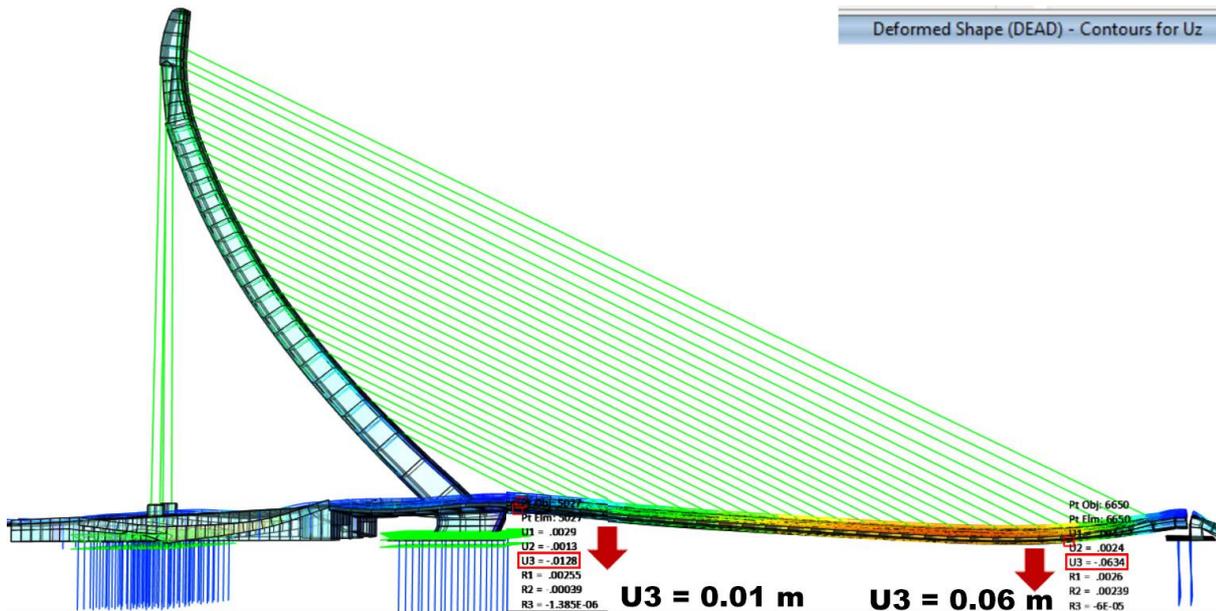


Lámina 1. Deformaciones DEAD (Peso Propio)

Fuente: Propia

Las deformaciones que experimenta la estructura sometida simplemente ante la acción que ejerce la gravedad (lámina 1) se manifiestan con una flecha máxima de 0.06 metros o en términos más concretos 6 centímetros, sin embargo para efectos del análisis de la estructura no tiene mucho sentido centrar el análisis en *DEAD* de manera aislada, esta carga es ineludible siempre va a estar puesto que es constitutiva de la estructura, la idea es analizar las reacciones en la estructura en función de las solicitaciones requeridas, como las acciones de la sobrecarga de uso o las acciones climáticas y una serie de combinaciones que permiten apreciar las deformaciones de la estructura en sus estados límite de servicio (ELS) y sus estados límite últimos (ELU).

3.4.3 Deformaciones (CMP)

Eje Z

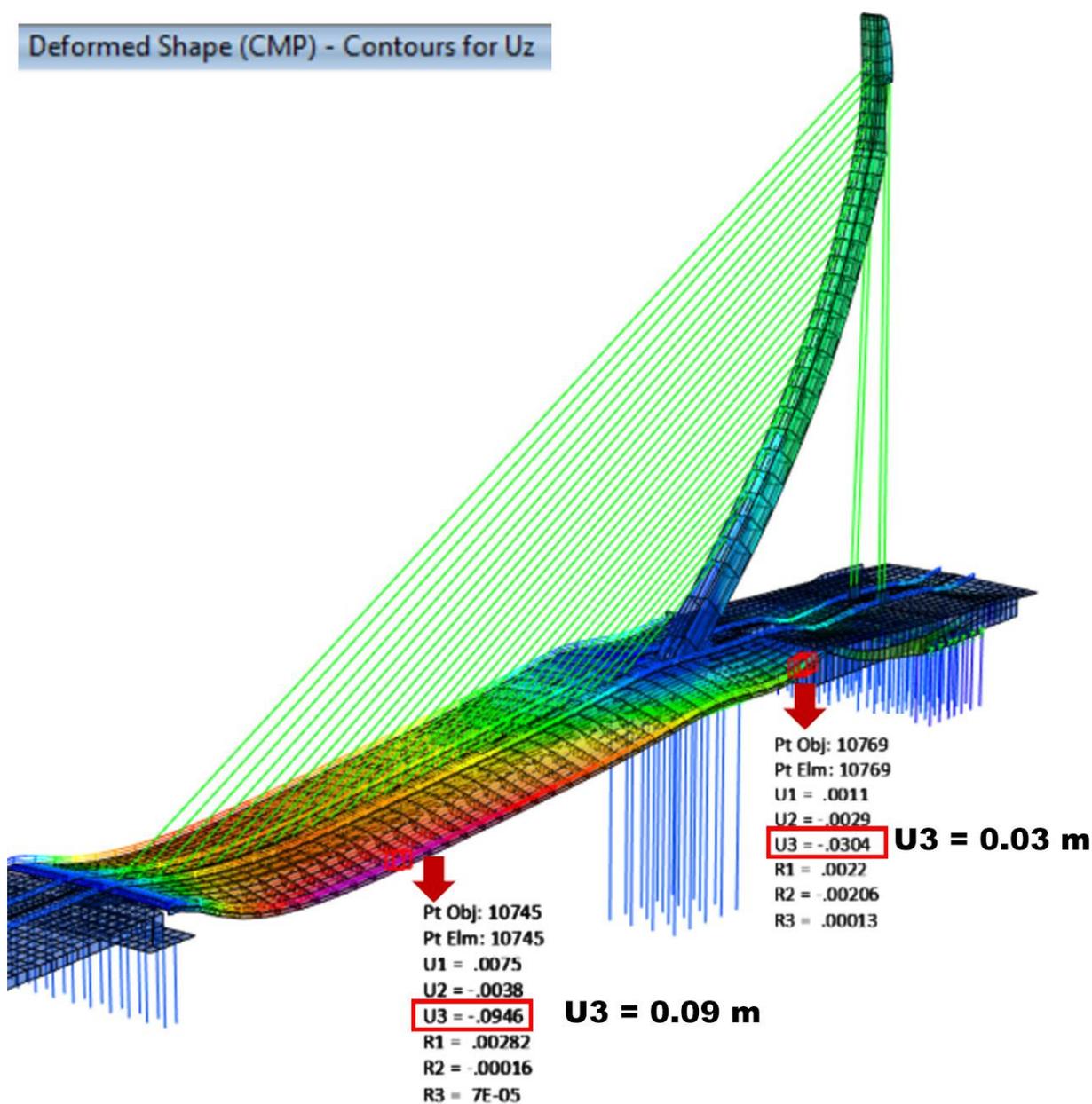


Lámina 4 Deformaciones CMP (Carga Muerta Permanente)

Fuente: Propia

Las deformaciones que experimenta la estructura sometida en la acción de carga muerta permanente (CMP) considerando además del peso propio los elementos no estructurales como pavimentos o barandillas expresan una flecha cercana a los 10 cm en los puntos más críticos del tablero (lámina 2).

3.4.4 Deformaciones (SCU)

Eje Z

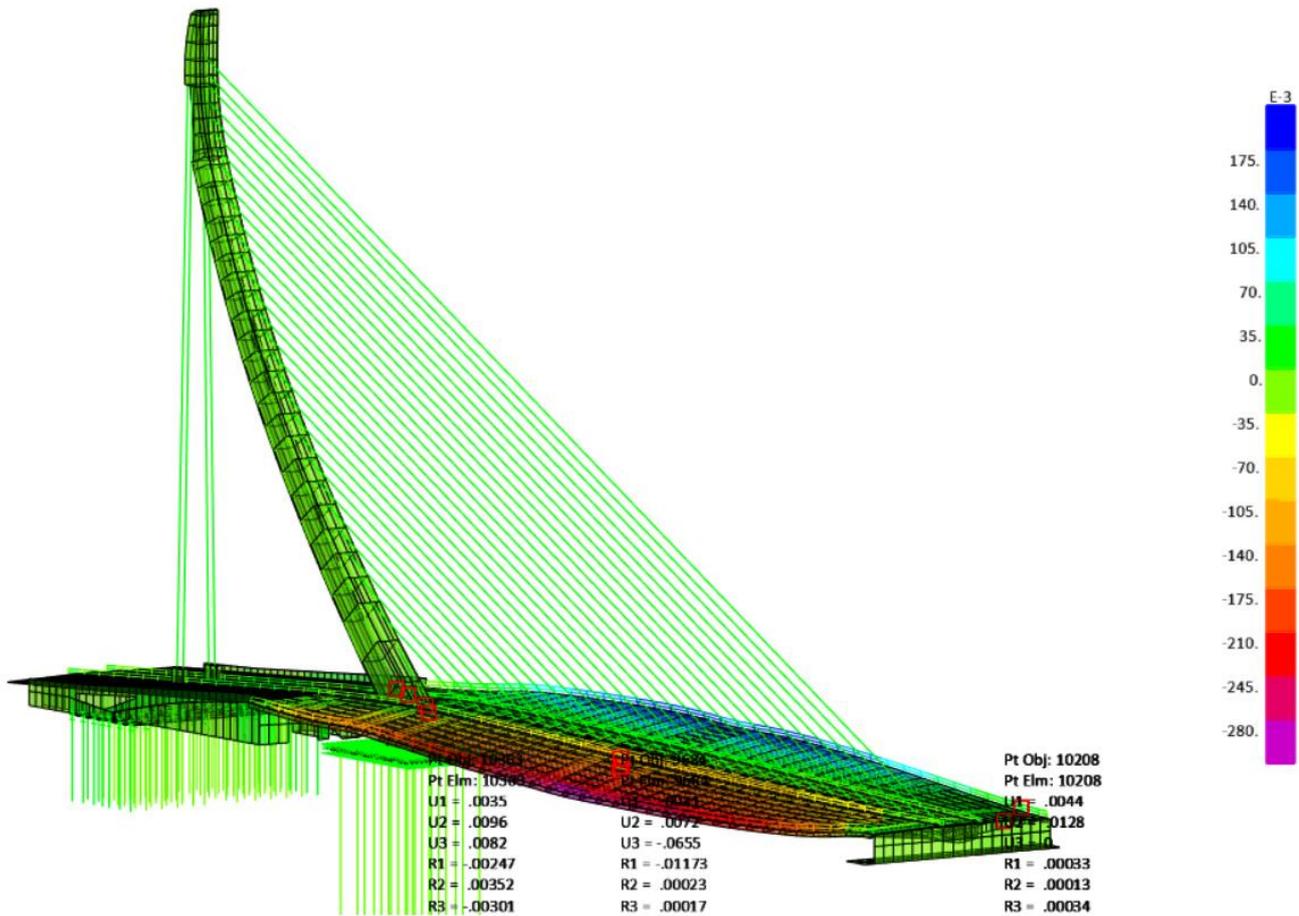


Lámina 5. Deformación en escala de colores SCU

Aumento gráfico x 20

Fuente: Propia

Las deformaciones producidas por la sobrecarga de uso (SCU) tiene especial interés mostrarla porque se expresa de manera contundente la flecha del tablero producto de la aplicación de cargas puntuales de carga pesada y cargas uniformemente distribuidas a lo largo del tablero. El aparato formal del tablero evidencia su punto de mayor deformación en el centro (lámina 3), sus extremos están articulados, en estos puntos la flecha es notablemente reducida. En

eje, los cables sustentan del tablero sin embargo, las cargas puntuales de carga pesada aplicadas, exponen el tablero al fenómeno de torsión (lámina 5) fundamentalmente se origina la torsión desde el centro del cajón, en consecuencia, se van desplazando en abanico las ménsulas, el ala izquierda del tablero (ejes a, b, c) experimenta una flecha de hasta 0.28 metros, en contraste el ala derecha (ejes e, f, g) experimenta una contraflecha de hasta 0.14 metros.

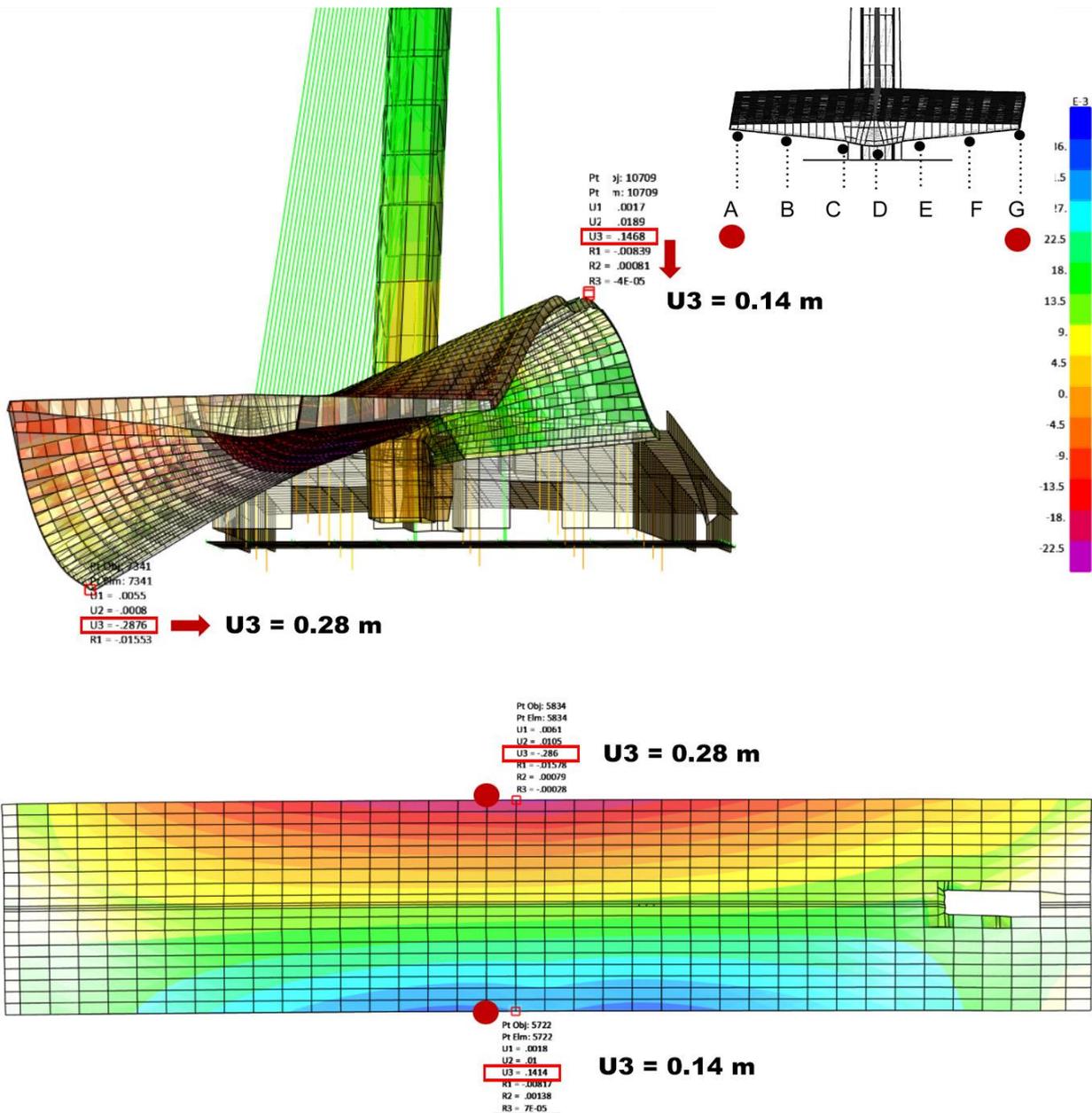


Lámina 7. Deformaciones SCU sección transversal y planta

Aumento gráfico x 80

Fuente: Propia

3.4.5 Deformaciones (SCN)

Eje Z

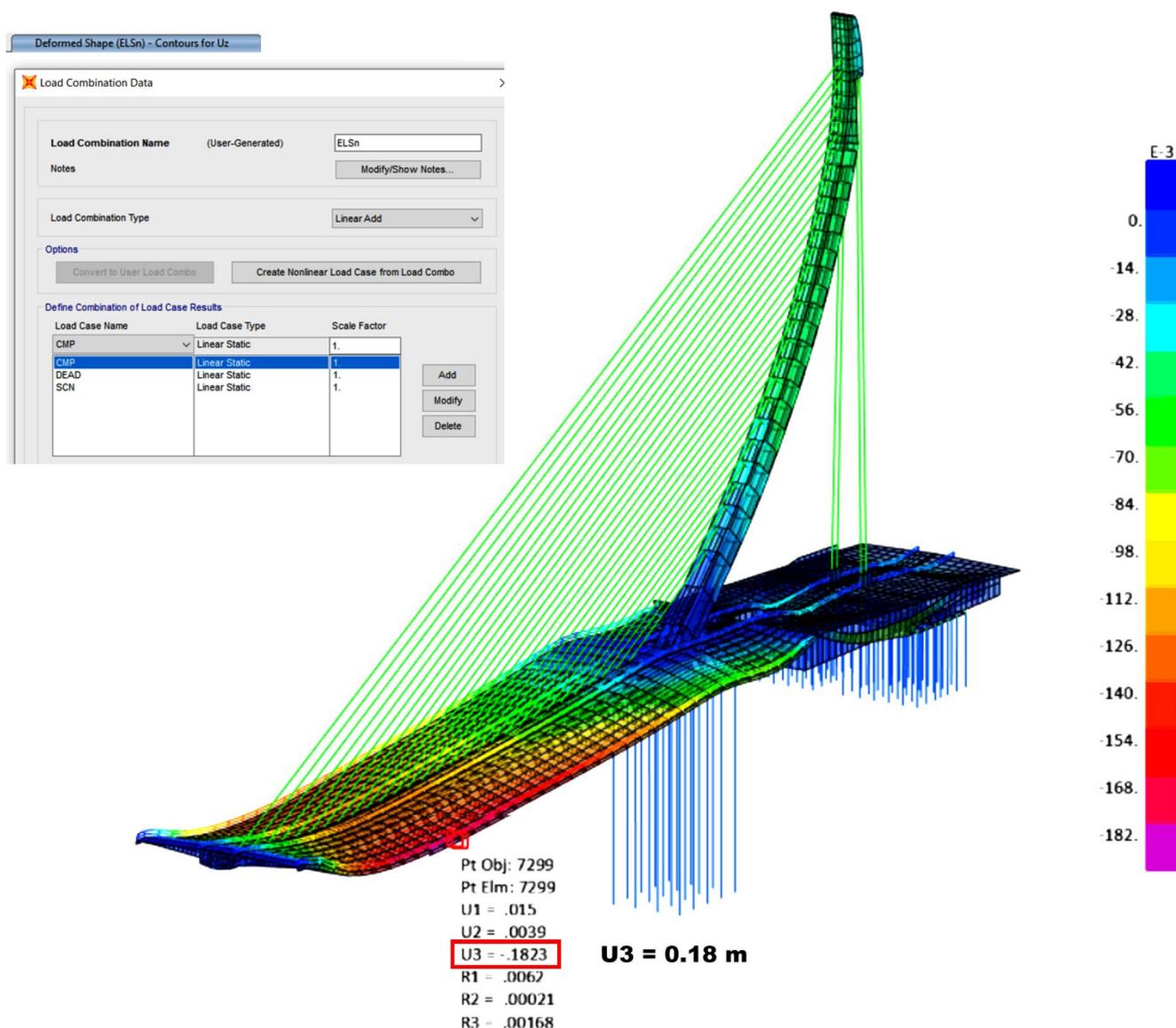


Lámina 8. Deformaciones SCN

Aumento gráfico x 50

Fuente: Propia

La acción de la nieve sobre la estructura por sí sola, no tiene un efecto considerable en las deformaciones sobre el puente, para valorar su impacto se establece la hipótesis que combina tres fuerzas en simultaneo actuando sobre el puente (lámina 6), por una parte el peso propio de la estructura (*DEAD*) más la carga muerta permanente incluido el peso de los componentes no

estructurales(CMP) y por último la carga de nieve (SCN), esta combinación denominada (ELSn) Estado Limite de Servicio + nieve, se aprecia que la mayor deformación que experimenta el tablero alcanza una flecha de 0.18 metros o 18 centímetros (lámina 7).

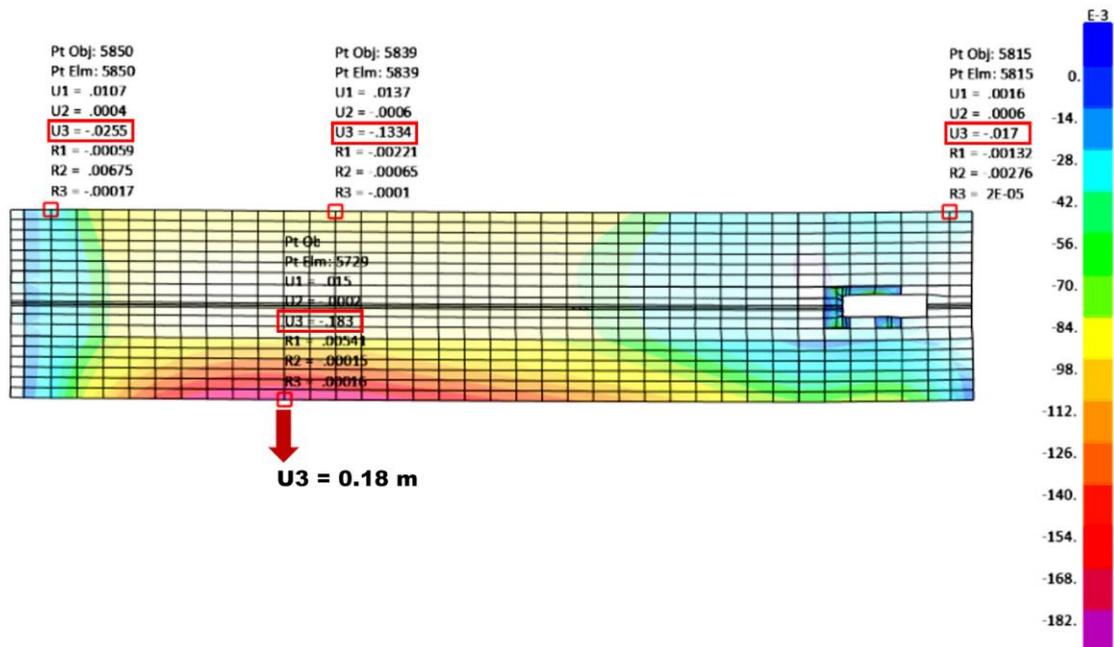


Lámina 9. Deformaciones SCN tablero (vista en planta)

Aumento gráfico x 50

Fuente: Propia

3.4.6 Deformaciones (SCV)

La acción del viento se valora por una parte en la combinación Estado límite de servicio viento en "x" y en "y" respectivamente (ELSVx) (ELSVy) estas combinaciones tienen en cuenta el peso propio de la estructura, la carga muerta permanente y el valor de la acción del viento calculada previamente.

