

Puente de la Exposición de Santiago Calatrava: *Morfología estructural*

Katerine Angela Rado Cusi

Trabajo de Fin de Máster
Tutor: David Gallardo Llopis
Cotutor: Adolfo Alonso Durá



Universidad Politécnica de Valencia
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Máster Universitario en Arquitectura Avanzada, Paisaje, Urbanismo y Diseño

Curso 2019–2020

*A María.
Soy, por ser tú mi madre.*

INTRODUCCIÓN

La obra de Calatrava en Valencia, ha marcado un hito en la arquitectura de la ciudad: por la introducción de un nuevo lenguaje de formas, por los recursos excesivos que se necesitaron para ejecutarla y después mantenerla, por las dificultades¹, o por la notoriedad que ha traído consigo. De ahí, la gran cantidad de bibliografía dedicada a esta obra.

Sin embargo, sorprende que, dada la envergadura de las intervenciones de Calatrava en Valencia, esta literatura sea solo un compendio de descripciones, opiniones e imágenes, mas no existe un análisis objetivo.

Sean detractores o defensores del trabajo de Calatrava, la mayoría coincide en que el arquitecto/ingeniero/artista ha llegado a ver como falsa toda opinión convencional, decidiendo desarrollar el *tesauro Calatrava*². Muchos autores sugieren que este tesauro responde a un proceso de descubrimiento más que de invención. Descubrimiento del lenguaje formal de las fuerzas estructurales.

Sin embargo, ¿es esto cierto?, ¿realmente las fuerzas guían la elección formal de Calatrava? —en muchos casos extravagante, consumiendo recursos excesivos—. De ser así, ¿en qué medida el arquitecto optimiza el comportamiento estructural?

Considerando esta realidad, el presente trabajo desarrolla el estudio de la forma estructural del Puente de la Exposición de Santiago Calatrava, mediante la experimentación de modelos tridimensionales en el programa de cálculo SAP2000, para determinar si la forma del puente es o no, a un tiempo, escultórica y funcional.

ÍNDICE

I.	Puentes	8
PRIMERA PARTE		
<i>El cómo: la técnica</i>		
II.	Santiago Calatrava	14
	Trayectoria	
	Arquitecto, ingeniero y artista	
	Olvido y búsqueda de un nuevo lenguaje	
	Generatriz del nuevo lenguaje	
III.	Morfología estructural	28
	Robert Maillart	
	Eduardo Torroja Miret	
	Félix Candela Outeriño	
SEGUNDA PARTE		
<i>El qué: la obra</i>		
IV.	Puente de la Exposición	40
	Datos generales	
	Conceptualización	
	Realización	
	Críticas	
TERCERA PARTE		
<i>El porqué: la morfología estructural</i>		
V.	Metodología	54
	Modelización	
	Acciones	
	Comportamiento estructural	
VI.	Modelización	60
	Modelo detallado	
	Modelo simplificado	

VII. Análisis estructural	86
Cálculo de acciones	
VIII. Morfología estructural	94
Forma estructural	
Comportamiento estructural	
Modelo original: detallado	106
Deformaciones resultantes	
Esfuerzos resultantes	
Transición del modelo detallado al simplificado	142
Modelos alternativos: simplificado.....	151
Variación ángulo de inclinación del arco	
Deformaciones resultantes	
Esfuerzos resultantes	
Causas del comportamiento estructural	
Variación posición del arco respecto al eje	
Deformaciones resultantes	
Esfuerzos resultantes	
Causas del comportamiento estructural	
Variación curvatura del tablero	
Deformaciones resultantes	
Esfuerzos resultantes	
Causas del comportamiento estructural	
IX. Conclusiones	228
Palabras clave	236
Notas	238
Tablas	244
Láminas	246
Bibliografía	248
Créditos fotografías y dibujos	252
Agradecimientos	

I

PUENTES¹

Entre la humanidad de las riveras
hoy ondula la fuerza de la línea,
la flexibilidad
a la dureza,
la obediencia impecable
del material severo.
Por eso, yo, poeta
de los puentes,
cantor de construcciones,
con orgullo
celebro
el atrio
... porque no una pirámide
de obsidiana sangrienta
ni una vacía cúpula sin dioses,
ni un monumento inútil de guerreros
se acumuló sobre la luz del río,
sino este puente que hace honor al agua
y que la ondulación de su grandeza
une dos soledades separadas
y no pretende ser sino un camino. 2

NERUDA

CAMINO

La naturaleza unificadora del puente —une dos soledades separadas—, ha estado y está en el sentir de la gente, clara muestra es la variada producción artística que existe en torno a esta construcción: poemas, novelas, cuentos, películas, etc. Y no es para menos, ya que el puente es el hombre desafiando la naturaleza, haciendo caminos —puentes— antes imposibles.

Los puentes quizá representen la forma de expresión más pura de la construcción, en ellos convergen el rigor de la física y el ingenio del ser humano.

El puente es un camino. Esta concepción no ha cambiado, se ha ampliado. Inicialmente salvaba ríos para el paso de personas, hoy en día pasa sobre autopistas, bosques, etc., para permitir el paso de automóviles, vegetación, barcos, etc.

La evolución del puente se debe al cambio que han sufrido los factores que influyen en su configuración. De entre todos, destacan tres factores: las condiciones del terreno, los requerimientos del camino y la técnica disponible.

Las **condiciones del terreno** fueron antaño, determinantes en el diseño de los puentes. Estos se construían en zonas donde la luz necesaria sea la menor posible; zonas accesibles para el traslado de materiales; entre otras. Sin embargo, el avance de la técnica ha disminuido la influencia de este factor, asumiendo mayor protagonismo los requerimientos del camino.

Los **requerimientos del camino** cambian según los medios de transporte. En un inicio, cuando se trasladaban a pie, solo se necesitaba que el camino estuviera limpio de obstáculos y señalizado. Posteriormente, llegaron los Romanos trayendo consigo el primer gran desarrollo de los caminos, estos se trasladaban a caballo, o en carros de dos o cuatro ruedas, estas nuevas condiciones exigieron ampliar y nivelar el camino. En la Edad Media se trasladaban principalmente a caballo, por lo que los caminos se agostaron. En el siglo XVI se introdujeron las carrozas a caballo, para luego pasar al ferrocarril y automóvil, transformando el camino hasta llegar a las autopistas y líneas férreas de alta velocidad actuales.

Los nuevos requerimientos pudieron ser satisfechos gracias a la evolución de la **técnica**. Hoy contamos con herramientas precisas de cálculo, mayor variedad de materiales –a los tradicionales piedra y madera, se sumaron el hormigón y el acero, y recientemente, las fibras– procedimientos constructivos y formas estructurales –arco, pórtico, colgante y atirantado–.

PAISAJE

El camino es una de las manifestaciones formales de la relación del hombre en el espacio y el tiempo, modelado por los factores sociales, económicos y culturales. Se inserta en el medio, transformándolo y pasando a formar parte de él, configurando así, un nuevo paisaje, el cual, inevitablemente generará una reacción emocional en el usuario, dado que no puede eludir verlo.

El camino es una obra lineal, para verlo hay que recorrerlo, y el puente es un hito en este camino, visible y abarcable en un solo momento, debido a su singularidad en forma.

Dada su particularidad en el contexto, los puentes enfrentan un problema importante a resolver: su adaptación en el paisaje existente, ya sea natural o artificial. La alteración que genere el puente, puede ser positiva o negativa, puede pasar inadvertido o constituir un hito en el territorio, ello dependerá del medio en el que se implante, de la calidad de la obra, etc.—tal es el caso del puente Firth of Forth, el cual produjo reacciones negativas en la ciudadanía debido, entre otros, a su escala, sin embargo hoy, junto al Golden Gate, son emblemas de la ciudad de San Francisco—.

En este tipo de intervenciones, es pertinente la búsqueda de mínimos: la alteración que se produzca en el medio donde se implanta debe ser positiva o en su defecto, mínima. Debería incluirse el dialogo con sus alrededores, para que, de este modo, la construcción contemporánea asimile la dosis de vida que ahora le falta.