3.4.7 Deformaciones (SCVx)

Combinación ELSvx

Eje X

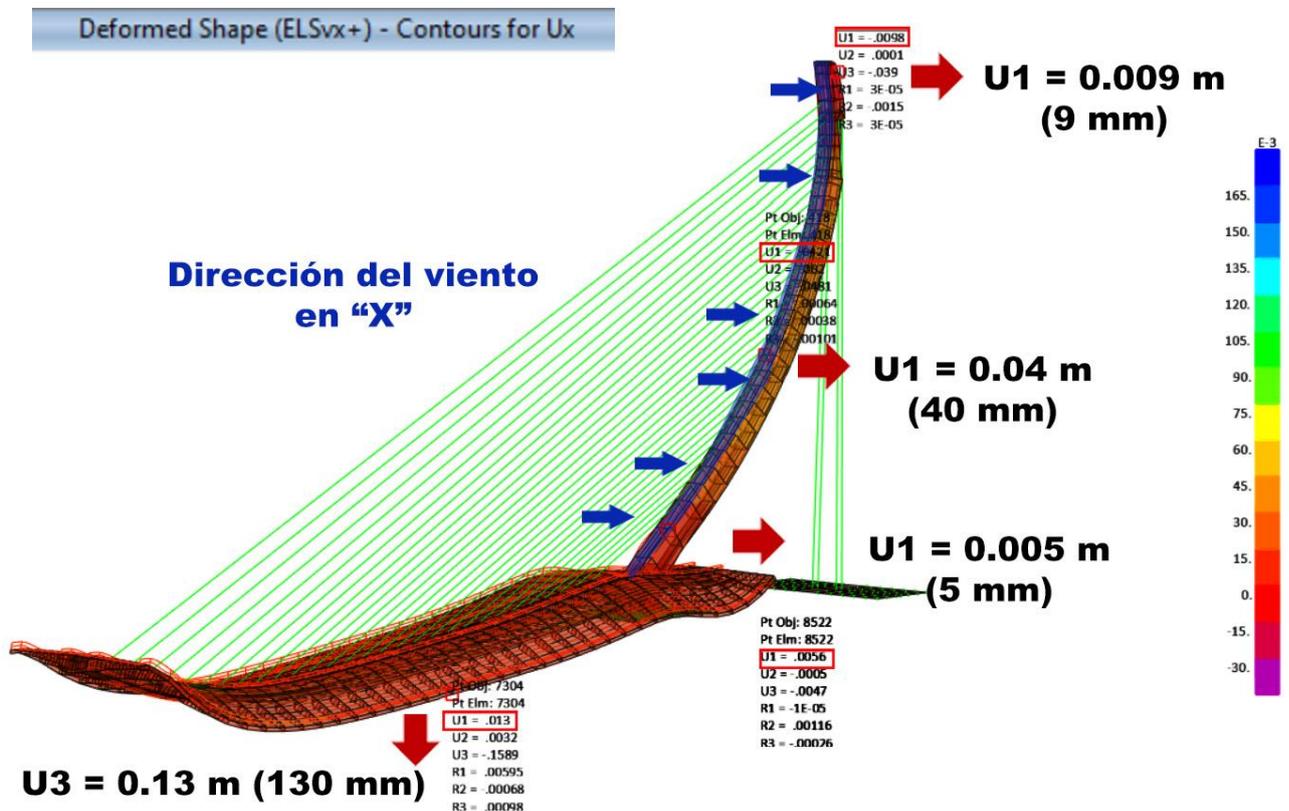


Lámina 10. Acción del viento (ELSVx)

Aumento gráfico x 100

Fuente: Propia

La acción del viento se considera especialmente la presión que ejerce sobre el pilono, se resalta el hecho de que en el eje "x" las mayores deformaciones están en el centro del pilono (lámina 8) alcanzando los 40 milímetros la deformada y no en su remate o coronación donde se percibe una deformada de 9 milímetros y en la zona próxima a la base zona de arranque del pilono registrando una deformada de apenas 5 milímetros.

3.4.8 Deformaciones (SCVy)

Combinación ELSvy

Eje Y

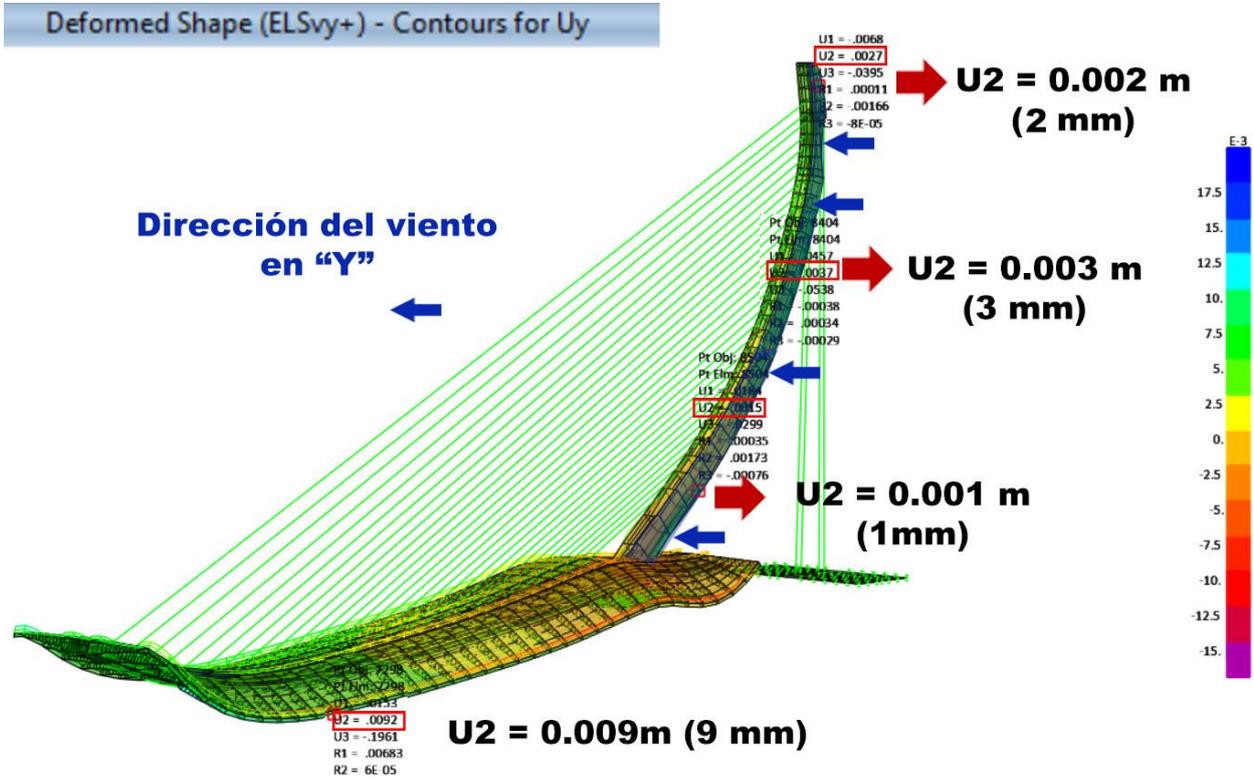


Lámina 11 Acción del viento (ELSVy)

Aumento gráfico x 100

Fuente: Propia

La acción que ejerce el viento sobre el eje "y" genera unas deformaciones considerablemente menores a las deformaciones que experimenta la estructura sobre el eje "x" con desplazamientos en coronación del pilono de dos milímetros y en el centro del mismo de solo tres milímetros demostrando que sobre este eje de la estructura la rigidez es mayor y por ende los desplazamientos son sensiblemente menores.

3.4.9 Sismo Modal

Espectro elástico de respuesta

La masa que interviene en el cálculo sísmico para la estructura, es esencial a la hora de determinar qué efecto están generando las vibraciones que en el caso de un puente, son capitales las vibraciones verticales es decir el sismo en el eje "Z" aplicando la combinación *ELUsim* la hipótesis que plantea el escenario más desfavorable que tiene en cuenta las siguientes cargas: (DEAD con valor de 1, CMP con valor de 1, SIMxyz con valor de 1, y SCU con un valor de 0,6) aunque el presente trabajo no pretende analizar en detalle el sismo, es interesante comprender los modos de vibración de la estructura aprovechando la configuración de la tabla de Sismo Modal Espectral (SIM). Es importante hacer trabajar toda o la mayor parte de la estructura para indicar cuanta masa se ha movilizado, para que sea tomado en cuenta el análisis Modal Espectral hay que garantizar que en cada eje (X/ Y/ Z) se movilice al menos el 90% para ello se deben incrementar los modos de vibración, definir cuantos modos de vibración queremos en función de que alcancemos el 90% por defecto SAP2000 incorpora 12 modos de vibración, en el ejercicio se en cada uno de los ejes, cada modo de vibración significa una frecuencia más alta en un periodo más pequeño correspondiendo entonces a modos más rígidos y se requiere mucho más tiempo para que el software calcule esos modos de vibración, con ello conseguimos mayor precisión y movilización de más masa en la estructura, para el ejercicio se hicieron varios intentos con el objetivo de movilizar más masa, en el primer intento se definieron 20 modos de vibración obteniendo unos resultados de escasa participación en la componentes "X" y "Y" y casi nula en la componente vertical "Z" (tabla 7) posteriormente se calculó mediante 50 modos de vibración, se obtuvieron resultados sensiblemente mejorados particularmente en el eje Z que paso de un 8% a un 17% de movilización, con la paciencia que se requiere para obtener los datos, porque el incrementar los modos de vibración aumenta sustancialmente el tiempo que requiere el programa para efectuar el cálculo de la estructura y como reitero, el análisis detallado frente a sismo no hace parte de los alcances del presente trabajo.

Aunque no se consigue obtener el 90% de movilización de masa, es evidente que el tipo de estructura reclama introducir más modos de vibración, sin embargo por el tiempo estimado, la premura y el compromiso desde una perspectiva más amplia y los objetivos particulares trazados en la investigación no permiten seguir indagando hasta poder obtener la movilización del 90% de masa en los tres ejes a efectos de ser válidos en un análisis riguroso de Sismo Modal Espectral, de todos modos es interesante comprender la movilización de masa alcanzados en la estructura con los 50 modos de vibración en los ejes:

$$X = 35\%$$

$$Y = 45\%$$

$$Z = 17\%$$

Deformed Shape (ELUsim - Max/Min)

Modal Load Participation Ratios

Units: As Noted
Filter:

	OutputCase	ItemType Text	Item Text	Static Percent	Dynamic Percent
▶	MODAL	Acceleration	UX	98.2982	34.3139
	MODAL	Acceleration	UY	99.3517	44.8189
	MODAL	Acceleration	UZ	53.5232	8.2979

**20
MODOS DE
VIBRACIÓN**

	OutputCase	ItemType Text	Item Text	Static Percent	Dynamic Percent
▶	MODAL	Acceleration	UX	98.5059	35.4083
	MODAL	Acceleration	UY	99.4213	45.2187
	MODAL	Acceleration	UZ	81.3959	17.1092

**50
MODOS DE
VIBRACIÓN**

Tabla 7. Movilización de masa comparativa alcanzada con 20 y 50 modos de vibración

Fuente: Propia

Básicamente, se analizan los modos de movilización de masa más significativos (tabla 8) en la muestra de 50 modos de vibración así:

Modo 14 en el eje “X” (con el 35% de movilización de la estructura)

Modo 7 en el eje “Y” (con el 45% de movilización de la estructura)

Modo 11 en el eje “Z” (con el 17% de movilización de la estructura)

Modal Participating Mass Ratios							
File View Edit Format-Filter-Sort Select Options							
Units: As Noted							
Filter:							
	OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
▶	MODAL	Mode	1	2.568538	3.406E-18	0.15671	4.447E-18
	MODAL	Mode	2	2.556888	0.15681	3.789E-19	6.886E-09
	MODAL	Mode	3	1.918203	2.156E-09	0.00323	2.044E-08
	MODAL	Mode	4	1.91447	2.367E-09	0.00317	3.132E-08
	MODAL	Mode	5	1.611195	1.578E-15	9.257E-05	3.33E-15
	MODAL	Mode	6	1.602489	7.946E-07	0.01848	0.00066
	MODAL	Mode	7	1.494063	9.52E-06	0.11827	6.858E-05
	MODAL	Mode	8	0.858933	1.546E-05	0.00139	0.00022
	MODAL	Mode	9	0.762888	3.838E-09	0.00021	7.707E-09
	MODAL	Mode	10	0.761863	2.457E-09	0.00021	1.261E-10
	MODAL	Mode	11	0.716992	0.00722	1.093E-06	0.07889
	MODAL	Mode	12	0.672054	4.93E-05	0.00196	0.0001
	MODAL	Mode	13	0.612198	5.477E-05	0.03679	6.272E-05
	MODAL	Mode	14	0.598349	0.17753	9.691E-07	5.312E-05
	MODAL	Mode	15	0.590845	0.00051	0.04332	7.586E-05

Tabla 8. Modos de vibración más significativos en las componentes “X”, “Y” y “Z”

Fuente: Propia

Modo de vibración 14 (componente en “X”). Es el más representativo de la muestra en el eje X con un valor de 0,17. En apariencia, la movilización de masa experimenta un alabeo sobre los bordes libres del tablero del puente sobre este eje (lámina 10).

Modo de vibración 7 (componente en “Y”). El modo 7 es de especial interés sobre el eje Y con un valor de 0,07 de movilización de masa, reproduce un efecto de giro o desplazamiento del tablero con mayor grado en los puntos de articulación con el estribo Norte (lámina 11) también describe un ligero efecto de torsión sobre el pilono.

Modo de vibración 11 (componente en “Z”) El eje Z concentra la mayor movilización de masa en el registro de los cincuenta modos de vibración, se da en el modo 11 con un valor de 0,07 a efectos de visualización, presenta un desplazamiento de la masa sobre la componente vertical reproduciendo una deformada del tablero que se acentúa en el centro del vano (lámina 11).

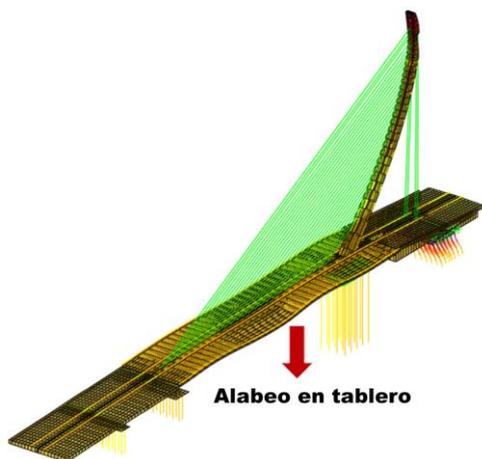


Lámina 12. Alabeo en modo de vibración 14 (eje X)

Fuente: Propia

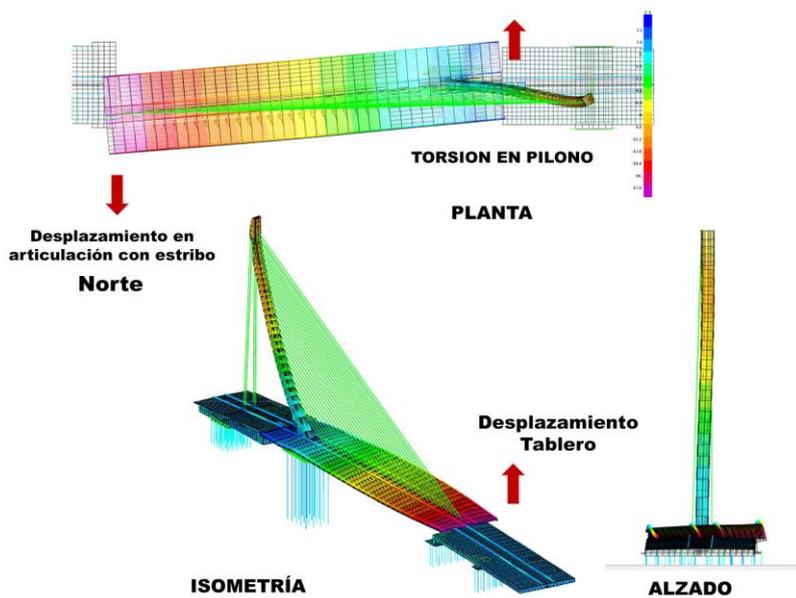


Lámina 13. Giro en modo de vibración 7 (eje Y)

Fuente: Propia

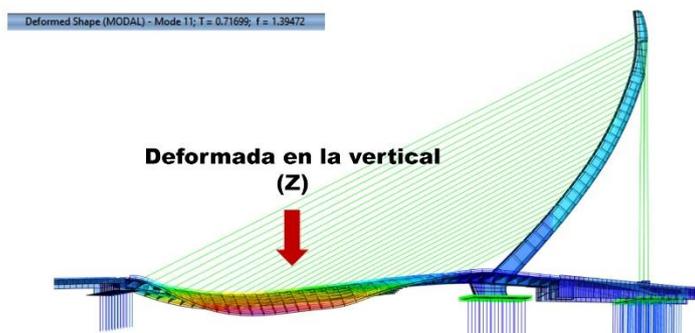


Lámina 14. Vibración vertical en modo 11 (eje Z)

Fuente: Propia

3.5 Deformaciones Resultantes, Modelo Original Detallado

Estado Límite de Servicio último (ELSu)

Eje X

Las deformaciones en el eje cartesiano X son motivadas en esencia por los tipos de apoyo del tablero del puente, un apoyo fijo en el empotramiento tablero-pilono y dos apoyos articulados en los dos extremos del tablero, registrando unas deformaciones de 0,01 metros o 10 milímetros, comprendidas en los ejes 1, 2 y 3 (desde el estribo norte hasta el centro del tablero). Las deformaciones que experimenta el pilono en el eje X alcanzan su mayor flecha de 0,05 metros o 50 milímetros y esta se genera en el centro del pilono (*ver tabla de deformaciones resultantes, eje 6*).

Eje Y

Las mínimas deformaciones en el eje cartesiano Y demuestran que la basta rigidez de la estructura sobre este plano, registrando unos valores promedio de 0,01 metros o 10 milímetros de flecha.

Eje Z

La magnitud que determina la deformación vertical (eje cartesiano "Z") de la estructura del puente, es la poderosa luz que cubre un vano de 160 metros de longitud. La máxima deformación se da en el centro del tablero (eje 3), para ser rigurosos en el cálculo de cumplimiento a flecha se toma como referencia el nodo concéntrico de intersección que se establece entre el eje longitudinal "3" (el centro del vano) y el eje transversal "D" (centro del puente sentido transversal) este nodo experimenta una flecha máxima de 0.13 metros o 13 centímetros, este nodo es importante porque coincide con la alineación de los cables de atirantamiento central del tablero. Sin embargo el tablero experimenta flechas mayores si bien en el centro del vano con una tendencia mayor hacia uno de los

bordes (eje transversal "A") alcanzo así el tablero su deformación máxima de 0.39 metros o 39 centímetros en Estado Limite de Servicio último (ELSu), una hipótesis que combina Carga muerta permanente (CMP) con un factor de escala de 1.35, Carga de peso propio (DEAD) con un factor de escala igual (1.35) y especial interés en la sobrecarga de uso (SCU) con un factor de escala de 1.50. La razón de ser de este desplazamiento en el tablero de 0.39 metros, es consecuencia de la sujeción del tablero en un único eje central que expone dos grandes ménsulas en voladizo de 14 metros a cada lado. Las líneas de tendencia de deformación del puente con sus mínimos y máximos se expresan (lámina 13)

En adelante se exponen las tablas con las deformaciones resultantes (tablas de 9 a 15) en la combinación ELSu sobre cada uno de los ejes determinados a criterio propio para analizar el aparato formal del puente, es decir estudiar la relación entre organización formal y su capacidad resistente por medio de la observación.

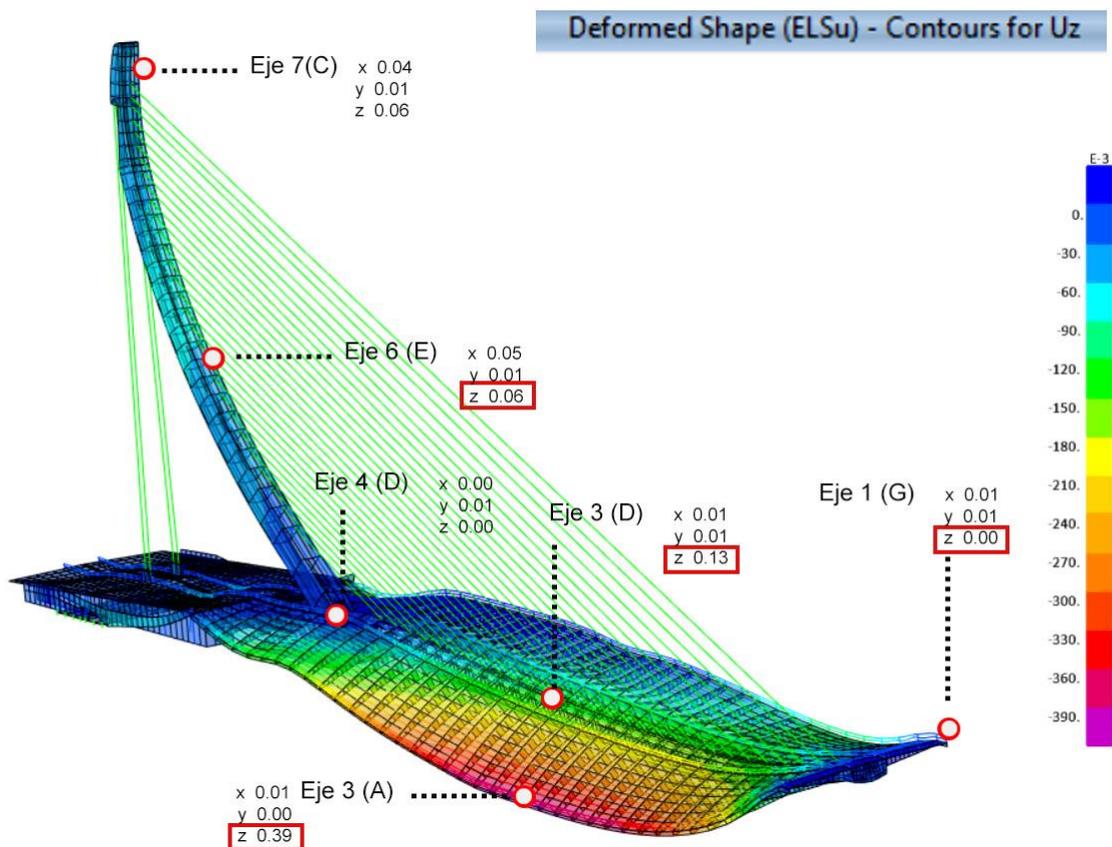
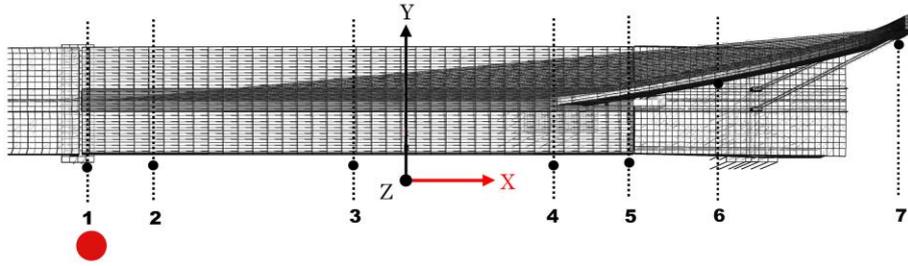


Lámina 15. Deformada, Modelo original (ELSu)

Aumento gráfico x 50

Fuente: Propia



Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo original detallado

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección Eje 1						
A	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
C	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
D	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
E	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
F	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
G	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00