PRIMERA PARTE

El cómo: la técnica

II

SANTIAGO CALATRAVA

Me gustaría volver ahora a Valencia —y a su río, el Turia—, si uno observa las antiguas puertas de piedra de la ciudad y el puente gótico que conduce hasta esas puertas, se observa que hay muy poca diferencia entre el lenguaje arquitectónico de las puertas de la torre y el puente... Es decir, si retrocedemos un poco, llegamos a una época en la arquitectura y la construcción de puentes se hallaban absolutamente ligadas. 1

CALATRAVA

TRAYECTORIA²

- 1951 Valencia: Nace en Benimámet.
- 1960-68 Valencia: Cursa el liceo.
- 1968-69 Valencia: Estudia en Bellas Artes.
- 1969-74 Valencia: Estudia en la Escuela Superior de Arquitectura.
- 1975-79 Zúrich: Estudia Ingeniería Civil en el Instituto Federal de Tecnología (ETH).
- 1979-81 Zúrich: Título de Doctor en Ciencias Técnicas concedido por el Departamento de Arquitectura de la ETH, con la tesis *Acerca de la plegabilidad de las estructuras*. Profesor auxiliar en la ETH.
- 1981 Zúrich: Abre estudio de arquitectura e ingeniería civil —único estudio operativo—. ³
- 1989 París: Abre segundo estudio —está cerrado—.
- 1991 Valencia: Abre tercer estudio —está cerrado—.
- 1991-95 Valencia: Proyecto y ejecución del Puente de la Exposición.
- 2004 Nueva York: Abre cuarto estudio —está cerrado—.

ARQUITECTO, INGENIERO Y ARTISTA

Venid— dijeron los hombres—, vamos a edificar una ciudad y una torre, cuya cima llegue hasta el cielo: y hagamos célebre nuestro nombre antes de esparcirnos por toda la faz de la tierra. Y descendió el Señor a ver la ciudad y la torre que edificaban los hijos de Adán. Y dijo: He aquí, que el pueblo es uno solo, y todos tienen un mismo lenguaje; y han empezado esta fábrica, ni desistirán de sus ideas hasta llevarlas a cabo. Ea, pues, descendamos y confundamos allí mismo su lengua, de manera que el uno no entienda el habla del otro. Y de esta suerte... cesaron de edificar la ciudad. De donde se le dio el nombre de Babel, porque allí fue confundido el lenguaje de toda la tierra.⁴

GÉNESIS 11, 3-9

El nacimiento de un puente requiere tanto, de la razón como de la emoción, del ingenio con estudio, de la imaginación con sensibilidad, fuera del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración. Debe satisfacer, al mismo tiempo, las exigencias del técnico y del artista, lazo que se ha ido debilitando debido, entre otras, a la especialización de las profesiones y la comunicación deficiente entre estas. Tal es el nivel de confusión en el lenguaje, que el problema fue llevado a la Academia, la cual ofreció un premio al mejor trabajo que versara sobre *La unión del ingeniero y el arquitecto*. Davioud⁵ se llevó el premio con esta repuesta: «El acorde no llegará nunca a ser real, completo y fructífero hasta el día en que el ingeniero, el artista y el hombre de ciencia estén fundidos en una misma persona»⁶.

Calatrava, ingeniero, artista y arquitecto, fundidos en una persona. Se diría que hablan una misma lengua y se entienden, alcanzando el consenso real. Entonces, ¿por qué su obra recibe constantemente críticas negativas? Quizá exista un desequilibrio en el papel que desempeñan cada uno de los tres actores.

Calatrava ingeniero⁷, notoriamente influenciado por el trabajo de predecesores como Robert Maillart y Eduardo Torroja. Además, exploró y aplicó la técnica de estructuras plegables, usada por Da Vinci y la NASA.

Calatrava artista⁸ trabaja mediante el dibujo —lápiz y acuarela— y la escultura, extrayendo formas y conceptos de la Naturaleza, como el *ojo* o el *equilibrio*.

Ambas facetas resultan interesantes y fructíferas. Sin embargo, no se puede decir lo mismo de la tercera faceta: **Calatrava arquitecto**. Ya que, muchas de sus obras son criticadas por la deficiente función, por estar fuera de escala humana, entre otros aspectos ligados estrechamente al hacer del arquitecto. Jodidio⁹ recoge una declaración del arquitecto que quizá explique esta falencia:

«Estaba decidido a dejar de lado todo aquello con lo que había trabajado en la facultad de arquitectura y a aprender a dibujar y pensar como un ingeniero».10

A continuación, se expondrá brevemente la técnica usada por Calatrava, con el fin de entender su obra —aciertos y desaciertos—, al margen de los sesgos individuales, y así, tener una apreciación objetiva del Puente de la Exposición.

OLVIDO Y BÚSQUEDA DE UN NUEVO LENGUAJE

Tan inútil es aprender sin meditar, como
 peligroso pensar sin antes haber
 aprendido de otros.11

CONFUCIO

Calatrava llegó a ver como falsa toda opinión convencional, centrando su interés en la búsqueda de un nuevo vocabulario:

“Sentía un intenso deseo de empezar desde cero. Estaba decidido a dejar de lado todo aquello con lo que había trabajado».12

En esta declaración se ve claramente la intención de buscar nuevas soluciones, desechando las ya encontradas. Lo cual podría devenir en *pseudosoluciones*¹³, dado que el objetivo ya no es resolver el problema, sino innovar por innovar.

Las más hermosas construcciones son fruto del conocimiento acumulado, ponemos como ejemplo los elegantes puentes del ingeniero suizo Robert Maillart¹⁴, quien, consciente de la riqueza del conocimiento heredado, repetía las mismas soluciones –por más arcaicas que parecieran– y solo las cambiaba cuando encontraba una mejor. Hasta antes del puente Schwandbach¹⁵ usó los tradicionales muros de arranque y parapetos macizos (fig. 1), puesto que le aportaban la rigidez necesaria. En dicho puente cambió de solución, ya que, el problema era diferente y ameritaba una nueva respuesta. Los caminos a conectar precisaban de un puente curvo, dicha curva fue resuelta por arcos y muros que se ensanchan en los extremos, para seguir la curva en planta, rigidizándolo y haciendo posible prescindir de los muros de arranque y del parapeto, obteniendo un diseño más esbelto y atractivo a la vista (fig. 2).

Soluciones o pseudosoluciones, indagaremos en el origen del vocabulario Calatrava. Se identifican tres polos en la generatriz de su lenguaje:

1. Movimiento
2. Metáfora orgánica
3. Morfología estructural

GENERATRIZ DEL NUEVO LENGUAJE

Movimiento

Antes de Calatrava, esta posibilidad había sido escasamente explorada para su aplicación en la arquitectura. Los primeros intentos de introducir movimiento en la arquitectura se remontan a los 60's con:

1. El Auditorio Cívico de Pittsburg: Construido en 1961, fue el primer estadio con techo retráctil de la historia.¹⁶
2. El grupo Archigram (1960–1974)¹⁷: Plantearon diseños de grandes máquinas con partes plegables. Sin embargo, no tuvieron aplicación práctica.
3. William Zuk y Roger H. Clark: Autores del libro *Arquitectura cinética* (1970). Creían que la arquitectura debía ser una máquina viviente, dado que el mundo está en constante cambio.¹⁸ A pesar de sus esfuerzos, no lograron armar un conocimiento coherente.¹⁹
4. Richard Buckminster Fuller (1895-1983): Arquitecto estadounidense, desarrolló una red espacial de una capa, desplegable mediante un mecanismo neumático. Empero, lo complicado del modelo móvil, impidió su aplicación práctica²⁰.
5. Emilio Pérez Piñero (1935-1972)²¹: Arquitecto Valenciano, desarrolló una red desplegable metálica de doble capa, capaz de transportarse en un haz. Citada red parece ser desarrollada independientemente de la de Fuller, puesto que, idea un mecanismo más completo y elegante: resuelve el problema de doble capa y de empaquetado, además las barras están articuladas no solo en los extremos, sino también en le medio, permitiendo mayores posibilidades. No obstante, este trabajo se vio truncado

por la temprana muerte de Emilio —muere en un accidente de coche a los 37 años—.