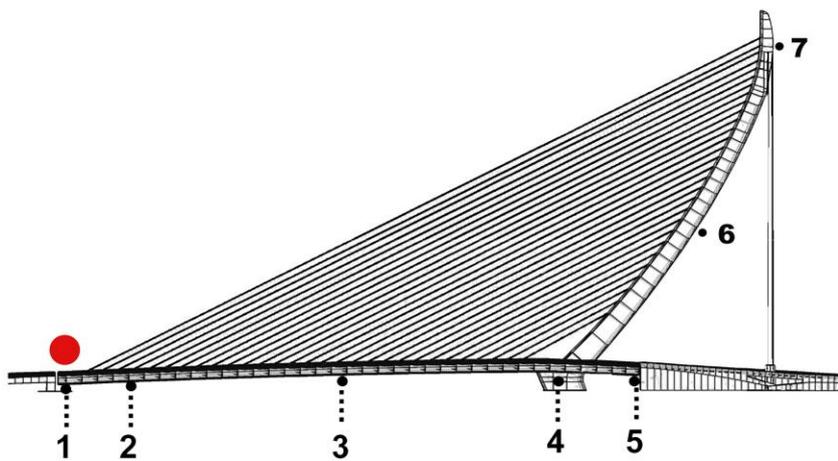
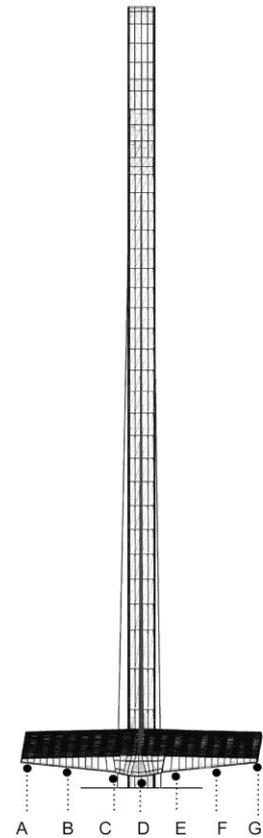
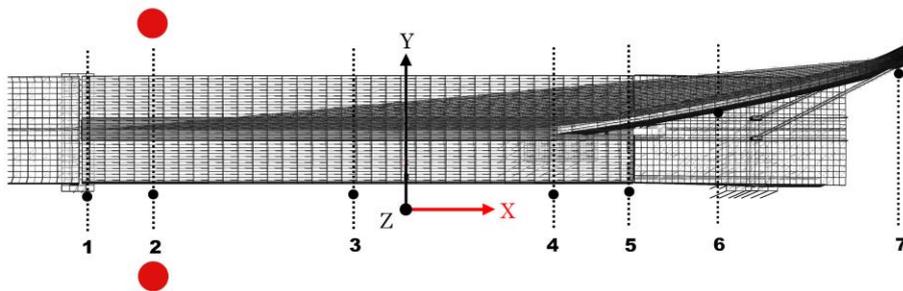


Tabla 9. Deformaciones Resultantes Eje 1 (ELSu)

Fuente: Propia



Cuadro de deformaciones

Tabla : Deformación y rotación del modelo original detallado

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 2

A	0.01	0.01	0.00	0.00	0.27	0.00
B	0.01	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00
C	0.01	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00
D	0.01	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00
E	0.01	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
F	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00
G	0.01	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00

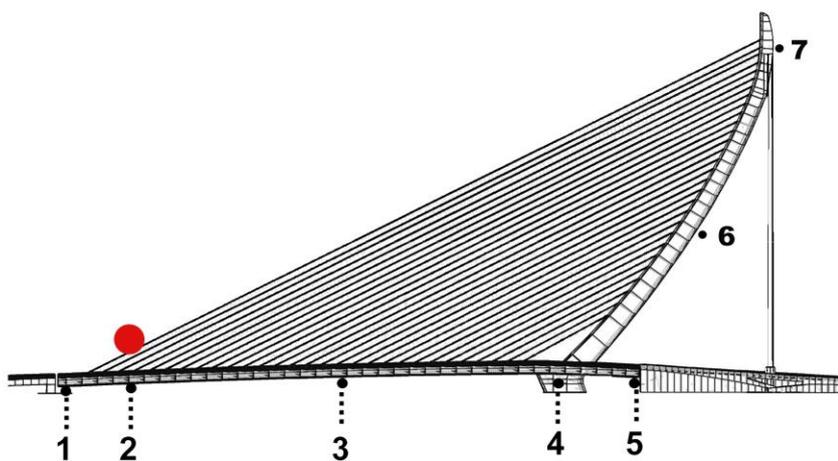
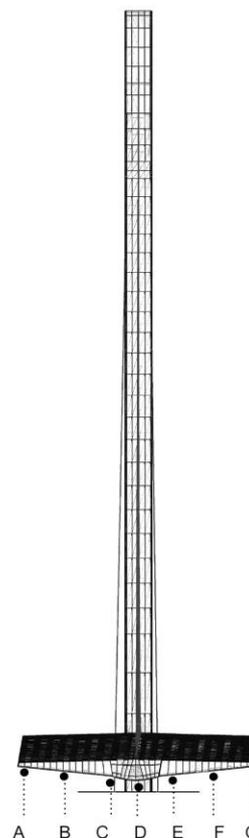
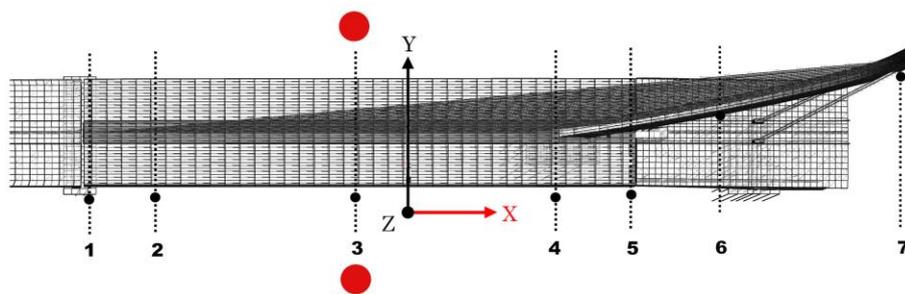


Tabla 10. Deformaciones Resultantes Eje 2 (ELSu)

Fuente: Propia



Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo original detallado

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección Eje 3						
A	0.01	0.01	0.00	0.00	0.39	0.00
B	0.01	0.01	0.01	0.00	0.27	0.00
C	0.01	0.01	0.01	0.00	0.17	0.00
D	0.01	0.01	0.01	0.00	0.13	0.00
E	0.01	0.00	0.01	0.00	0.08	0.00
F	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
G	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00

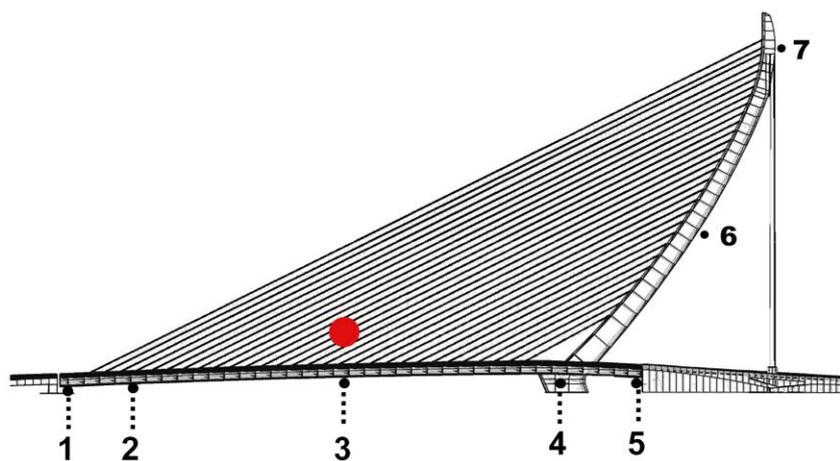
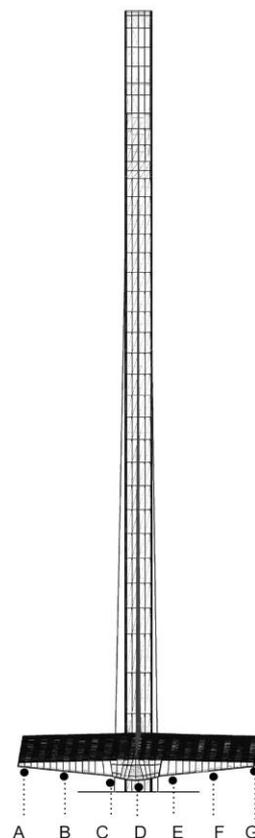
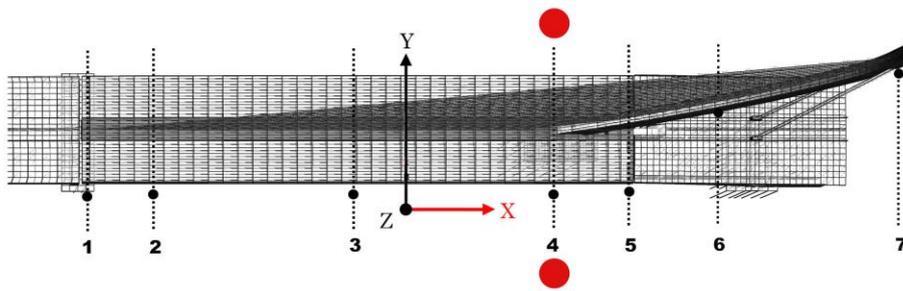


Tabla 11. Deformaciones Resultantes Eje 3 (ELSu)

Fuente: Propia



Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo original detallado

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 4

A	0.00	0.01	0.01	0.00	0.12	0.00
B	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00
C	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
D	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
E	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
F	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
G	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00

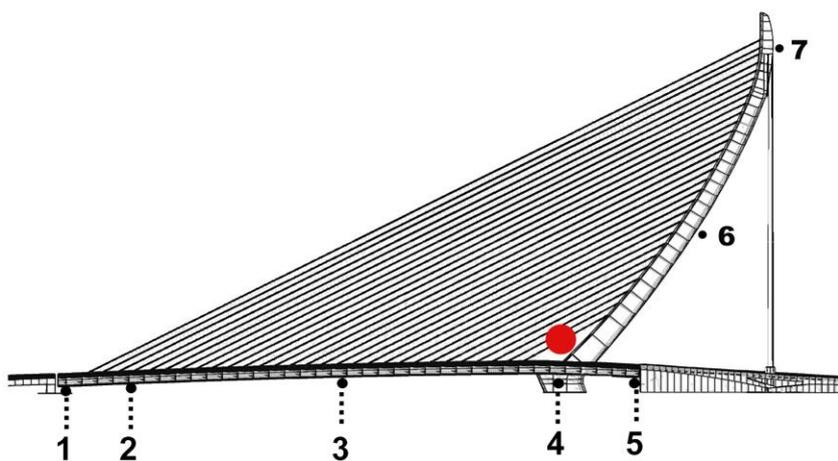
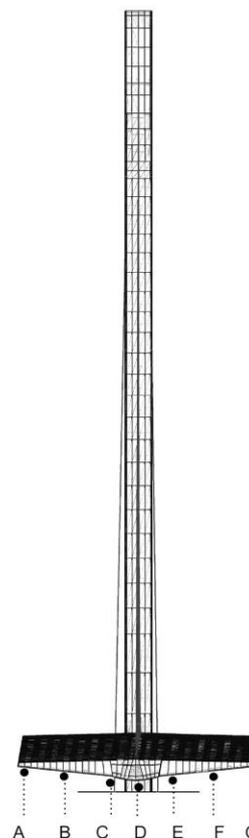
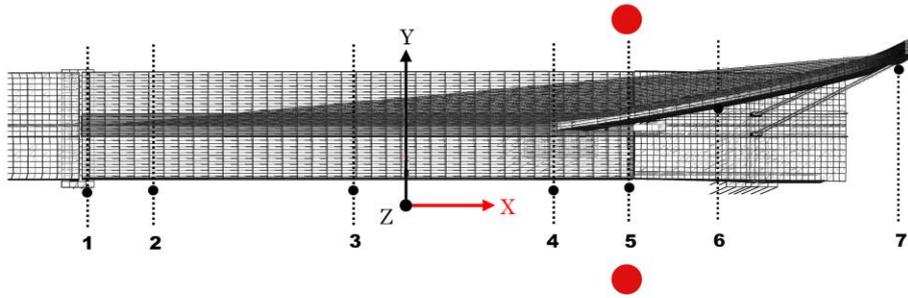


Tabla 12. Deformaciones Resultantes Eje 4 (ELSu)

Fuente: Propia



Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo original detallado

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 5

A	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
D	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
E	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
F	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
G	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00

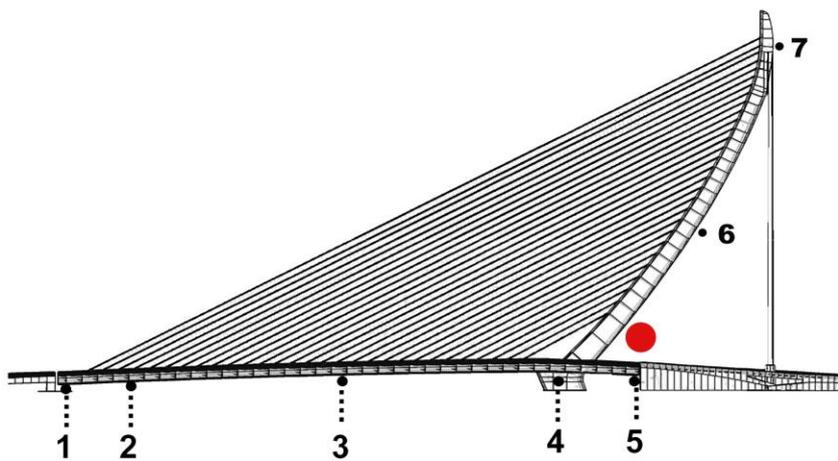
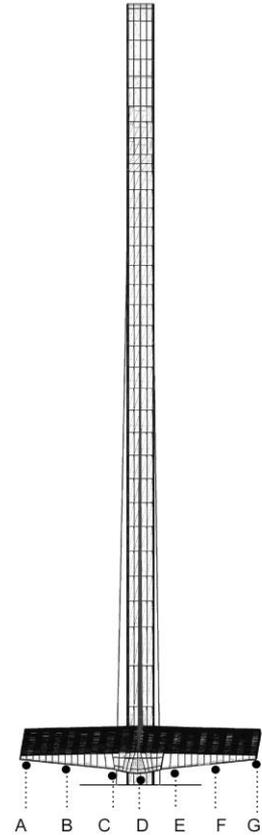
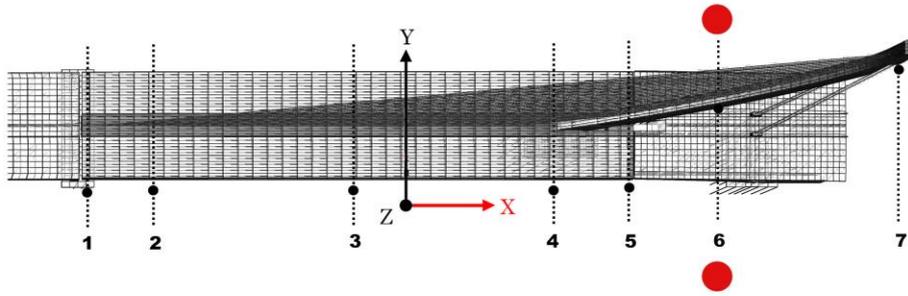


Tabla 13. Deformaciones Resultantes Eje 5 (ELSu)

Fuente: Propia



Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo original detallado

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección Eje 6						
C	0.04	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00
D	0.04	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00
E	0.05	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00

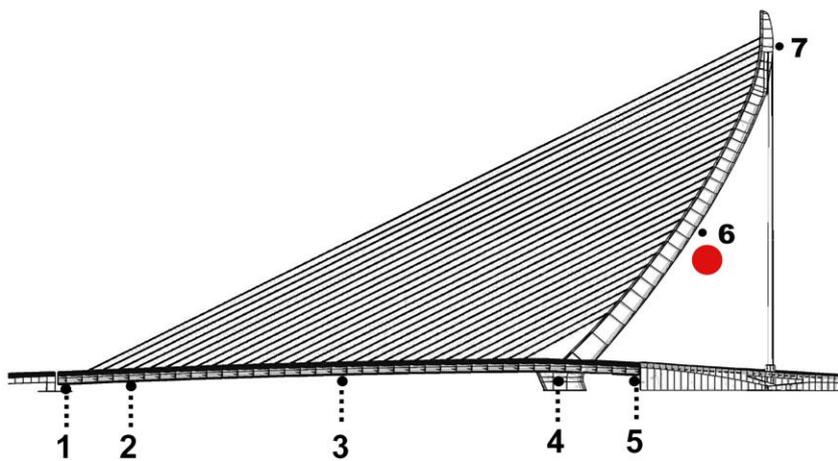
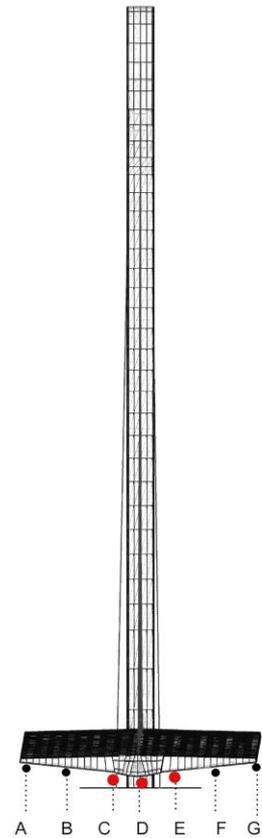
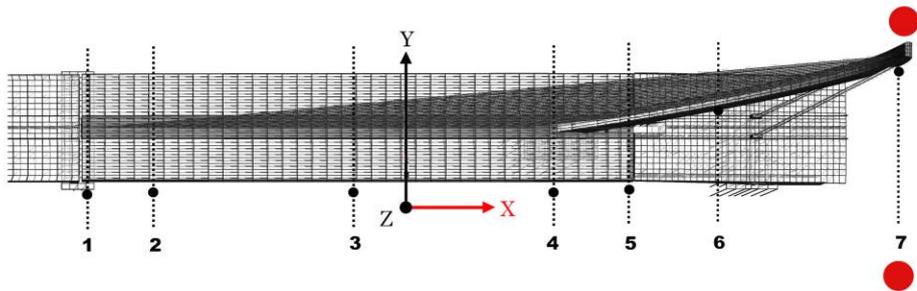


Tabla 14. Deformaciones Resultantes Eje 6 (ELSu)

Fuente: Propia



Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo original detallado

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección Eje 7						
C	0.04	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00
D	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
E	0.02	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00

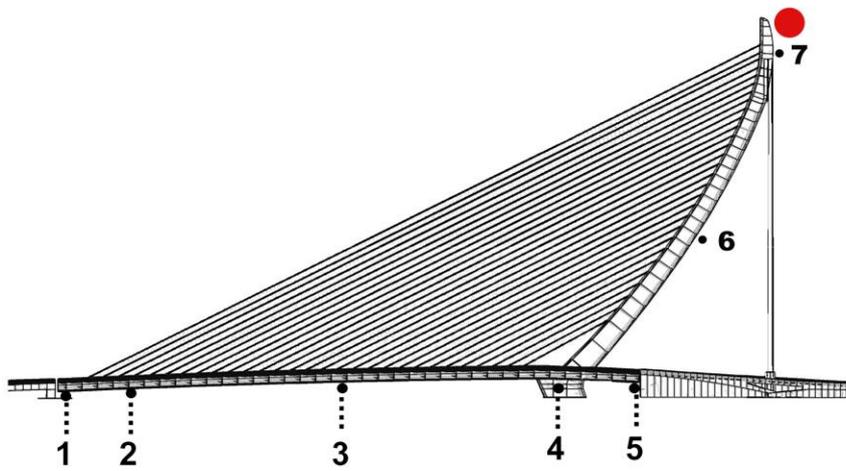
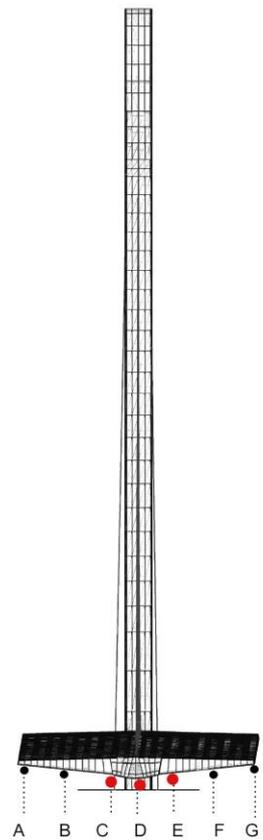


Tabla 15. Deformaciones Resultantes Eje 7 (ELSu)

Fuente: Propia

3.5.1 Comprobaciones, Modelo Original Detallado

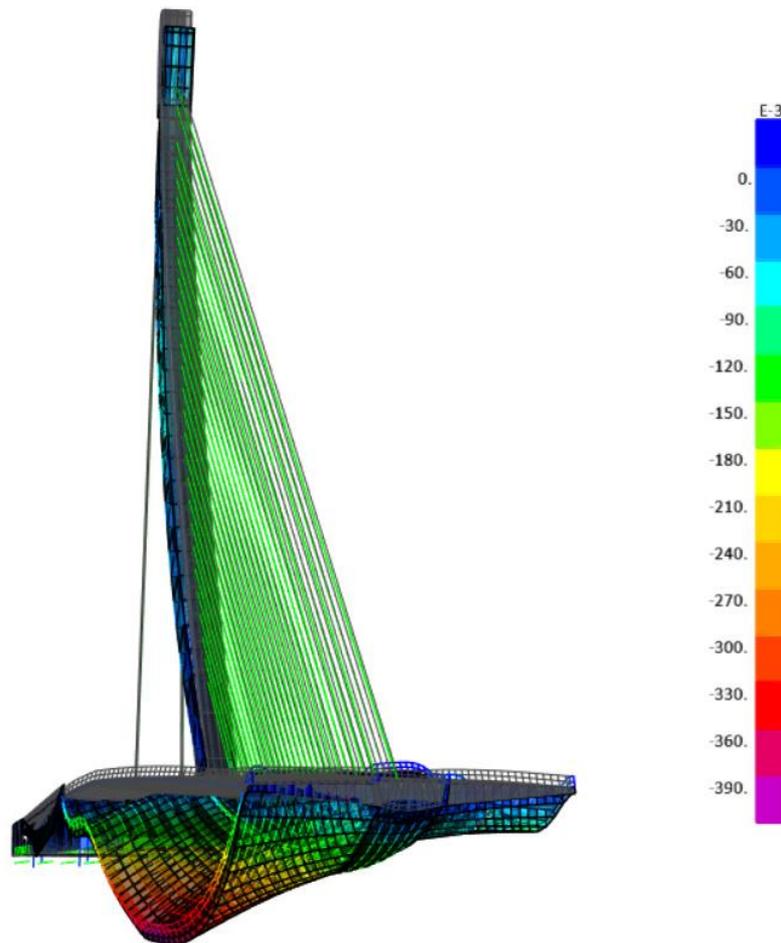


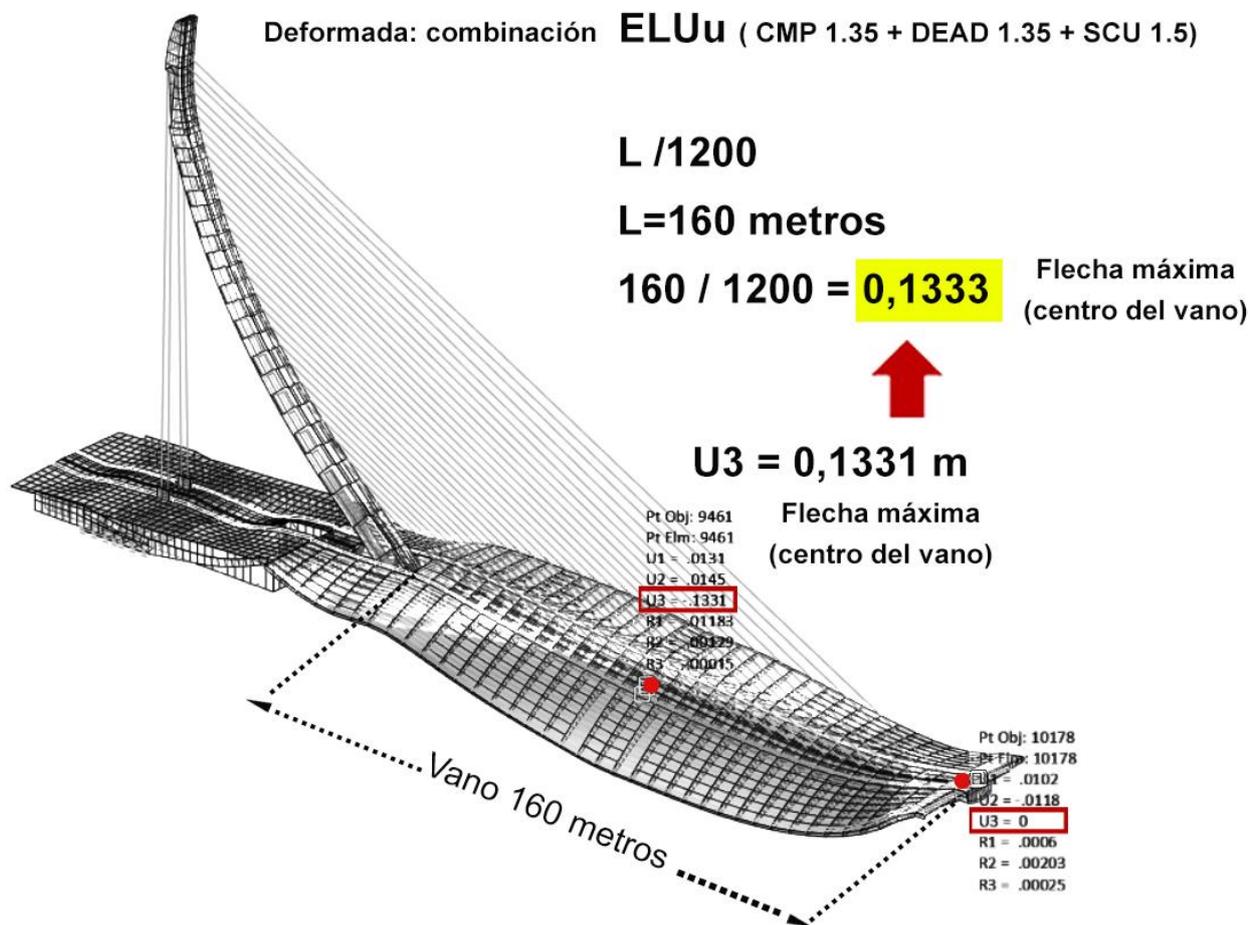
Lámina 16. Deformada (ELSu) y superposición de la estructura en estado indeformable