Por su parte, Calatrava parece estar inspirado en diseños más lejanos en el tiempo, Da Vinci y el programa espacial²²:

1. Da Vinci (1452–1519)²³: quien exploró matemáticamente el vuelo de los animales, para poder aplicarlo a las máquinas. Fue el precursor en el diseño de estructuras plegables.
2. Programa espacial: En los 60's el programa espacial dedicó sus esfuerzos a desarrollar instrumentos que pudieran ser compactos y ocupar poco espacio en la nave, para luego expandirse en el espacio: colectores solares, sensores, etc. Dentro de estos esfuerzos, la NASA (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio) —y la NAVY (Armada de los Estados Unidos)— mostró interés por las estructuras desarrolladas por Pérez Piñero, de hecho, estuvo a punto de construir una estación lunar, usando dicha técnica²⁴.

El primer trabajo de Calatrava en este campo, fue su tesis doctoral *Acercas de la plegabilidad de estructuras*. Dicho trabajo estudia y desarrolla un método, para la transformación de estructuras tridimensionales a bidimensionales y lineales, mediante el movimiento de sus partes. Como un paraguas, que es capaz de pasar de un tubo a un plano. En este trabajo, el ingeniero se enfrentó a tres problemas que debía entender y solucionar:

1. Visualizar la transformación geométrica de la forma plegada a no plegada.
2. Resolver el problema mecánico de mover la estructura de una a otra posición.
3. Estabilizar las uniones articuladas, una vez se alcance la forma deseada.

Para abordar estos problemas, Calatrava dividió el estudio en dos partes:

1. Diseñar modelos geométricos tridimensionales que pudieran compactarse.
2. Diseñar las articulaciones que permitieran la transformación.

No se consideró la resistencia de los materiales, este aspecto sería estudiado aisladamente e incorporado en una etapa posterior.

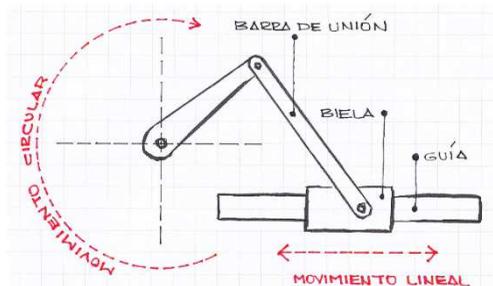
El ingeniero necesitaba encontrar una fórmula general, que pudiera generar un gran número de alternativas. Esta fórmula, la halló en la teoría matemática de los *enlaces*. Los *enlaces*, son un conjunto de barras conectadas mediante uniones, que permiten cierto grado de movimiento. Estas, al estar conectadas, propagan el movimiento a todo el conjunto, siguiendo caminos rectos o curvos. Gracias a estos dos aspectos, los enlaces pueden transmitir poder y procesar información. Un ejemplo de *enlace* es la manivela (fig. 3), propaga y transforma el movimiento rectilíneo en rotacional.



1. Puente Tavanasa, Tavanasa, Suiza, 1905.



2. Puente Schwandbach, Berna, Suiza, 1933.



3. Funcionamiento de un enlace: manivela.



Usando esta estrategia, Calatrava exploró gran cantidad de escenarios, generando un inventario de soluciones, un *tesauro*, del cual poder extraer las necesarias según los requerimientos de diseño. Un ejemplo de la aplicación de este tesauro, son las puertas de la Fábrica Ernstings (fig. 4): de puertas se transforman en marquesinas, que se asemejan a las olas.

Metáfora orgánica

La naturaleza no es un sistema en equilibrio, es un sistema en un delicado estado de desequilibrio, de no ser así, aún seríamos unas «malditas bacterias» –bromea Richard Dawkins²⁵ en su libro *El relojero ciego*—. Gracias a este desequilibrio los elementos de la naturaleza han ido perfeccionándose, hasta llegar a los complejos organismos que hoy habitan la Tierra. Por tanto, la Naturaleza es una base de datos que contiene la información de unos 4 470 millones de años, el tiempo que tiene la Tierra.