Aumento gráfico x50

Fuente: Propia

Para efectos de comprobación de flecha (lámina 14), se consideraron dos puntos de flexión estratégica en el centro del tablero: El primer nodo es el que registra la mayor deformación (0.13 metros) desde el centro del vano, entre el eje 3 y el eje D, el segundo nodo representativo es el de la menor deformación experimentada por el tablero de valor cero en el estribo norte entre los ejes 1 y "D" respectivamente. Se procede entonces a aplicar el factor $L/1200$ de la normativa Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11) (ver lámina 15)

Modelo Original Detallado



7.1 CRITERIOS FUNCIONALES RELATIVOS A FLECHAS

7.1.1 ESTADO LÍMITE DE DEFORMACIONES

Se deberá verificar que la flecha vertical máxima correspondiente al valor frecuente de la sobrecarga de uso no supera los valores siguientes:

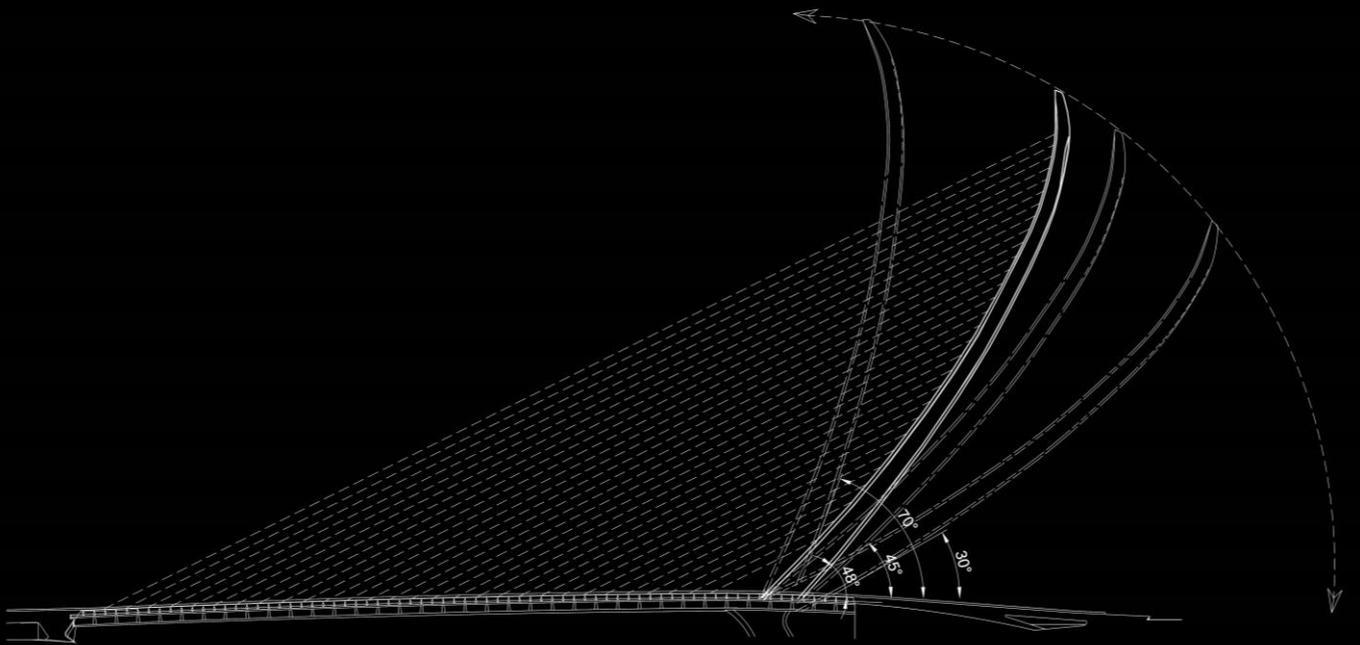
- $L / 1000$ en puentes de carretera
 - $L / 1200$ en pasarelas o en puentes con zonas peatonales
- siendo L la luz del vano.

Fuente: Propia

Lámina 17. Comprobación de Flecha Modelo Original Detallado

Aumento gráfico x 50

Criterios funcionales relativos a flechas (Fomento, 2011)



EN LA BÚSQUEDA DE LA DISPOSICIÓN FORMAL EFECTIVA

Transición, variantes de orientación en el espacio del pilono

Fuente: Propia

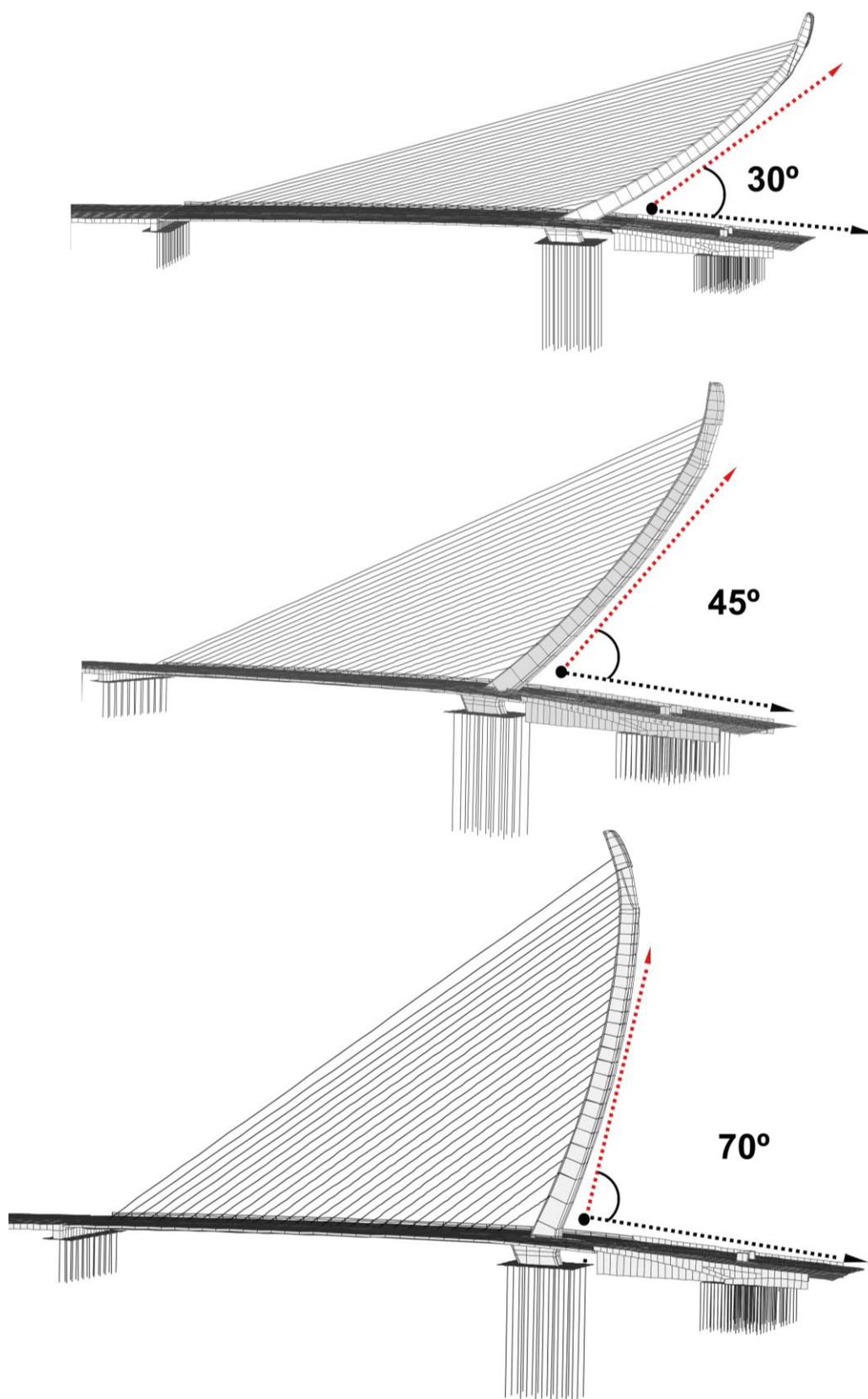


Lámina 18. Variantes al modelo detallado

Fuente: Propia

3.5.2 Transición del Modelo Detallado

Se generan tres variantes alternativas (lámina 16) alterando el modelo original detallado, la transición se centra en la orientación espacial del pilono para descubrir si existe una relación de proporcionalidad entre la inclinación del pilono y la flecha que experimenta el tablero, con el fin de encontrar “la forma efectiva” en el sentido de evidenciar si la apertura o disminución del mástil o pilono puede contrarrestar o por el contrario, aumentar las deformaciones del tablero.

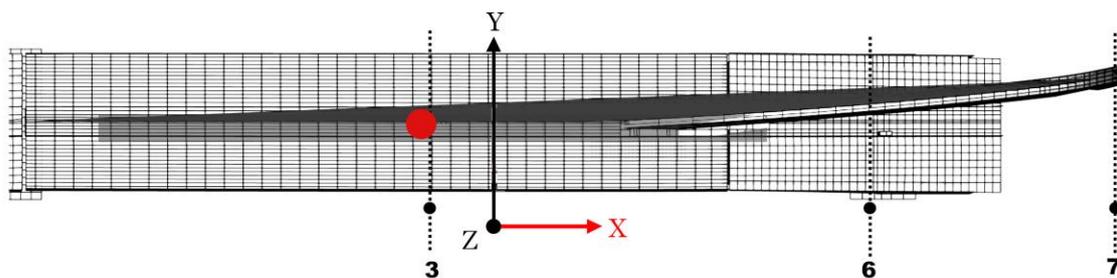
Por otro lado, el ejercicio se ve motivado por observar las deformaciones que experimenta el pilono al clausurar o suprimir los cables de la retenida, con las variantes incluidas en la rotación del mismo pilono y por último se comparan los esfuerzos de axiles que experimentan los cables de atirantamiento central del modelo original y de las variantes planteadas.

3.5.3 Variante 1: El Pilono orientado en un ángulo de 30°

La primera variante, consiste en orientar el pilono en un ángulo de 30°, se analiza mediante la hipótesis *ELSu* y se valoran las máximas deformaciones alcanzadas especialmente en la componente vertical eje “Z”.

Es la orientación más esforzada y atrevida formalmente, al ser la más inclinada reduce la altura efectiva del pilono que pasa de los 125 metros a registrar 96 metros en la vertical, aunque la reducción en altura está motivada por el giro de rotación, la longitud constitutiva del pilono se mantiene igual a la del modelo original, en este sentido, la reducción efectiva de la componente vertical favorece la extensión de la componente horizontal proyectando la corona del pilono por fuera de los límites del estribo sur.

El impacto de esta disposición formal resulta desafortunada para la estructura, pues incrementa las deformaciones en el tablero y el mismo pilono (ver tablas 16,17 y 18), haciendo imposible cumplir la flecha máxima admisible para puentes de carretera en Estado límite de Servicio (ver lámina 17).



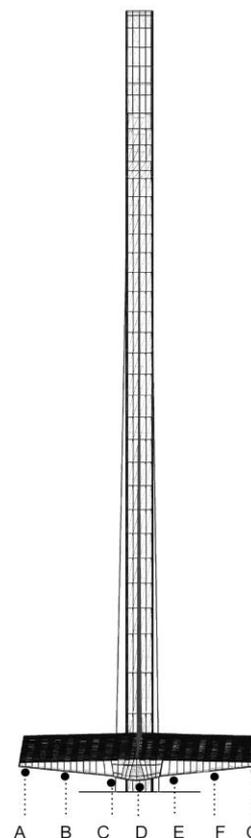
Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo variante pilono 30°

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 3

A	0.02	0.01	0.00	0.00	0.52	0.00
B	0.01	0.01	0.00	0.00	0.39	0.00
C	0.02	0.01	0.00	0.00	0.29	0.00
D	0.02	0.01	0.00	0.00	0.24	0.00
E	0.02	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
F	0.02	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00
G	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00



Pilono: Ángulo 30°

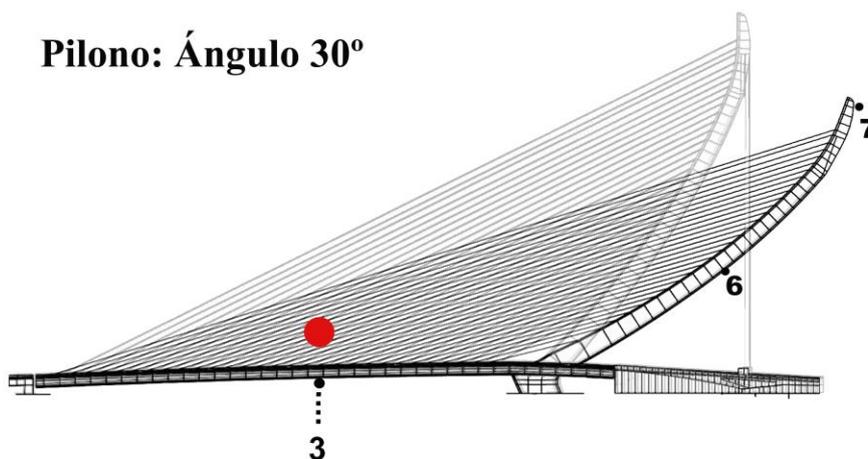
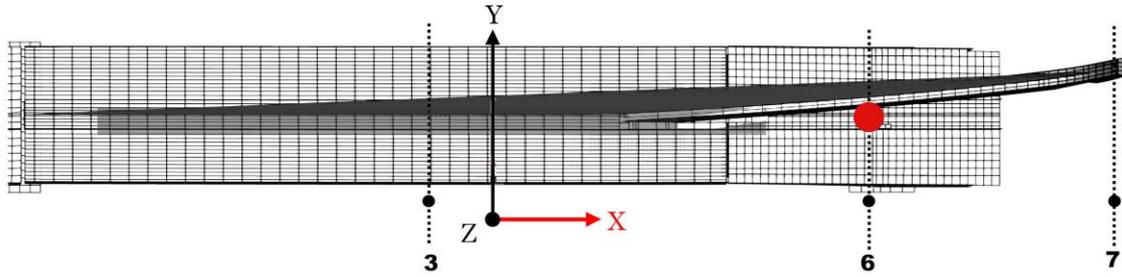


Tabla 16. Pilono 30°: Deformaciones Resultantes Eje 3 (ELSu)

Fuente: Propia



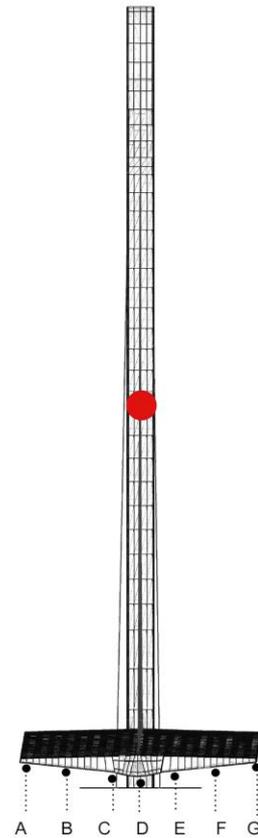
Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo variante pilono 30°

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 6

C	0.08	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00
D	0.08	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00
E	0.08	0.01	0.00	0.00	0.17	0.00



Pilono: Ángulo 30°

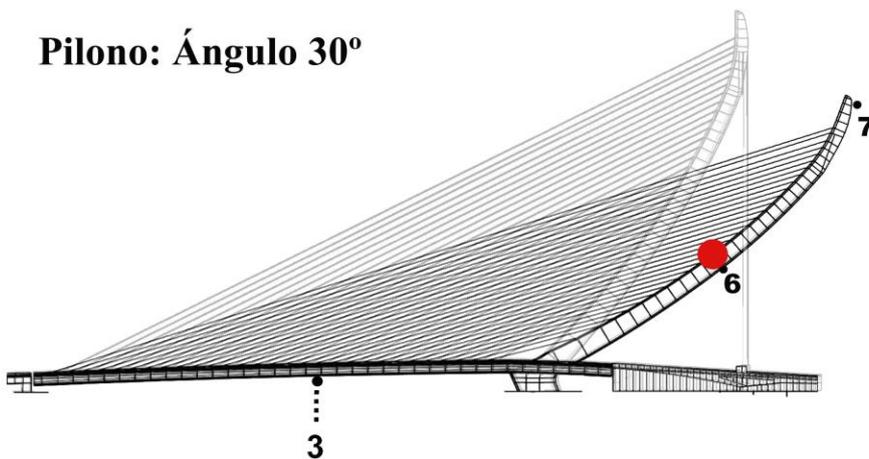
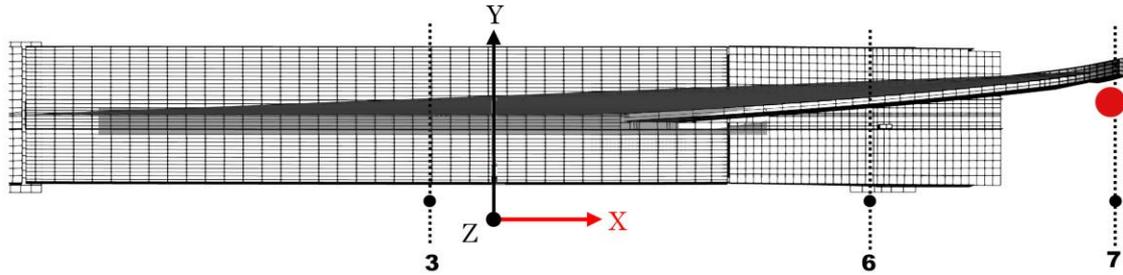


Tabla 17. Pilono 30°: Deformaciones Resultantes Eje 6 (ELSu)

Fuente: Propia



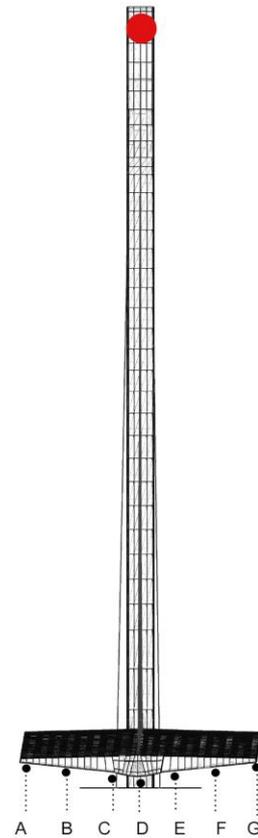
Cuadro de deformaciones

Tabla : Deformación y rotación del modelo variante pilono 30°

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 7

C	0.03	0.00	0.05	0.00	0.13	0.00
D	0.03	0.00	0.05	0.00	0.13	0.00
E	0.03	0.00	0.05	0.00	0.14	0.00



Pilono: Ángulo 30°

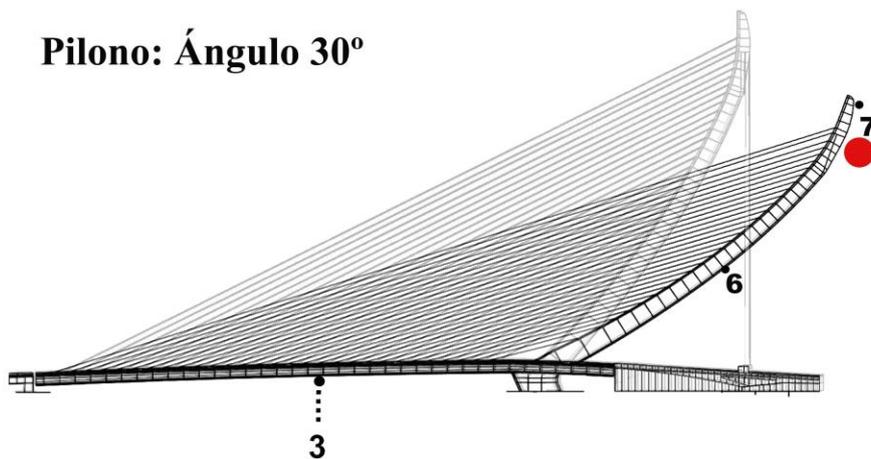


Tabla 18. Pilono 30°: Deformaciones Resultantes Eje 7 (ELSu)

Fuente: Propia

Se observan de manera estratégica tres ejes donde se presentan las mayores deformaciones de la estructura, así, esta variante reproduce una flecha en la componente “Z” de 0,24 metros en el centro del tablero y sobre uno de los extremos del tablero la flecha aumenta hasta los 0,52 metros (ver tabla 16). El pilono además de no contar con el contra-atirantado de la retenida y la esforzada inclinación, registra en su centro desplazamientos máximos de 0,17 metros en la componente vertical “Z” y también registra movimientos en las componentes “X” y “Y” sensiblemente menores de 0,05 metros (50 milímetros) y 0,08 metros (80 milímetros) respectivamente (ver tablas 17 y 18).

Modelo Detallado: Variante giro Pilono 30 °

Deformada: combinación **ELUu** (CMP 1.35 + DEAD 1.35 + SCU 1.5)

L / 1200

L=160 metros

160 / 1200 = 0,1333 Flecha máxima admisible
(centro del vano)

U3 = 0,2470 m
Flecha máxima registrada
(centro del vano)

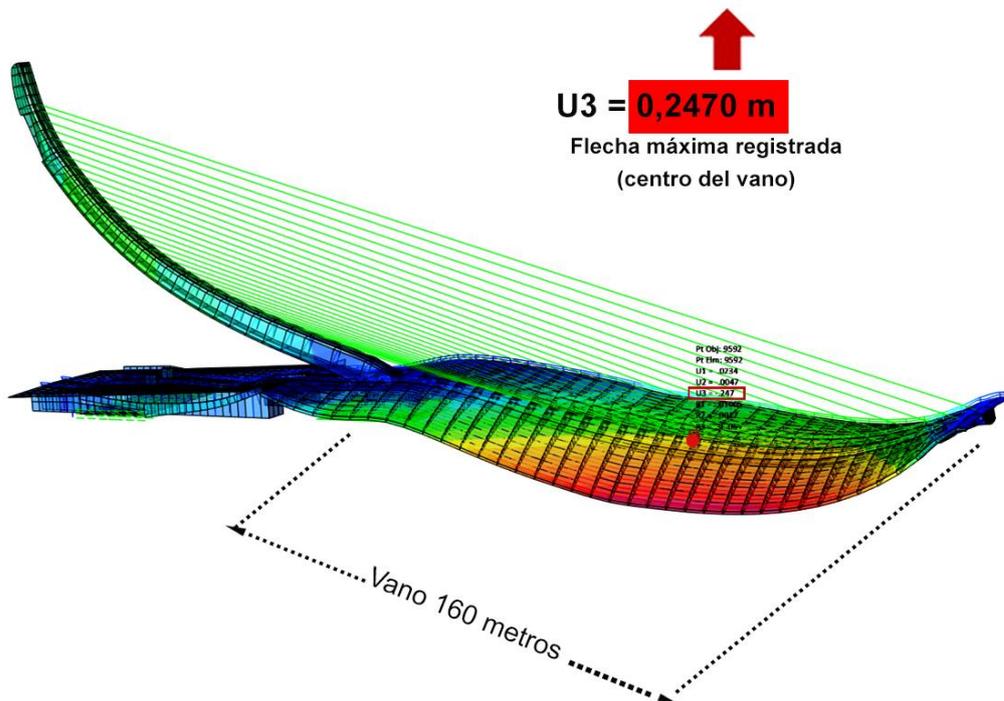


Lámina 19. Pylon en ángulo de 30° y flecha máxima registrada en el tablero

Aumento gráfico x 50

Fuente: Propia

3.5.4 Variante 2: El Pilono orientado en un ángulo de 45°

La segunda variante es la más conservadora, no por ello la más efectiva, en términos de que su desplazamiento o giro del mástil se fija en un ángulo de 45° muy cercano a la alineación del pilono en el modelo original, las deformaciones máximas alcanzadas son sensiblemente inferiores al modelo de prueba anterior (pilono en ángulo de 30°). Sin embargo tampoco cumple el rango de flecha máxima admisible (ver tablas 19 y 20) con unos valores sobre el centro del tablero del puente de 0,15 metros (lámina 18).

Modelo Detallado: Variante giro Pilono 45 °

Deformada: combinación **ELUu** (CMP 1.35 + DEAD 1.35 + SCU 1.5)

L /1200

L=160 metros

160 / 1200 = 0,1333

Flecha máxima admisible
(centro del vano)

U3 = 0,1508 m

Flecha máxima registrada
(centro del vano)

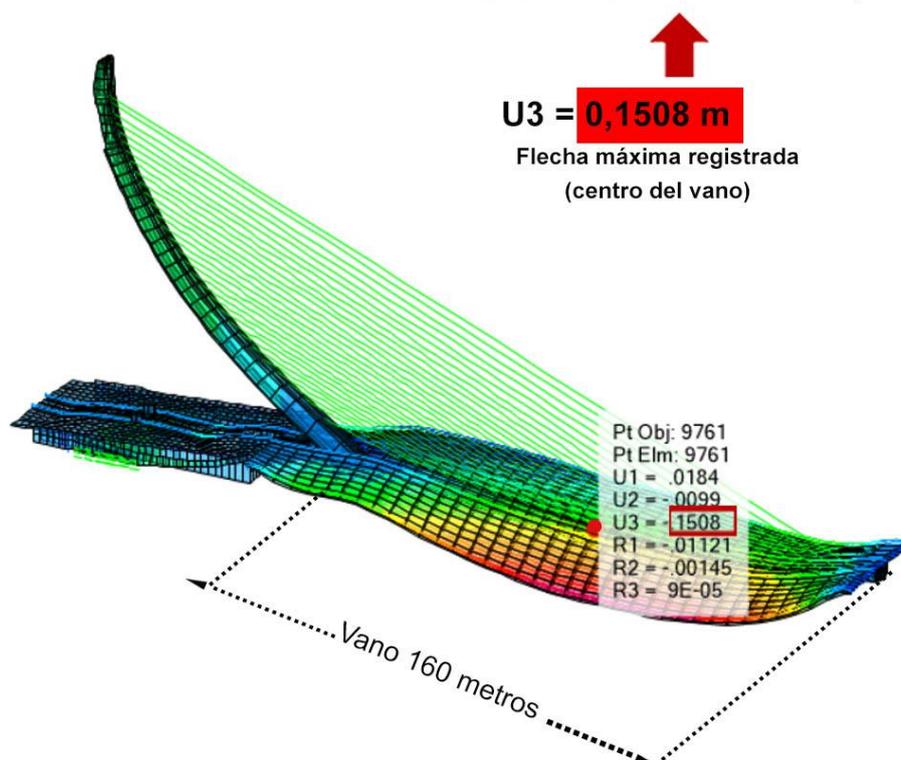
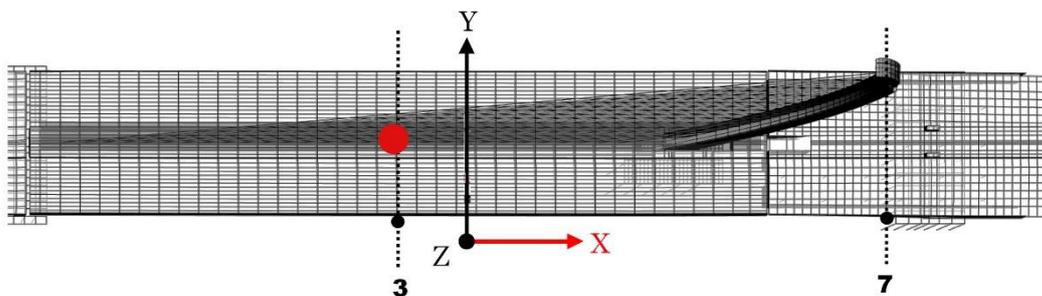


Lámina 20. Pilono en ángulo de 45° y flecha máxima registrada en el tablero

Aumento gráfico x 50

Fuente: Propia



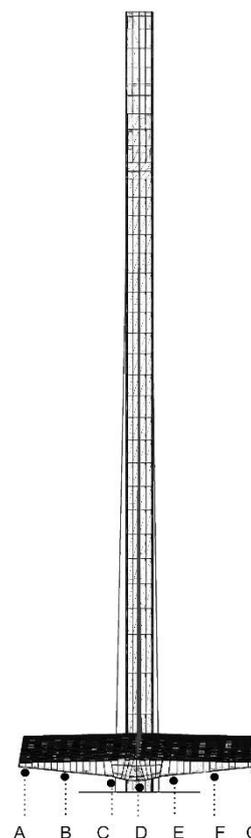
Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo variante pilono 45°

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 3

A	0.01	0.01	0.00	0.00	0.42	0.00
B	0.01	0.01	0.00	0.00	0.30	0.00
C	0.01	0.01	0.00	0.00	0.21	0.00
D	0.01	0.01	0.00	0.00	0.15	0.00
E	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.00
F	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
G	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00



Pilono: Ángulo 45°

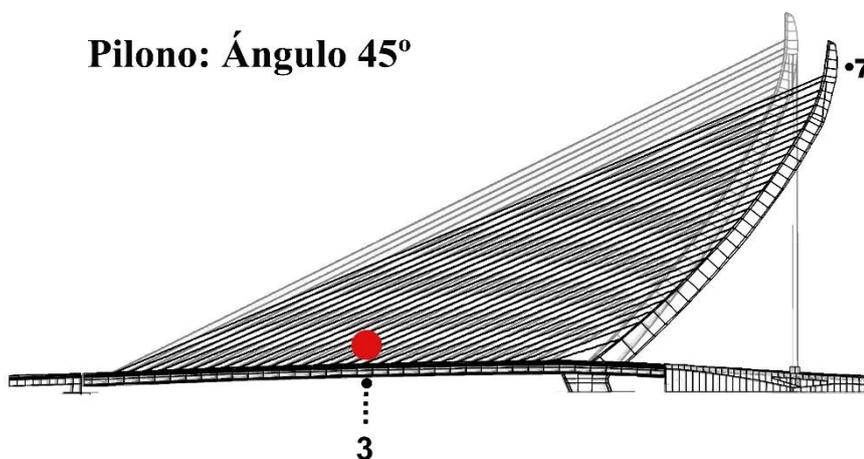
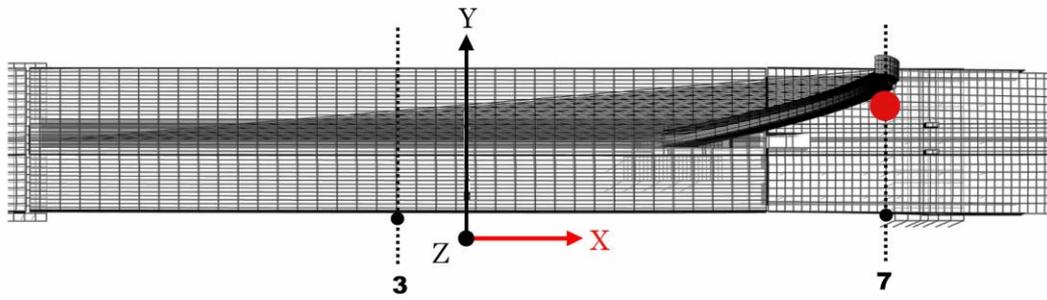


Tabla 19. Pilono 45°: Deformaciones Resultantes Eje 3 (ELSu)

Fuente: Propia



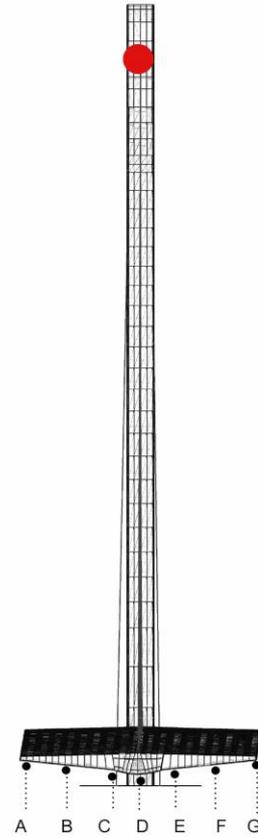
Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo variante pilono 45°

Ref:	x	y	z
	m	m	m
	Tras.	Rot.	Tras.

Sección Eje 7

	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
C	0.02	0.00	0.04	0.00	0.07	0.00
D	0.02	0.00	0.04	0.00	0.07	0.00
E	0.02	0.00	0.04	0.00	0.07	0.00



Pilono: Ángulo 45°

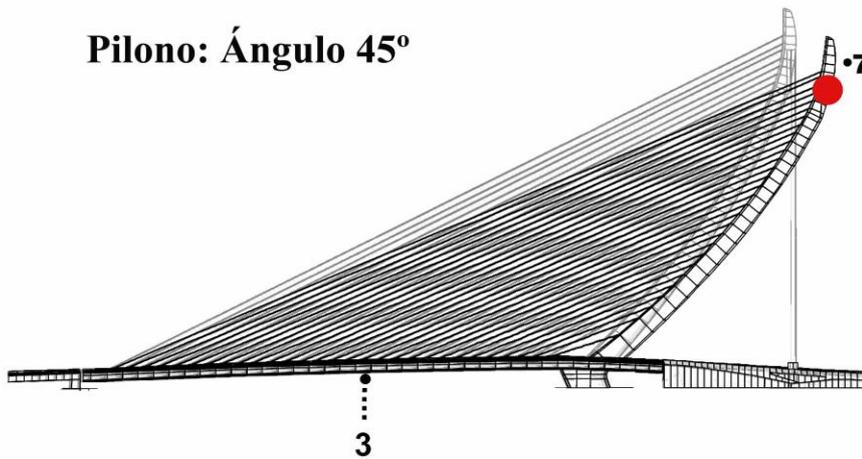


Tabla 20. **Pilono 45°: Deformaciones Resultantes Eje 7 (ELSu)**

Fuente: Propia

3.5.5 Variante 3: El Pilono orientado en un ángulo de 70°

La tercera variante es la más acertada de los modelos propuestos, con una disposición del pilono en un ángulo de 70° desarrolla una máxima deformación en el centro del vano de 0,07 metros o 70 milímetros (lámina 19). Las máximas deformaciones que experimenta el pilono en coronación registran 20 milímetros en el eje “Z” aunque en el eje “Y” registra desplazamientos de hasta 0,03 metros o 30 milímetros (ver tabla 22). En esta alternativa, el mástil consigue una altura mayor al modelo original que sobrepasa los 138 metros de altura.

Modelo Detallado: Variante giro Pilon 70 °

Deformada: combinación **ELUu** (CMP 1.35 + DEAD 1.35 + SCU 1.5)

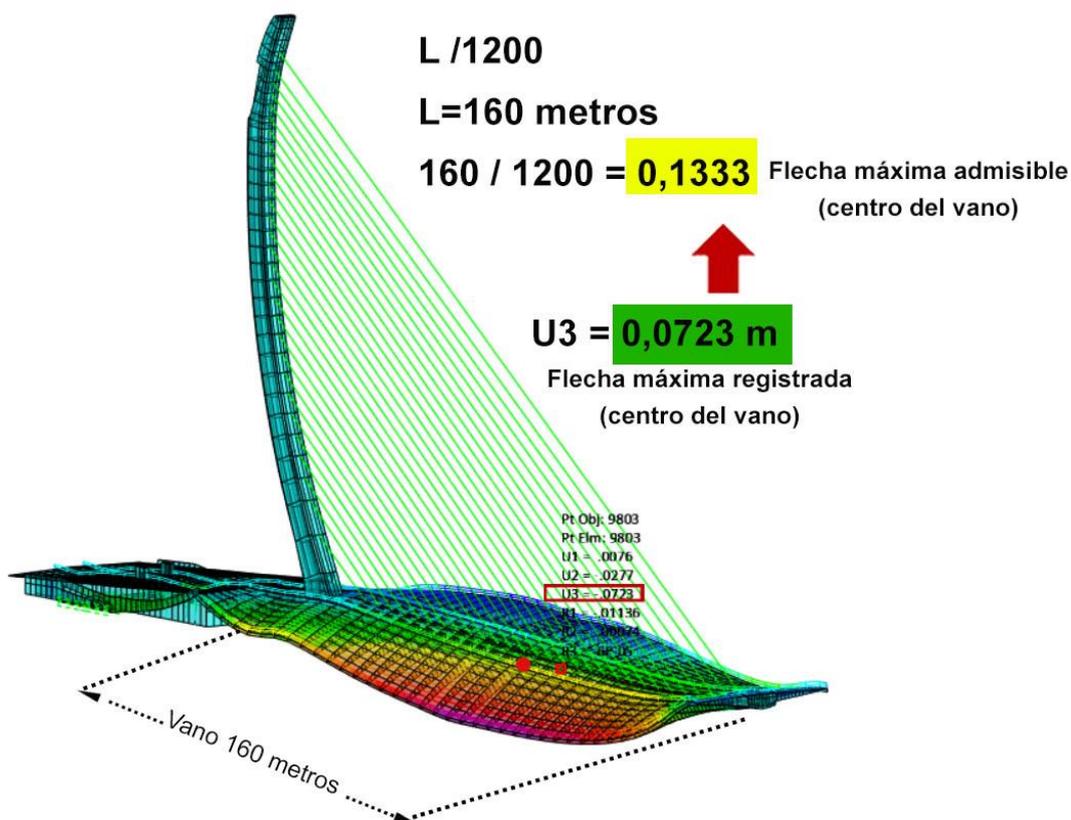
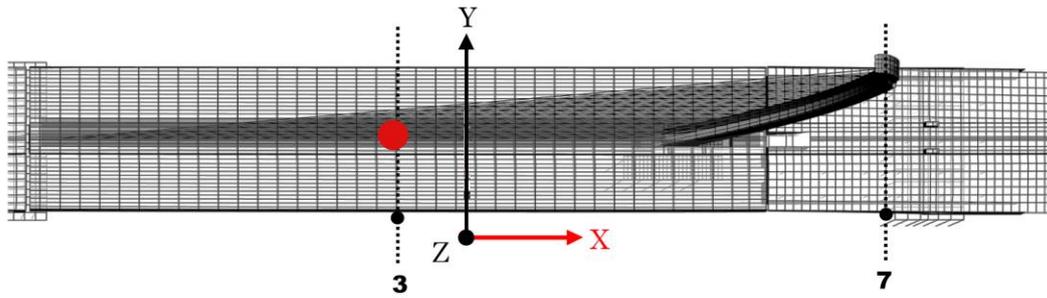


Lámina 21. Pilon en ángulo de 70° y flecha máxima registrada en el tablero

Aumento gráfico x 50

Fuente: Propia



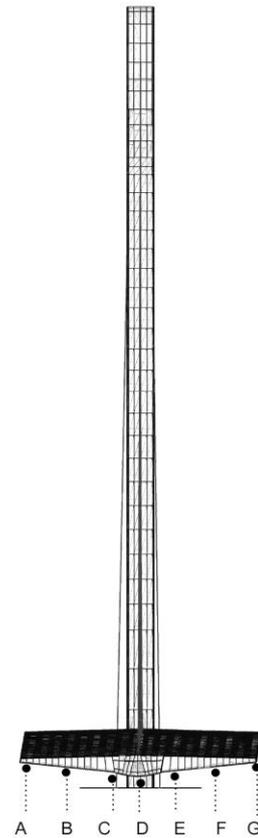
Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo variante pilono 70°

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 3

A	0.00	0.01	0.00	0.00	0.34	0.00
B	0.00	0.01	0.00	0.00	0.22	0.00
C	0.00	0.01	0.00	0.00	0.12	0.00
D	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00
E	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00



Pilono: Ángulo 70°

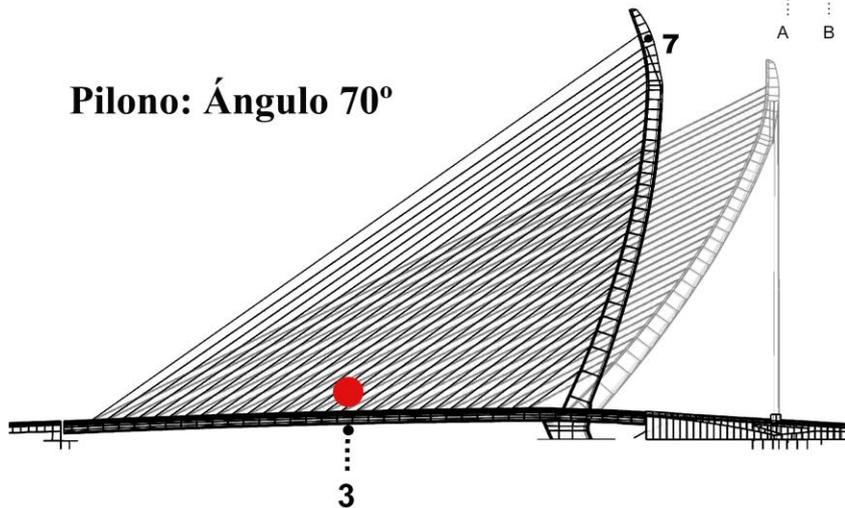
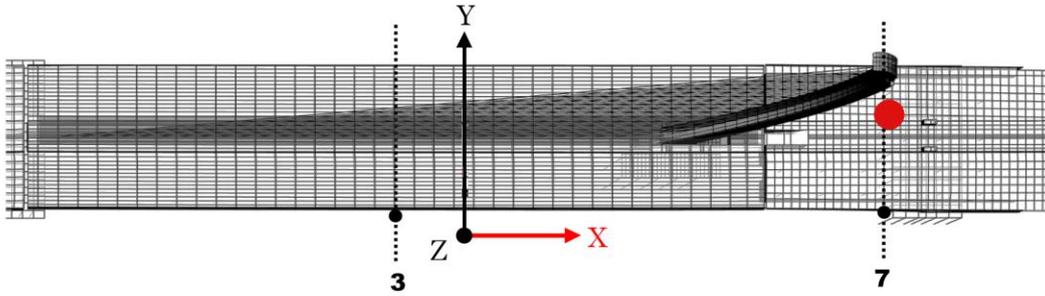


Tabla 21. Pilono 70°: Deformaciones Resultantes Eje 3 (ELSu)



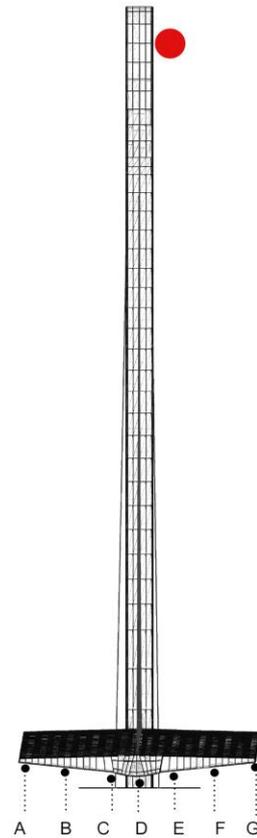
Cuadro de deformaciones

Tabla: Deformación y rotación del modelo variante pilono 70°

Ref:	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.

Sección Eje 7

C	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
D	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
E	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00



Pilono: Ángulo 70°

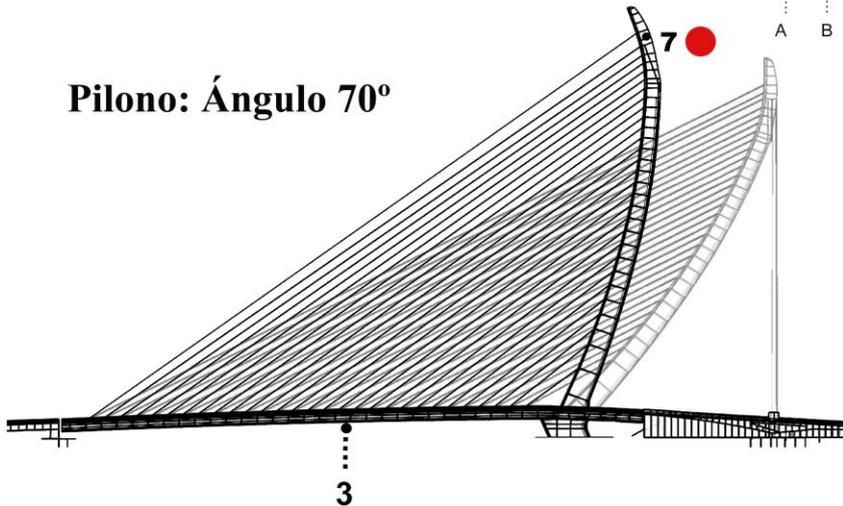


Tabla 22. Pilono 70°: Deformaciones Resultantes Eje 7 (ELSu)

Fuente: Propia

3.6 Líneas de tendencia de deformación del puente

Con las deformaciones resultantes, tanto del modelo original como de las tres variantes propuestas sometidas al cálculo, se pudieron trazar las líneas de tendencia de deformación del puente, de esta manera se consigue identificar la elección formal efectiva. Se puede concluir que posicionar el pilono en un ángulo inferior a 45° no mejora el comportamiento estructural e incrementa las deformaciones en el tablero como quedó demostrado en el modelo con el pilono posicionado en un ángulo de 30°. El incremento de la distancia del pilono sobrepasa los límites de la plataforma en el estribo Sur por desplazamiento horizontal y la reducción significativa de la altura del pilono en esta posición, generando así, un amplio rango de deformaciones en una misma sección por ejemplo en la componente vertical “Z” el eje 3 en el centro del vano que es el eje de mayor deformación del tablero las deformaciones van desde:

0,11 hasta -0,52 metros, mientras que con el pilono centrado en una posición más vertical (ángulo de 70°) las deformaciones se reducen considerablemente y se mantienen entre 0,04 y -0,34 metros. Por ende resulta más óptimo para el puente la posición del mástil o pilono en un ángulo de 70° (ver lámina 20), inclusive si lo comparamos con el modelo original que sobre este mismo eje registra deformaciones entre 0,01 y -0,39 metros.

				
	ORIGINAL	PILONO 30°	PILONO 45°	PILONO 70°
Tablero	Sección Eje 3 Z	Sección Eje 3 Z	Sección Eje 3 Z	Sección Eje 3 Z
	0,13 m	0,24 m	0,15 m	0,07 m
Pilono	Sección Eje 7 Z	Sección Eje 7 Z	Sección Eje 7 Z	Sección Eje 7 Z
	0,05 m	0,13 m	0,07 m	0,02 m

Lámina 22. Cuadro resumen máximas deformaciones, eje vertical (Z)

Fuente: Propia

3.6.1 Deformaciones verticales en ejes y bordes libres del tablero

En lo que respecta al comportamiento resistente, mientras que la distribución de la flexión entre el pilono y el tablero continúa realizándose proporcionalmente a sus rigideces relativas a flexión, la espina dorsal del tablero (cajón central) actúa como barra de torsión transmitiendo sus esfuerzos a los estribos. Las mayores flechas se experimentan en el borde libre del tablero, tanto en el modelo original como en las propuestas de las variantes (ángulos de 30°, 45° y 70°) esto se debe a una condición intrínseca al método de sujeción de tablero-pilono desde un único eje central, el cajón central como especie de viga de gran canto hilvanada, entretejida desde arriba por los tirantes que enlazan la viga de gran canto con el pilono. Así pues, Los experimentos en el giro del pilono evidencian que es el brazo de palanca que intenta compensar los esfuerzos del tablero, esta situación produce axiles sobre el eje del pilono produciendo compresiones que se maximizan en el centro de un singular pilono de trayectoria curva.

3.6.2 Contraflecha del tablero

La contraflecha que experimenta el tablero, esa pronunciada curvatura convexa, puede deducirse que se toma esa decisión de diseño para compensar la flecha prevista de deformación del tablero y no tanto por la justificación de responder a una cota que exige respetar el gálibo del puente para permitir el paso por debajo de vehículos. Partamos de la idea que coexisten ambos parámetros, pero es indudable el beneficio que proporciona la contraflecha los un esfuerzo por resistirse y ganar terreno a la deformada por las sollicitaciones que acomete al plantear el desafío de sustentar un vano de 160 metros de luz.

3.7 Esfuerzos en Tirantes

Repasando el esquema de fuerzas, desde el punto de vista del comportamiento estructural del puente, se trata de ***un vano único con un tablero flexible de bordes libres que hace que los cables de sustentación recojan la carga vertical y la lleven hasta el pilono inclinado de trayectoria curva, donde por descomposición de fuerzas parte se transmite por la directriz del pilono y parte es recogida por los cables de retenida que transmiten la carga hasta los apoyos de anclaje que actúan como verdaderos contrapesos por la poderosa cimentación del puente.***

Las láminas que expresan los esfuerzos axiles en tirantes se expresan en la combinación ELUu (lámina 21), es interesante ver los esfuerzos registrados en los tirantes en el modelo original detallado, en el modelo experimental más desafortunado (pilono orientado con ángulo de 30°) para apreciar las diferencias.

3.7.1 Axiles en Tirantes

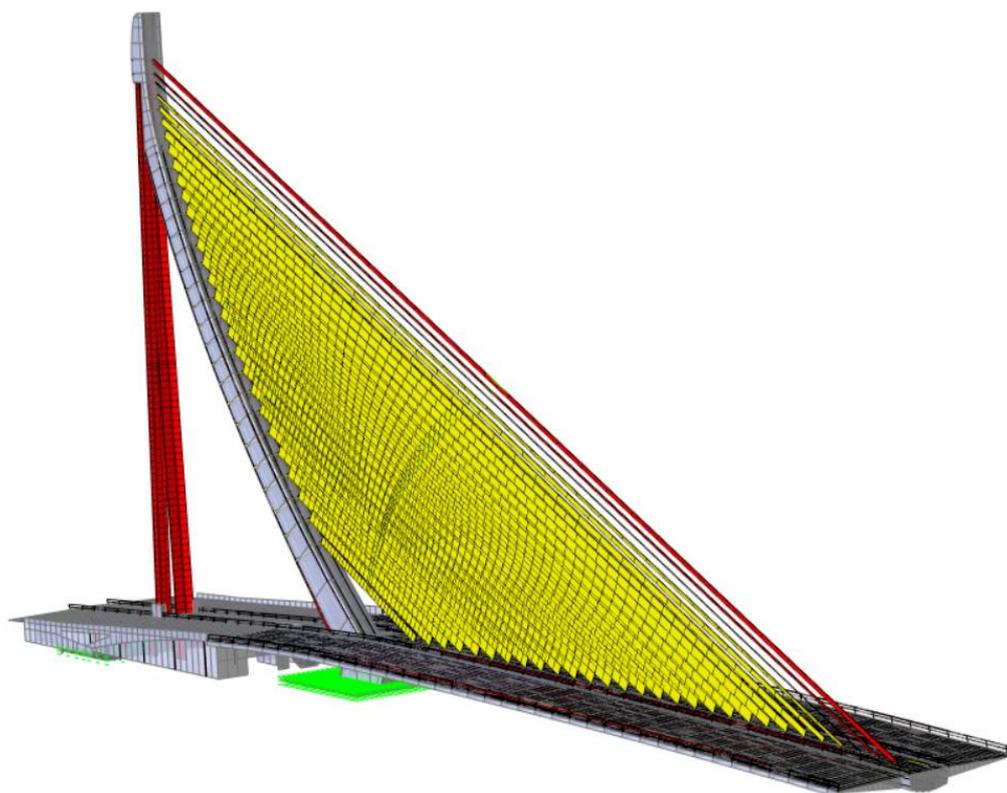
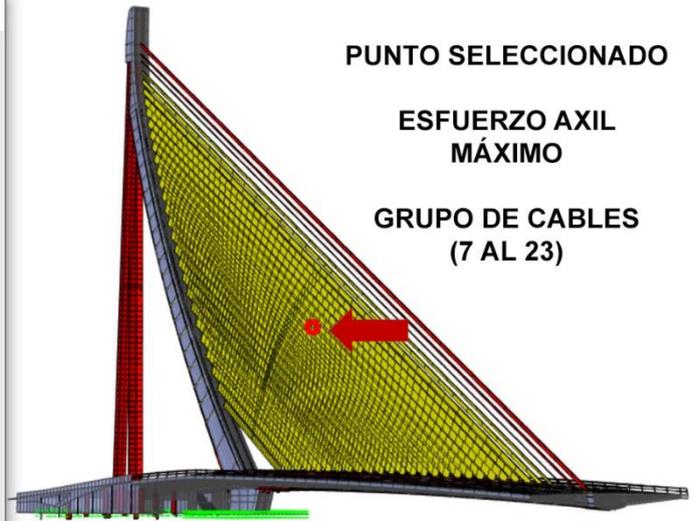
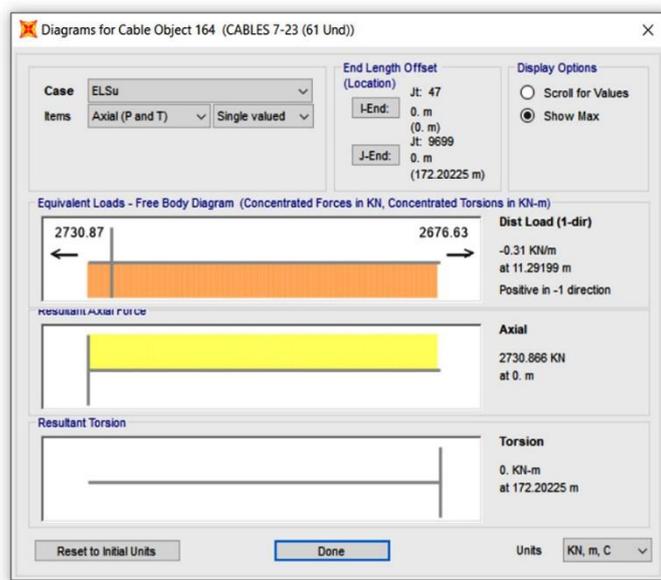


Lámina 23. Esfuerzos en Tirantes (ELUu) (Modelo Original Detallado)

Fuente: Propia



AXIAL 2730.866 KN TORSIÓN 0. KN-m

Lámina 24. Esfuerzos en Tirantes 7 al 23 (ELUu) (Modelo Original Detallado)

Fuente: Propia

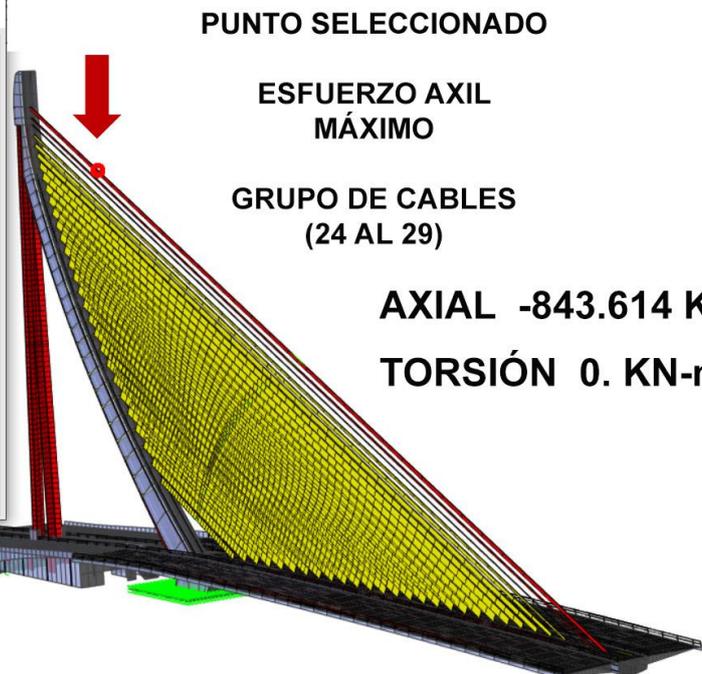
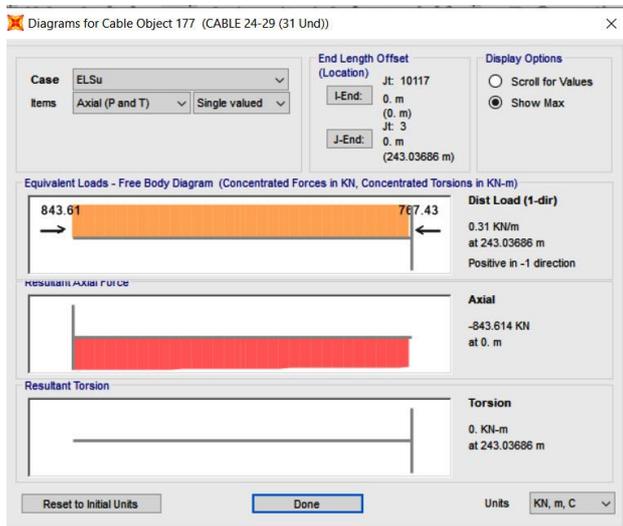
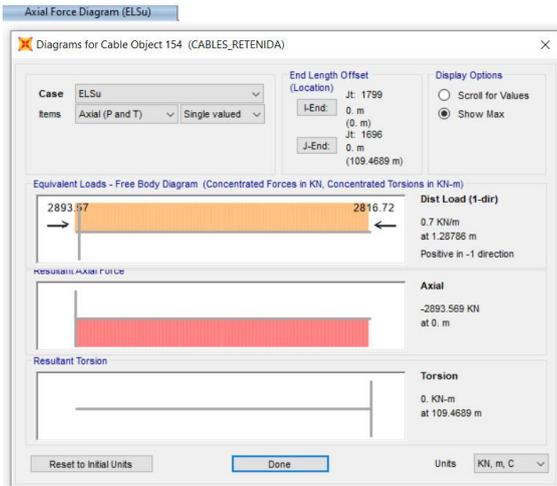


Lámina 25. Esfuerzos en Tirantes 24 al 29 (ELUu) (Modelo Original Detallado)

Fuente: Propia



AXIAL -2893.569 KN
TORSIÓN 0. KN-m

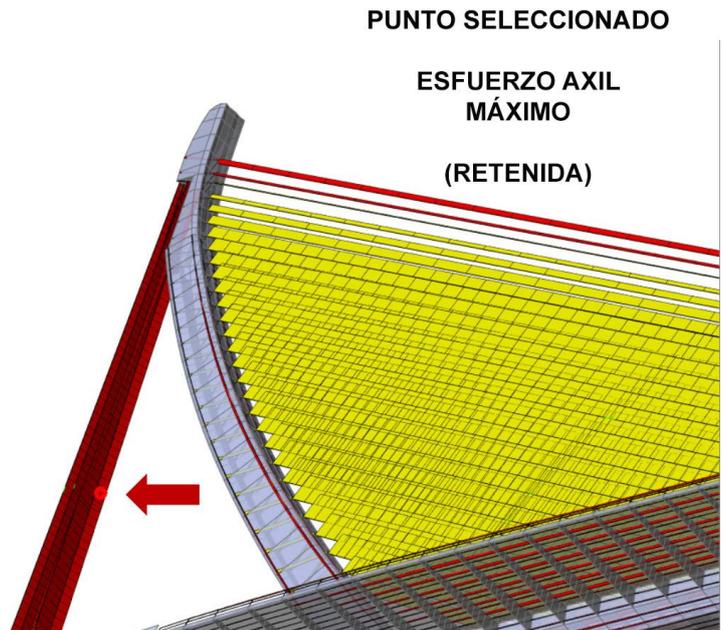
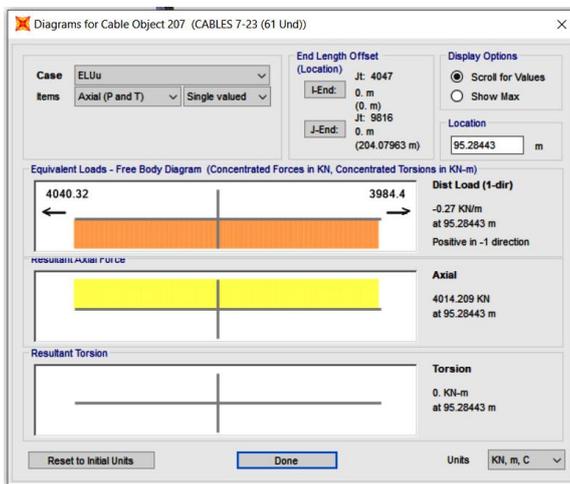


Lámina 26. Esfuerzos en Tirantes de Retenida (ELUu) (Modelo Original Detallado)

Fuente: Propia



AXIAL 4014.209 KN **TORSIÓN 0. KN-m**

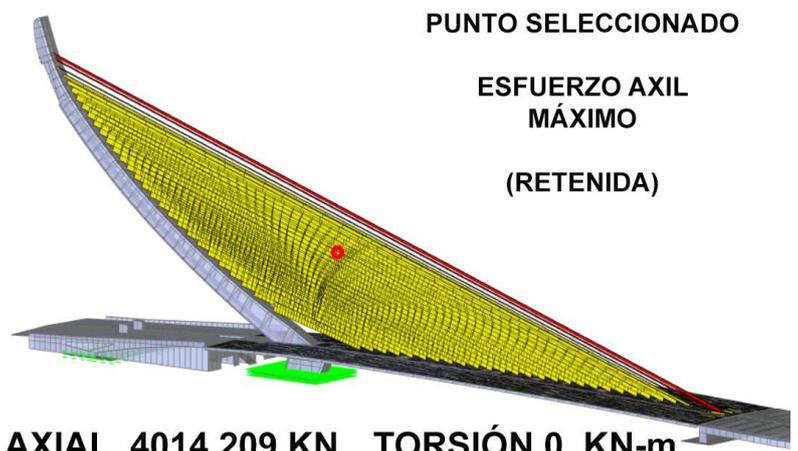


Lámina 27. Esfuerzos en Tirantes 7 A 23 (ELUu) (Modelo Pilono ángulo de 30°)

Fuente: Propia

Los axiles experimentados por los tirantes en general, presentan una tendencia de aumento en el extremo de encuentro con el pilono comparado con el encuentro en el extremo que sujeta el tablero (láminas 22 a 25), por otra parte, los tirantes más largos experimentan axiles negativos, no experimentan torsión y los axiles aumentan considerablemente en el modelo experimental de giro del pilono en un ángulo de 30° , lo cual es consecuente con los esfuerzos que se incrementan ya analizados previamente en las deformaciones resultantes. Por otra parte los cables de retenida en el modelo original detallado también tienden a presentar axiles negativos.

3.7.2 Resistencia en Barras

SAP2000 permite hacer un peritaje a las barras, los elementos a los que fueron asignadas las secciones se expusieron al análisis automático de comprobación de resistencia de los perfiles (lámina 26) las comprobaciones arrojaron que la mayoría de las barras cumplen, las barras que no cumplen y que se resaltan en rojo corresponden a los perfiles en "T" que abrazan el pilono y también los perfiles en "T" en el cajón del tablero en los puntos donde se acrecientan los esfuerzos de cortante. Se podrían optimizar esas barras articulándolas para reducir el efecto de pandeo, sin embargo no se efectúa, porque para efectos del análisis, las barras integradas en el modelo del puente se desempeñan como elementos auxiliares, tal es el caso de las viguetas distribuidas perpendicularmente a las ménsulas, o inclusive las barandillas que no tienen un compromiso estructural. Las barras capitales son los tirantes, los elementos más comprometidos en la estructura por la construcción del modelo recae en las 3D Caras, que son las que conforman elementos como el cajón central, los diafragmas, las ménsulas o el mismo pilono, sobre esos elementos recae el estudio de esfuerzos relacionados con las deformaciones y efectos de torsión resultantes. Luego del peritaje, se ofrece una visualización de deformada de las barras en la combinación ELUu.

Resistencias en Barras

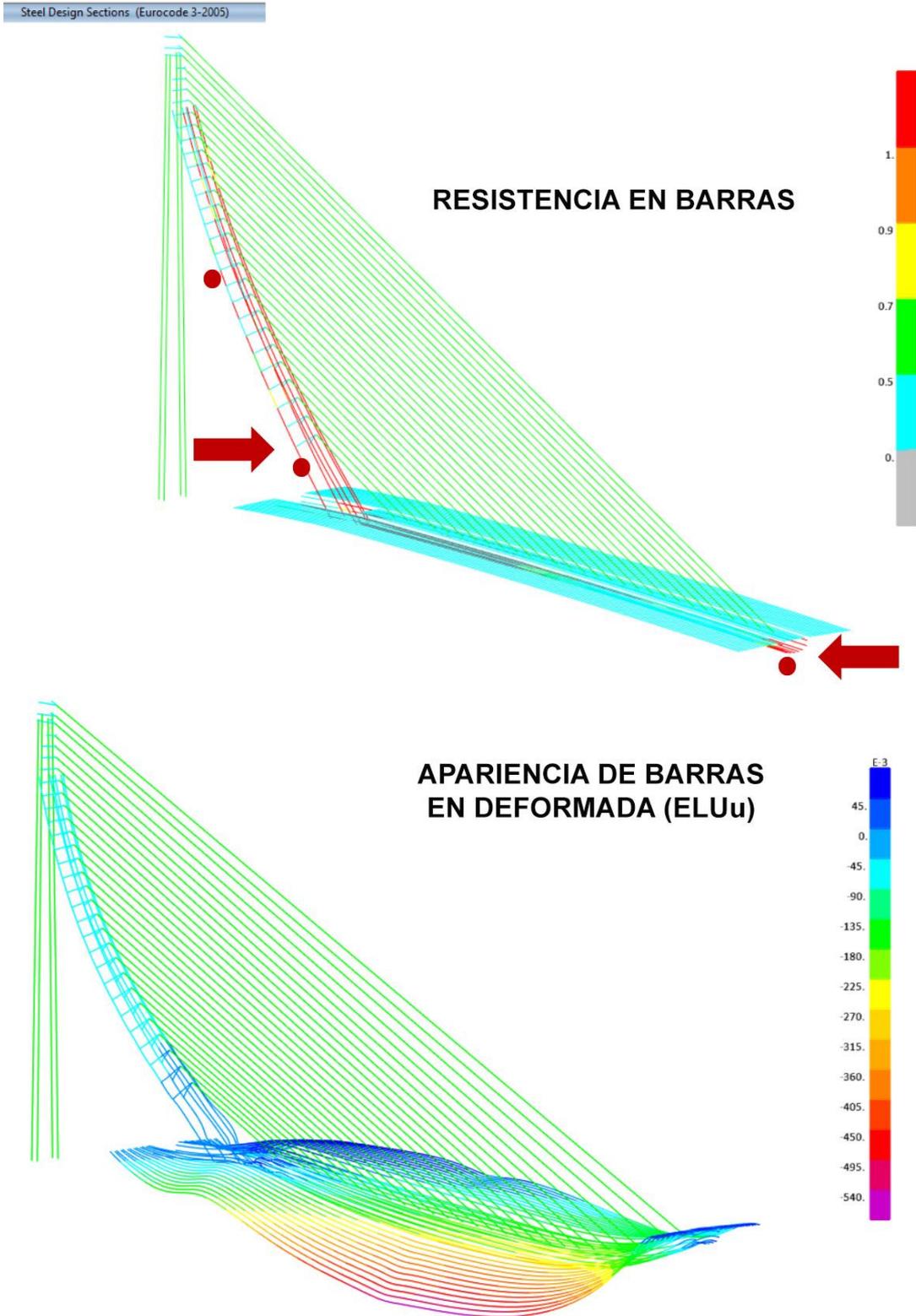


Lámina 28. Peritaje y resistencia de barras

Fuente: Propia

3.8 Esfuerzo Cortante

(Comprobación ELU)

Por último, se valora el comportamiento del esfuerzo cortante que experimenta la estructura, en Estado Límite Último (ELUu) se comprueba que por el tipo de configuración estructural, el momento flector es máximo en el centro del vano hecho comprobado en el modelo original detallado y los modelos experimentales, ahora bien, se puede evidenciar que: el Momento Flector es máximo en el centro y disminuye tendiendo a ser nulo en los arranques, por contraste, el Esfuerzo Cortante se acrecienta, se concentra hacia los apoyos (estribos Norte y SUR) y disminuye con tendencia a ser nulo en el centro (lámina 27).

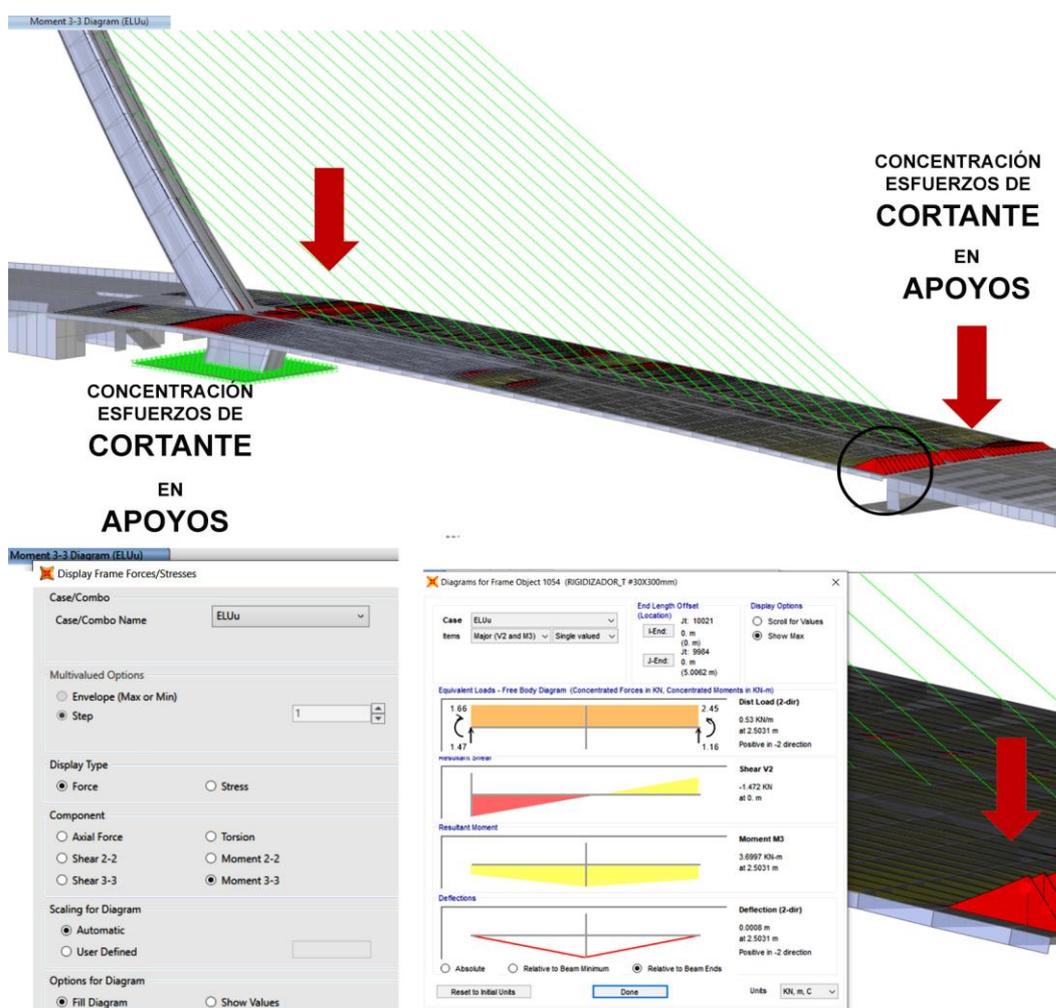


Lámina 29. Esfuerzo de Cortante en el tablero del puente (Modelo Original Detallado)

Fuente: Propia

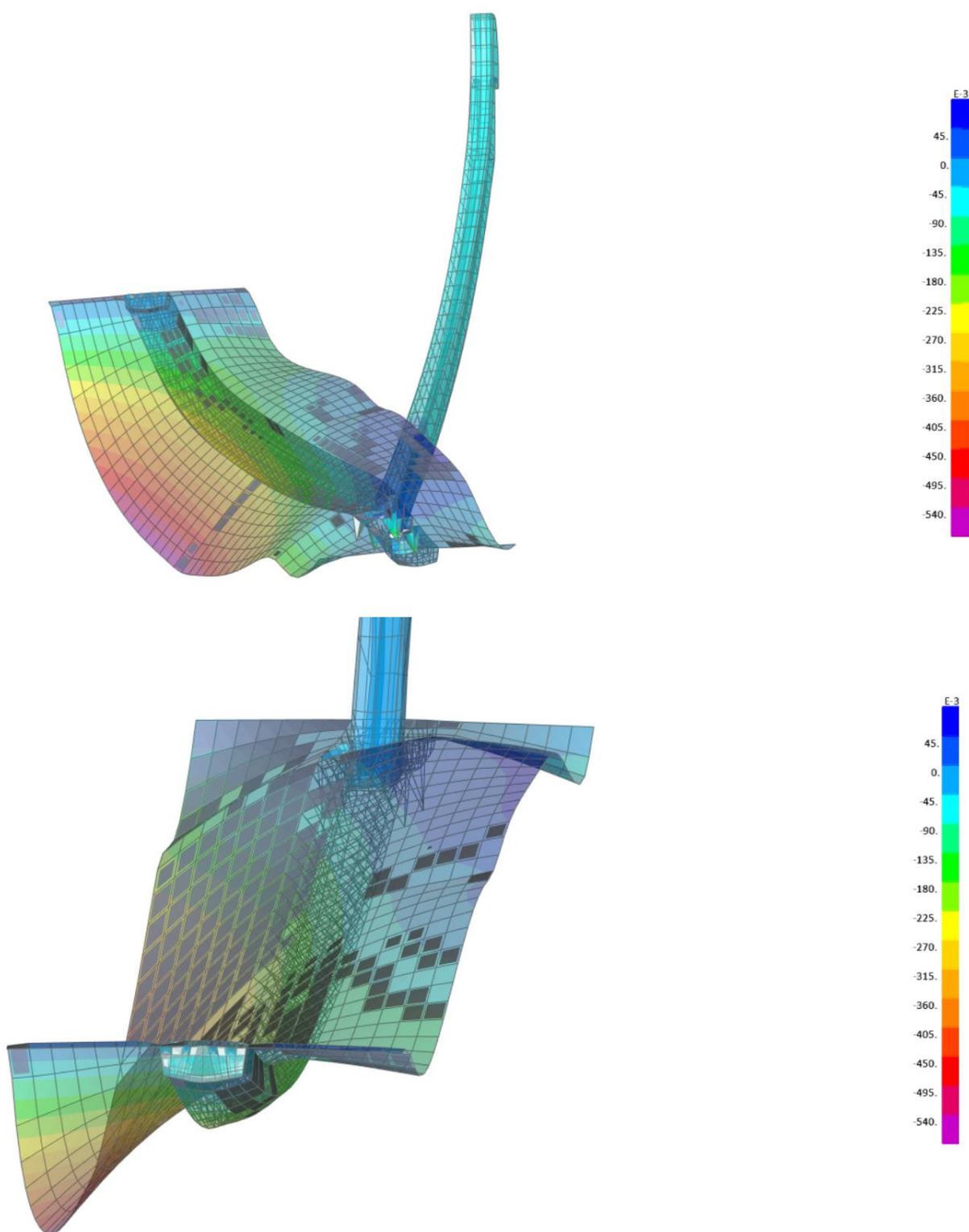


Lámina 30. **Apreciación de la deformada sobre el tablero (ELUu)**

Aumento gráfico x 50

Fuente Propia

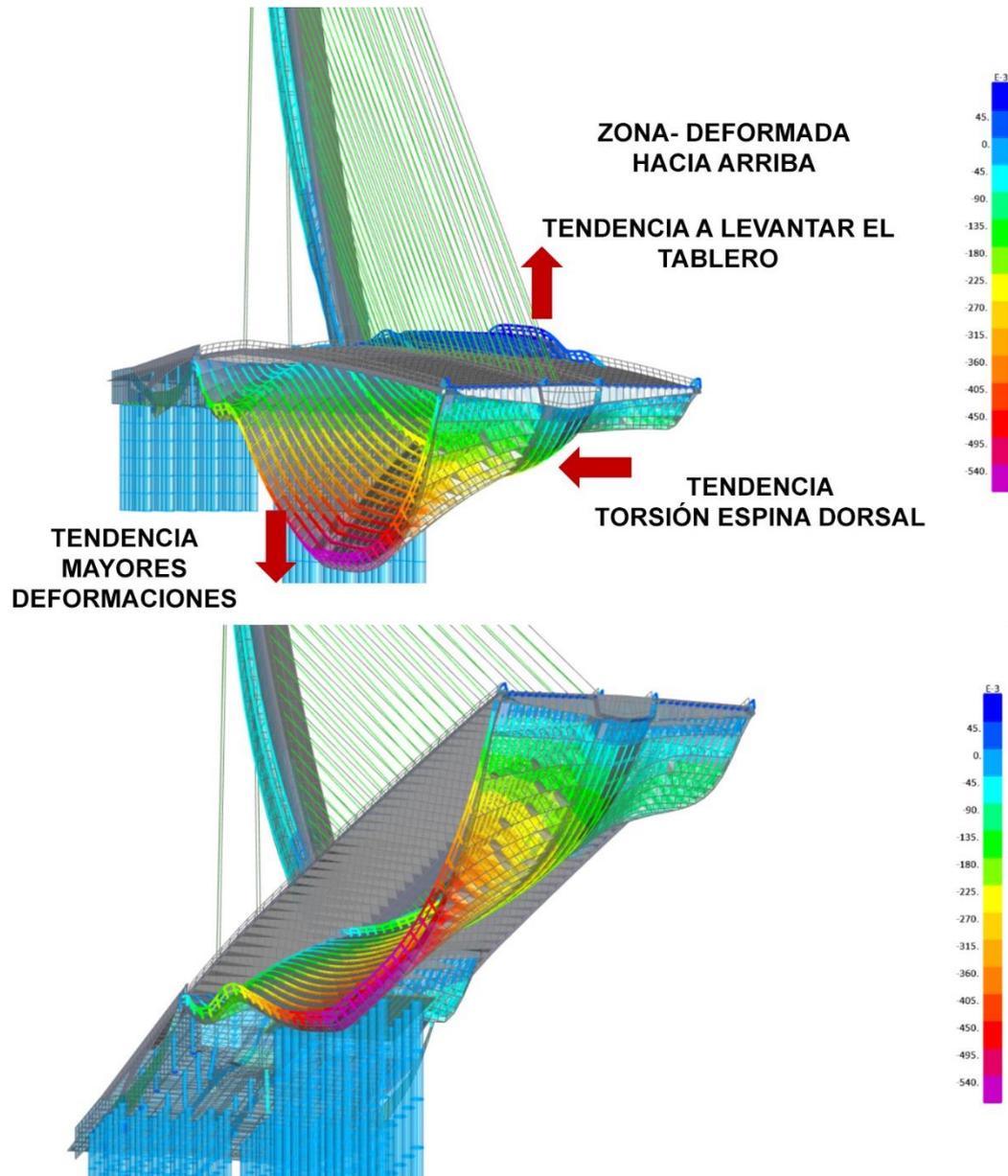
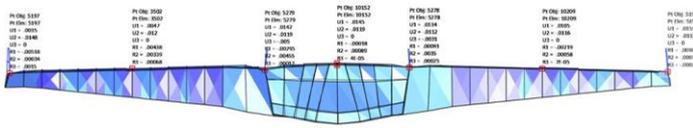
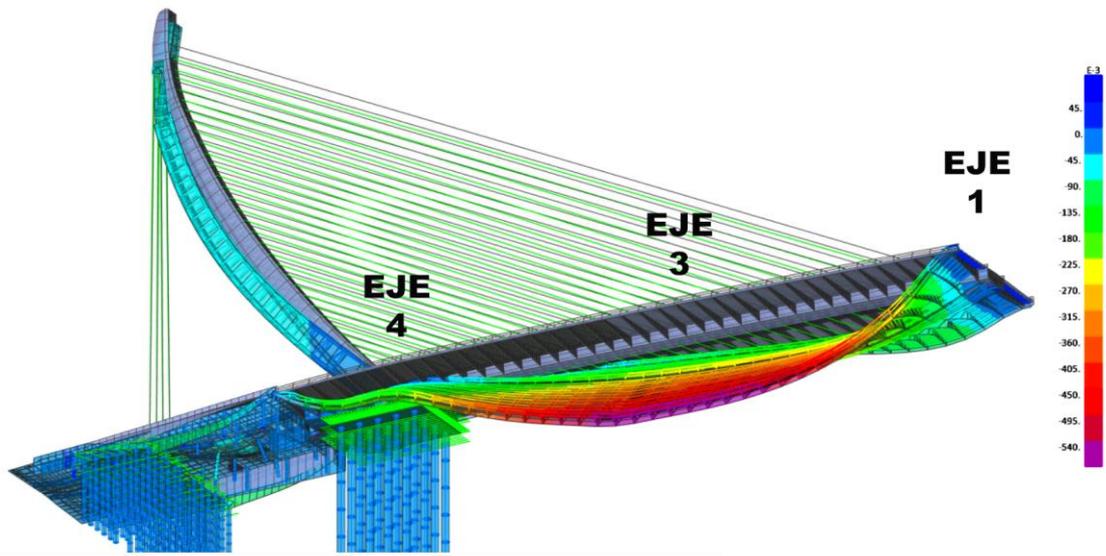


Lámina 31. **Tendencias**

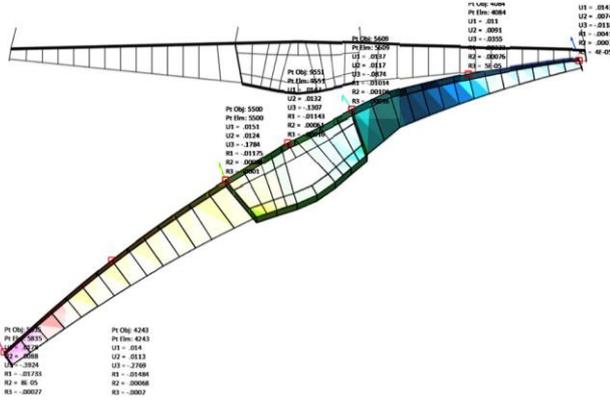
Aumento gráfico x 50

Fuente: Propia

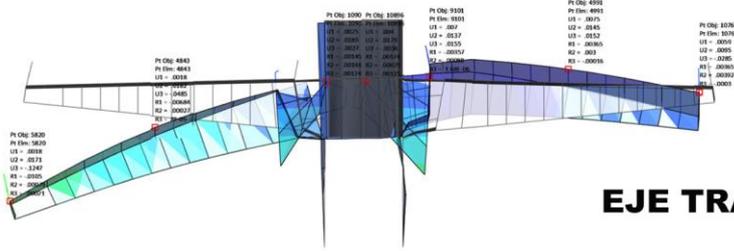
Por último, se aprecia en las últimas resoluciones tridimensionales (láminas 28, 29 y 30), el resultado de las deformaciones ya estudiadas en ELSu y esta vez visualizadas en la combinación ELUu (Estado Límite último) al Modelo Original Detallado con un aumento gráfico que permite apreciar las marcadas líneas de tendencia que desencadenan en las deformaciones resultantes



**EJE TRANSVERSAL
1
(ARTICULACIÓN
ESTRIBO NORTE)**



**EJE TRANSVERSAL
3
(CENTRO DEL VANO)**



**EJE TRANSVERSAL
4
(CONEXIÓN TABLERO PILONO)**

Lámina 32. Resumen: tendencias de deformada en ejes capitales

Aumento gráfico x 50

Fuente: Propia

CONCLUSIONES

MONUMENTALIZAR LAS INFRAESTRUCTURAS

Al haber estudiado el diseño del puente y las decisiones proyectuales de la intervención de Calatrava, se puede concluir que la obra se planteó con una doble intención: la de construir una infraestructura que facilitara la interconexión de la ronda Sur con el norte de la ciudad, y sobre todo, la de configurar un hito urbano que a la vez se implanta en un área urbana ya consolidada (la Ciudad de las Artes y las Ciencias). Se refleja el puente como elemento dinámico y se convierte en un símbolo paisajístico con carácter monumental para Valencia, en este sentido, Calatrava concibe el puente asumiendo o confiriéndole una fuerte carga iconográfica a la manera de una gran escultura urbana.

Un puente es un hecho técnico, pero sobretodo es un hecho contextual. La idea de revitalizar el entorno o las áreas urbanas deprimidas con un elemento potente, crea un vocabulario común entre los puentes proyectados por Calatrava que hace posible identificarlos, sea a través de las variantes de los puentes de arco, sea a través de las variantes de los puentes de mástil atirantados, todos ellos tienen en común que configuran más que un vínculo, configuran un lugar.

NUEVAS NARRATIVAS

EL Vocabulario Calatrava que singulariza las obras el *“expresarse a través de nuevas narrativas formales en el campo de la Ingeniería, de la Arquitectura y por su puesto de la Escultura como factor mediático y reconciliador”* inmersos en una poética del aparato formal-estructural resaltando los bordes o los límites de su capacidad estática que despierta interés de nuevas connotaciones plásticas y allí radica el sentido de innovación aportado por Calatrava.

ENTRE LOS LÍMITES DE LA ESTÉTICA Y LA EFICACACIA ESTRUCTURAL

En el desarrollo de la práctica, el sometimiento de la obra del Puente de Serrería a su cálculo y análisis por observación de sus deformaciones resultantes, de la respuesta formal-estructural, se puede deducir que la proyección no obedece estrictamente a una solución canónica para estructuras con cargas altas como los puentes, o para tableros anchos y de luces largas, como la configuración estructural del Puente de Serrería que conlleva a una solución menos práctica y económica.

La estructura es llevada al límite por dos razones fundamentales: la disposición de los tirantes soportando un tablero desde un único plano central, y la singular curvatura de un pilono que cierra el esquema de fuerzas para enfrentar una sollicitación capital que se traduce en salvar un vano de 160 metros de luz.

Queda entonces justificada la actuación en un contexto donde el afán de establecer un hito arquitectónico prevalece sobre las demás consideraciones. Sin ánimos de juzgar a Calatrava, reconozco su particular visión de reconocer la Arquitectura como arte y que no se limite a ser una profesión exclusivamente utilitaria. Estoy de acuerdo que debe ser responsable pero no necesariamente predecible, propender por optimizar los recursos disponibles y tiempo empleado, sin embargo la arquitectura de carácter público debe emocionar, transmitir esperanza y optimismo, porque es patrimonio de todos. Así pues, los límites de la estética y la eficacia estructural tienen unos hilos muy delgados que conviene no sobrepasar y compensarlos en el mejor de los casos.

Ante todo, lo positivo de este viaje que representó la investigación es que se logró centrar el interés en el aparato formal y el aparato estructural entendiéndolos como un solo ente, se articulan y crean un lenguaje particular, que dota a la estructura de una relevancia singular en el campo de la creación de la arquitectura

CAVILACIONES

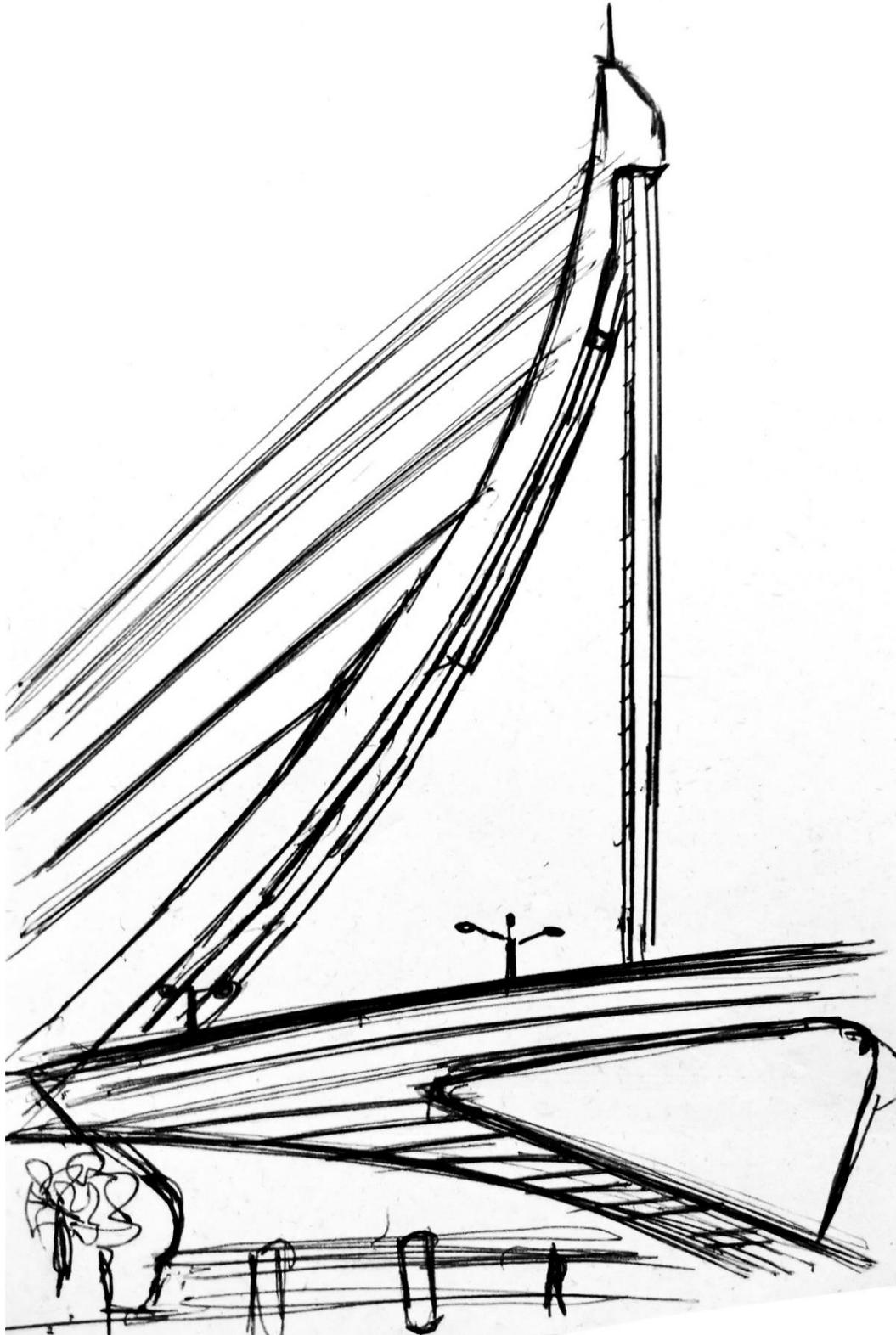


Ilustración 2. **El Puente de Serrera... Cavilaciones**

Fuente: Propia

Cavilaciones.

Podría seguir profundizando y extenderme exponiendo las múltiples variables que podrían acometerse en la mecánica de alteración de los modelos representativos de la estructura del puente, las resoluciones que se pueden aportar de forma deliberada y propositiva, indagando desde del aparato formal del puente en la “búsqueda de la forma efectiva” reflejo de la expresividad del hecho resistente son casi infinitas, Sin embargo, el presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) reclama un contenido acotado y con medida.

De algún modo también es importante rescatar que el TFM me ha permitido personalmente saciar mi sed, al integrar muchos años de observación e interés particular de la práctica profesional de Calatrava, quienes me conocen así lo reconocen, los esfuerzos quedan condensados de manera consecuente y con carácter colectivo, pues he sido receptivo de la enseñanza impartida en el máster por nuestros profesores y al mismo tiempo he aunado esfuerzos para desarrollar un trabajo de investigación estructurado, consecuente, siguiendo una metodología, agotando los valiosos recursos, reflexiones propias y herramientas prácticas disponibles, para poder llegar a unas conclusiones, en ese sentido me siento satisfecho de haberlo hecho.

PALABRAS CLAVE

SANTIAGO CALATRAVA

Personaje singular que ocupa un lugar preponderante y relevante en La Arquitectura, con un vocabulario formal que reconcilia y aúna Ingeniería Escultura y Arquitectura para constituir arte en su filosofía. De luces y sombras, aciertos y excesos, un valenciano que trasciende, un ciudadano del mundo que sigue creando.

ESTÁTICA

Es la parte de la física que estudia las fuerzas en equilibrio. Si sobre un cuerpo no actúan fuerzas o actúan varias fuerzas cuya resultante es cero, decimos que el cuerpo está en equilibrio. Si un cuerpo está en equilibrio significa que está en reposo o se mueve en línea recta con velocidad constante. Para un cuerpo en equilibrio la fuerza neta es cero

Fuente:(Eggs)

Seminario Universitario de física

MEMORIA COLECTIVA CULTIVADA

Cúmulo de experiencias vividas, capitalizadas y rescatas a la hora de abordar un proyecto con sus particulares problemáticas a resolver, sin embargo enriquecido precisamente acudiendo a la memoria labrada, permitiendo que parte de la historia se manifieste en el presente.

ANALOGÍA

Relación de semejanza entre cosas distintas, en Arquitectura, concibe el diseño en lógica paralela con la forma en que trabaja la naturaleza.

FORMALISMO

En Arquitectura, el Formalismo equivale a entender la forma como el principio y eje preponderante de todas las cosas en sí mismo, adquiere una relevancia que en ocasiones supedita o somete a la función.

PLÁSTICA

Arte o técnica que consiste en crear o modelar objetos dando forma a una materia blanda, como el barro, el yeso, etc.

Fuente: (Oxford)

CARÁCTER PLÁSTICO

En Arquitectura, el Carácter Plástico concede a una obra el atributo de riqueza a la forma, es el potencial que dinamiza y le otorga por ejemplo a un edificio o a una escultura un bagaje formal expresivo constitutivo de sí mismo.

VOCABULARIO CALATRAVA

Técnica original, personal y filosofía de vida del arquitecto Santiago Calatrava, técnica que consiste en transgredir las fronteras entre Escultura y Arquitectura que antepone procesos mentales procedentes del mundo natural para traducirlos en problemáticas estructurales y espaciales, manipulando la escala en muchas ocasiones y con intenciones deliberadamente formalistas, plásticas para constituir hitos o iconos de ciudad.

EFICACIA

Expresión canónica que propende por resolver un problema con el mínimo empleo de recursos y tiempo disponible.

ESTRUCTURA

En general la palabra estructura es referida a la disposición y distribución de las partes de un todo, en Arquitectura la Estructura es la componente fundamental que sustenta y ordena el edificio para traducir las cargas al terreno, en mi concepto personal la Estructura puede construirse como el alma de una obra.

ALARDE

Exhibición que engalana y expresa algo de manera deliberada o pretenciosa.

ESTÉTICA

Disciplina filosófica que estudia las condiciones de lo bello en el arte y en la naturaleza.

Fuente: (Oxford)

CARÁCTER SIMBÓLICO

En Arquitectura, cualidad que se le otorga a una obra un valor especial, llamada a ser hito, fenómeno marcado por el alto grado de recordación o asociación entre la obra y otra cosa por parte del espectador o el usuario.

FORMA ESTRUCTURAL

En el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Máster, La Forma Estructural es la componente integral que concibe arquitectura y estructura como un solo componente, ineludible, inevitable.

“La manera en que esté integrado el aparato formal, determina o tiene incidencia en su respuesta estructural frente a las solicitaciones que debe abordar, en ese sentido, concibo que la forma estructural, es la orquestación controlada entre Forma y Estructura, a la que se le puede sacar mucho partido estético para concebir un hecho estructural singular expresivo al tiempo bello, al tiempo eficaz”.

Iván Darío Carabalí Balanta

Índice de Imágenes

<i>Imagen 1. Lonja de la Seda:</i>	29
Imagen 2. Secuencia Análoga:.....	30
Imagen 3. Estación de Oriente:.....	31
Imagen 4. Organicidad, eficacia portante:	32
Imagen 5 Identidad Gaudiniana	33
Imagen 6. <i>Proyectando en el vientre de la colina.</i>	35
Imagen 7. “ <i>Garantizando la comprensión simple</i> ”	37
<i>Imagen 8. El mundo de los Arcos</i>	39
Imagen 9. Movimiento Ondeante, la sierra como telón de fondo	41
Imagen 10. Evolución conceptual	43
Imagen 11. Bodegas Ysios.....	44
Imagen 12. Satolas TGV... un monumento en pleno campo	45
Imagen 13. Evolución escultórica	47
<i>Imagen 14. “Memoria Colectiva</i>	48
<i>Imagen 15. “Influencias de Nervi”</i>	49
<i>Imagen 16. “Voladizos”, memoria cultivada”</i>	51
Imagen 17. Unidad plástica	53
Imagen 18. “Un símbolo para Tenerife”	56
Imagen 19. “El alumno no supera al Maestro”.....	57
<i>Imagen 20. “La estructura, un ente global”</i>	59
<i>Imagen 21. “Cuando subestimás la escala en función de la esbeltez”</i>	61
Imagen 22. “Gran manto ondeante”	65
Imagen 23. “Alzado”	65
Imagen 24. “Gráfico de fuerzas: planta y alzado”	67
Imagen 25. Edificios que se mueven	68
Imagen 26. “Metamorfosis formal”	69
Imagen 27. “Barras, nudos y articulaciones”	70
Imagen 28. “Estructuras Desplegables”	71
Imagen 29. “¿Escultura o Arquitectura?”	72
Imagen 30. “Prevalece la estética”	77
<i>Imagen 31. “Ave en vuelo, prevalece la esperanza”</i>	78
Imagen 32. “Instalando nuevos símbolos en Manhattan”	80
Imagen 33. Oculus	81
Imagen 34. “Radiografía Formal”	83
<i>Imagen 35. “De la paloma al estegosaurio”</i>	84
Imagen 36. “Una escultura habitable que se retuerce”	85
Imagen 37. “La composición”	89
Imagen 38. “Poderosamente icónico”	91
Imagen 39. “La Arquitectura Espectacular”	94
Imagen 40. “Impacto Urbanístico, Regeneración Urbana”	97

Imagen 41. “Neogótico profuso”.....	99
<i>Imagen 42. “El más emblemático”</i>	100
Imagen 43. “El puente escultura”	104
Imagen 44. “Expresión plástica”	106
Imagen 45. “Alarde técnico”	107
Imagen 46. Sección Puente de Mérida	108
Imagen 47. Sección Puente de Ondárroa	109
Imagen 48. Sección Puente de Ripoll	109
Imagen 49. Sección Puente de Valencia.....	110
Imagen 50. Sección y perspectiva Puente de Bilbao	111
Imagen 51. “Juego de contrapesos”	112
Imagen 52. Sección y alzado Puente del Alamillo.....	113
Imagen 53. “Sistema de cargas”.....	114
Imagen 54. “los ensambles escultóricos de Calatrava”	115
Imagen 55. “simplificando la estructura”	116
Imagen 56. “Implicaciones del sistema estático del puente”.....	117
Imagen 57. Puente Azud del Oro (Puente de Serrería).....	118
Imagen 58. “El Puente de Serrería”	120
Imagen 59. Situación Urbanística del Puente de Serrería	122
Imagen 60. El tablero...“El vientre del puente”	125
Imagen 61. Esquema de fuerzas implícitas en el puente.....	126
Imagen 62. Circunscribir el Puente en la Proporción Aurea	127
<i>Imagen 63. Alzados generales Puente de Serrería</i>	128
Imagen 64. Desarrollo tablero-pilono	129
Imagen 65. Apoyo Articulado del tablero en el estribo Norte	130
Imagen 66. Cimentación del Pilono.....	132
Imagen 67. Contrapeso de Retenida	132
Imagen 68. Estribo Sur: Cimentación de la Retenida.....	133
Imagen 69. Sección tipo del cajón central unicelular	134
Imagen 70. Anclaje de tirantes en el cajón central.....	135
Imagen 71. Diafragmas en la extensión del cajón central	136
Imagen 72. Alzado de ménsula lateral	136
Imagen 73. Las ménsulas.....	137
Imagen 74. Articulación del Tablero	138
Imagen 75. Sección tipo del pilono	139
Imagen 76. Anclaje de tirante en pilono.....	140
Imagen 77. Rigidización del pilono.....	141
Imagen 78. La “estilizada base del pilono”.....	142
<i>Imagen 79. Integración tablero, pilono y base</i>	143
Imagen 80. Sección de los cables de atirantamiento central del puente.....	145
Imagen 81. La Retenida	147
Imagen 82. Resumen, componentes del puente	148
Imagen 83. Unión de pilono, tablero y base.....	149
Imagen 84. Secuencia constructiva.....	150
Imagen 85. Maniobras en el montaje del pilono.....	151
Imagen 86. Montaje de la retenida	152

Imagen 87. La función de la hélice en la retenida	153
Imagen 88. Amortiguador en tirantes del tablero	154
Imagen 89. El pronunciado cambio de rasante en el estribo Sur.....	156
Imagen 90. Versión temprana del Puente de Serrería.....	157
Imagen 91. “ <i>El efecto lumínico de la obra</i> ”	158
Imagen 92. Modelado 3D Auto CAD	166
Imagen 93. Modelado 3D detallado SAP2000	167
Imagen 94. Planta general del puente	168
Imagen 95. Planta Urbanización bajo el puente	169
Imagen 96. Alzados Generales.....	170
Imagen 97. Sección tipo del tablero en conexión con el estribo Sur	170
Imagen 98. Sección tipo del tablero tramo central.....	171
Imagen 99. Sección tipo del cajón central del tablero	171
Imagen 100. Sección tipo de barandilla	172
Imagen 101. Sección tipo, anclaje de tirantes	172
Imagen 102. Sección de cables, grupo (7-23)	174
Imagen 103. Sección de cables, grupo (24-29)	174
Imagen 104. Asignación de sobrecarga uniforme y sobrecarga puntual de vehículo pesado	178
Imagen 105. Sobrecarga puntual de vehículo pesado al tablero	179

Índice de Tablas

Tabla 1. El Vocabulario Calatrava	93
Tabla 2. Pesos específicos de diversos materiales (KN/m ³).....	175
Tabla 3. Asignación de Carga Muerta Permanente (CMP).....	176
Tabla 4. Valor característico de la sobrecarga de uso	177
Tabla 5. Calculo de viento simplificado.....	181
Tabla 6. Sismo Modal Espectral en SAP2000	182
Tabla 7. Movilización de masa comparativa alcanzada con 20 y 50 modos de vibración	194
Tabla 8. Modos de vibración más significativos en las componentes “X”,”Y” y “Z”	195
Tabla 9. Deformaciones Resultantes Eje 1 (ELSu).....	199
Tabla 10. Deformaciones Resultantes Eje 2 (ELSu).....	200
Tabla 11. Deformaciones Resultantes Eje 3 (ELSu).....	201
Tabla 12. Deformaciones Resultantes Eje 4 (ELSu).....	202
Tabla 13. Deformaciones Resultantes Eje 5 (ELSu).....	203
Tabla 14. Deformaciones Resultantes Eje 6 (ELSu).....	204
Tabla 15. Deformaciones Resultantes Eje 7 (ELSu).....	205
Tabla 16. Pilono 30°: Deformaciones Resultantes Eje 3 (ELSu)	211
Tabla 17. Pilono 30°: Deformaciones Resultantes Eje 6 (ELSu)	212
Tabla 18. Pilono 30°: Deformaciones Resultantes Eje 7 (ELSu).....	213
Tabla 19. Pilono 45°: Deformaciones Resultantes Eje 3 (ELSu).....	216
Tabla 20. Pilono 45°: Deformaciones Resultantes Eje 7 (ELSu).....	217
Tabla 21. Pilono 70°: Deformaciones Resultantes Eje 3 (ELSu).....	219
Tabla 22. Pilono 70°: Deformaciones Resultantes Eje 7 (ELSu).....	220

Índice de Láminas

Lámina 1. Deformaciones DEAD (Peso Propio).....	184
Lámina 3. Deformación en escala de colores SCU Lámina 1. Deformaciones DEAD (Peso Propio).....	184
Lámina 2 Deformaciones CMP (Carga Muerta Permanente).....	185
Lámina 3. Deformación en escala de colores SCU.....	186
Lámina 4. Deformaciones SCU, sección longitudinal.....	187
Lámina 5. Deformaciones SCU sección transversal y planta.....	188
Lámina 6. Deformaciones SCN.....	189
Lámina 7. Deformaciones SCN tablero (vista en planta).....	190
Lámina 8. Acción del viento (ELSVx).....	191
Lámina 9 Acción del viento (ELSVy).....	192
Lámina 10. Alabeo en modo de vibración 14 (eje X).....	196
Lámina 11. Giro en modo de vibración 7 (eje Y).....	196
Lámina 12. Vibración vertical en modo 11 (eje Z).....	196
Lámina 13. Deformada, Modelo original (ELSu).....	198
Lámina 14. Deformada (ELSu) y superposición de la estructura en estado indeformable.....	206
Lámina 15. Comprobación de Flecha Modelo Original Detallado.....	207
Lámina 16. Variantes al modelo detallado.....	209
Lámina 17. Pilono en ángulo de 30° y flecha máxima registrada en el tablero.....	214
Lámina 18. Pilono en ángulo de 45° y flecha máxima registrada en el tablero.....	215
Lámina 19. Pilono en ángulo de 70° y flecha máxima registrada en el tablero.....	218
Lámina 20. Cuadro resumen máximas deformaciones, eje vertical (Z).....	221
Lámina 21. Esfuerzos en Tirantes (ELUu) (Modelo Original Detallado).....	223
Lámina 22. Esfuerzos en Tirantes 7 al 23 (ELUu) (Modelo Original Detallado)....	224
Lámina 23. Esfuerzos en Tirantes 24 al 29 (ELUu) (Modelo Original Detallado)..	224
Lámina 24. Esfuerzos en Tirantes de Retenida (ELUu) (Modelo Original Detallado).....	225
Lámina 25. Esfuerzos en Tirantes 7 A 23 (ELUu) (Modelo Pilono ángulo de 30°)	225
Lámina 26. Peritaje y resistencia de barras.....	227
Lámina 27. Esfuerzo de Cortante en el tablero del puente (Modelo Original Detallado).....	228
Lámina 28. Apreciación de la deformada sobre el tablero (ELUu).....	229
Lámina 29. Tendencias.....	230
Lámina 30. Resumen: tendencias de deformada en ejes capitales.....	231

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Santiago Calatrava en imagen de archivo	17
Ilustración 2. El Puente de Serrería... Cavilaciones	234

Nota:

Las ilustraciones de la portada y contraportada del documento que expresan unos bocetos del Puente de Serrería son de mi autoría, realizadas previamente en visitas de campo y de reconocimiento de la obra.

BIBLIOGRAFÍA

- Adda, C. (Dirección). (1998). *Arquitecturas Satolas TGV un monumento en el campo* [Película].
- Adda, C. (Dirección). (2000). *Calatrava, Dios no juega a los dados* [Película].
- AE, C. D.-S. (2019). *Código Técnico de la Edificación: Documento Básico de Seguridad Estructural-Acciones en la Edificación*. Obtenido de <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/SeguridadEstructural.html>
- Archivo Histórico, A. d. (2008). Puente de l'Assut de l'Or.
- Ariza, H. (2016). *TWA FLIGHT CENTER. Un ave de hormigón en Nueva York*. Obtenido de <https://architecturalvisits.com/>
- Bifulco, I. (2014). *Floornature Architecture & Surfaces*. Obtenido de <https://www.floornature.it/mostra-pier-luigi-nervi-gli-stadi-per-il-calcio-10120/>
- Blanco, J. V. (2009). *'The New York Times' ataca la estación diseñada por Calatrava para la 'Zona Cero'*. Obtenido de elmundo.es: <https://www.elmundo.es/elmundo/2009/05/12/comunicacion/1242080907.html>
- Calatrava. (2008). Calatrava, s'obri el pont de l'assut de l'or. (Infotelevisio, Entrevistador) Obtenido de www.infotelevisio.com: <https://www.youtube.com/watch?v=uzPEg2wE6mQ&t=25s>
- Calatrava, S. (1989). Tres Arquitecturas. (F. Avizanda, Entrevistador)
- Calatrava, S. (1 de abril de 2000). Conferencia magistral, Teatro de la ciudad, Monterrey.
- Calatrava, S. (2005). *Puente de la Serrería, Valencia*. Obtenido de Calatrava.com: <https://calatrava.com/projects/serreria-bridge-valencia.html>
- Calatrava, S. (2020). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/oriente-station-lisboa.html?view_mode=gallery&image=1
- Calatrava, S. (2020). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/stadelhofen-station-zuerich.html?view_mode=gallery&image=4

- Calatrava, S. (2020). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/emergency-services-centre-sankt-gallen.html?view_mode=gallery&image=2
- Calatrava, S. (2020). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/bodegas-ysios-winery-guardia.html?view_mode=gallery&image=1
- Calatrava, S. (2020). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/lyon-saint-exupery-airport-railway-station-colombier-saugnieu.html?view_mode=gallery&image=1
- Calatrava, S. (2020). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/olympic-sports-complex-athens.html?view_mode=gallery&image=4
- Calatrava, S. (2020). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/ernstings-warehouse-coesfeld.html?view_mode=gallery&image=3
- Calatrava, S. (2020). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/turning-torso-malmoe.html?view_mode=gallery&image=8
- Calatrava, S. (2020). *Calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/world-trade-center-transportation-hub-new-york.html?view_mode=gallery&image=1
- Calatrava, S. (2020). *Calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/shadow-machine-new-york.html?view_mode=gallery&image=1
- Calatrava, S. (2020). *Máquina de sombras*. Obtenido de *calatrava.com*: <https://calatrava.com/projects/shadow-machine-new-york.html>
- Calatrava, S. (s.f.). *calatrava.com*. Obtenido de https://calatrava.com/projects/stadelhofen-station-zuerich.html?view_mode=gallery&image=4.
- Candela, F. (1967). *El escándalo de la Ópera de Sidney*. México: Revista Arquitectura 108.
- Candela, F. (1993). *Estructuras Transformables*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Cano, J. J. (2020). *pinterest.es*. Obtenido de <https://www.pinterest.es/pin/537687643009741007/>
- dosde-publishing. (2019). *barcelonasecreta.com*. Obtenido de <https://barcelonasecreta.com/el-colegio-de-las-teresianas/>

- Echarri, M. (11 de 10 de 2021). *Revista Forbes*. Obtenido de <https://forbes.es/actualidad/120275/los-puntos-de-fuga-de-santiago-calatrava-el-arquitecto-espanol-que-mas-ha-facturado-en-el-mundo/>
- Eggs, N. E. (s.f.). *Seminario Universitario – Física*. Obtenido de http://www.frcu.utn.edu.ar/archivos/material_ingreso/ESTATICA_apunte_utn.pdf
- Fomento, M. d. (11 de 2011). *(IAP-11) Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Obtenido de Gobierno de España Ministerio de Fomento: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820303.pdf
- Gallardo, D. D. (2021). Tabla Excel ,cálculo de coeficiente de viento simplificado.
- Garrote, M. D. (s.f.). Obtenido de La afirmación de la belleza como "el esplendor de la verdad": <http://www.fluvium.org/textos/cultura/cul92.htm>
- Garrote, M. D. (s.f.). *La afirmación de la belleza como "el esplendor de la verdad"*. Obtenido de <http://www.fluvium.org/textos/cultura/cul92.htm>
- Giovannardi, F. (1986). *Félix Candela y el joven Santiago Calatrava*. Obtenido de https://www.academia.edu/43381020/F%C3%A8lix_Candela_Y_el_joven_Santiago_Calatrava
- Jodidio, P. (2007). *Calatrava complete works 1979-2007*. Colonia, Alemania : Taschen.
- Kimmelman, M. (2016). "La estación de Nueva York diseñada por Calatrava es un disparatado símbolo del exceso". *The New York Times* .
- Languages, D. d. (s.f.). Obtenido de <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>
- Lledó, B. (12 de 12 de 2008). L'Assut de l'Or completa la ronda. *Las Provincias*.
- Martinez, C. (2020). *gaudiclub.com*. Obtenido de http://www.gaudiclub.com/esp/e_vida/escoles.html
- Medrano, O. G. (2004). Un mundo en el bolsillo: la geometría plegable de Santiago Calatrava. *Métode: Anuario*, 55-58.
- Moix, L. (2016). *Queríamos un Calatrava, viajes arquitectónicos por la seducción y el repudio*. Barcelona: Anagrama.
- Ocio y cultura, E. (2008). *elmundo.es*. Obtenido de <https://www.elmundo.es/elmundo/2008/09/10/cultura/1221082915.html>
- Ouroussoff, N. (2016). Un monumento al ego del arquitecto. *The New York Times* .

- Oxford. (s.f.). *Oxford Languages*. Obtenido de <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>
- parrilla, J. (14 de 07 de 2009). *Levante, el Mercantil Valenciano*. Obtenido de <https://www.levante-emv.com/valencia/2009/07/14/puente-l-assut-l-or-13238003.html>
- Pollalis, S. N. (2017). *¿Que es un puente? Proyecto y construcción del puente de Calatrava en Sevilla*. Madrid: Turner Publicaciones, S.L.
- Rai, A. (Dirección). (2020). *Encuentros con Pier Luigi Nervi* [Película].
- Salcedo, L. V. (11 de 11 de 2009). Obtenido de ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural: <http://e-ache.com/modules/pd-downloads/visit.php?cid=1&lid=33>
- Salcedo, L. V. (11 de 11 de 2009). *ACHE Asociación Española de Ingeniería Estructural*. Obtenido de <http://e-ache.com/modules/pd-downloads/visit.php?cid=1&lid=33>
- skyscrapercity, F. (2008). *skyscrapercity*. Obtenido de Foro: Puente l'Assut de l'Or (Calatrava) /CAC (Valencia) /Finalizado: <https://www.skyscrapercity.com/threads/puente-l-assut-de-lor-calatrava-cac-valencia-finalizado.163487/page-68>
- Terroaristas, e. B. (2012). *terroaristas.com*. Obtenido de <http://terroaristas.com/wp-content/uploads/2012/10/alzado.jpg>
- Tzonis, A. (2006). *Calatrava Bridges* . Universe.
- Velert, S. (11 de 12 de 2008). El penúltimo "Calatrava" de Valencia. *El País* .

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas últimas líneas para agradecer primeramente a Dios por permitirme escalar un peldaño más, un logro más en mi vida profesional, a la Universidad Politécnica de Valencia y las directivas del master y a todos los profesores que tuve la dicha de conocer, especialmente al profesor David Gallardo Llopis, su excelencia y determinación son ejes fundamentales que me han permitido encaminar el Trabajo de Fin de Máster.

Agradecimiento profundo a mi familia en Colombia, que siempre me han apoyado y en la distancia me envían toda la buena energía que me brinda el aliento para luchar cada día.

Agradecimiento muy especial a la familia Sanchis Palazón, por el apoyo incondicional, su extensa humanidad, su apoyo incondicional han posibilitado el poder cursar el máster.

Agradezco especialmente a Edinson, Elena, Cristina, Carlos, por su apoyo de nuevo incondicional, gracias a mi pareja por la paciencia y el cariño. También agradezco a todos los compañeros del master que hicieron agradable la experiencia, especialmente a los compañeros Diego y Laura.

Por último, agradezco a las personas que me concede parte de su valioso tiempo para leer este documento.

Gracias infinitas.