Calatrava —al igual que muchos de sus predecesores y contemporáneos— reconoció el potencial de esta base de datos e intentó extraer algo de su esencia. De la base de datos extrajo dos conceptos, que mediante el arte, tratará de plasmar en la arquitectura:

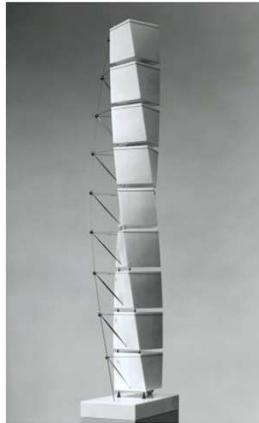
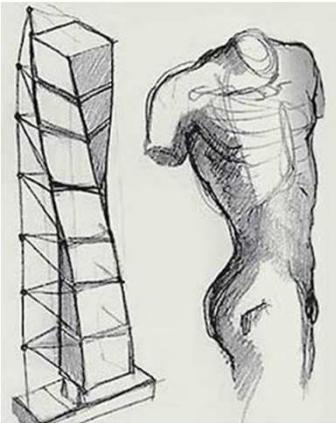
1. Equilibrio
2. Formas que se arriostan a sí mismas

Mediante la escultura, explora los cuerpos en **equilibrio** o mejor dicho, el límite estático. Concentra las cargas en puntos críticos, inclinando, torciendo y tensando los volúmenes, hasta dar con composiciones acrobáticas, que parecieran desafiar las leyes de la física (fig. 5). Esta exploración generalmente termina en obras de arte, con algunas excepciones que llegan a ser arquitectura, como el Turning Torso de Malmö (fig. 6, 7 y 8), metáfora del torso humano, al momento de torcerse.

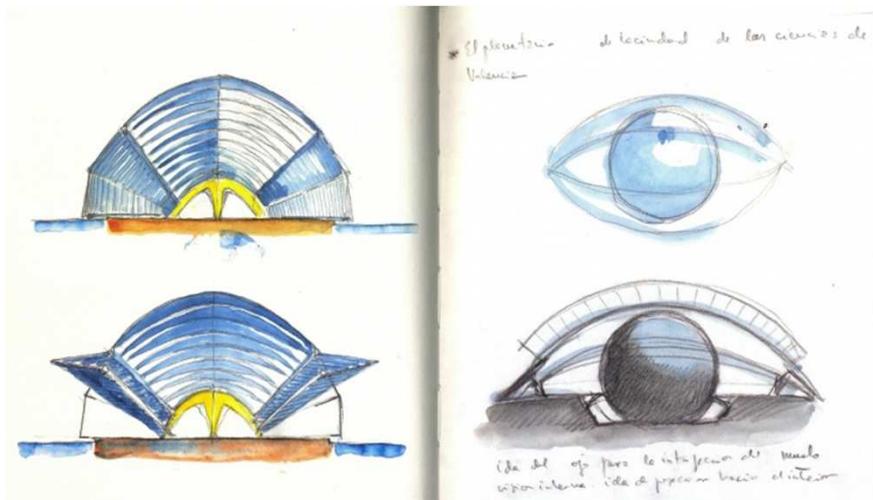
Mediante el dibujo imita **formas** de la Naturaleza con dos claras intenciones: generar elementos que recojan la cualidad de arriostarse a sí mismos y generar emoción. Tal es el caso del *ojo*, figura recurrente en sus dibujos (fig. 9), base de muchos de sus edificios. Por ejemplo, L'Hemisfèric (fig. 10) o incluso el mismo Puente de la Exposición, pretexto de este estudio.

A la pregunta que Nervi²⁶ se plantea sobre las formas orgánicas: «¿Por qué nos satisfacen y nos conmueven esas formas de la misma manera que los objetos naturales, como las flores, las plantas y los paisaje, a los que nos hemos acostumbrado en el curso de innumerables generaciones?»²⁷, la respuesta quizá sea: porque respetan las leyes de la Naturaleza.

Sin embargo, la obra resultante de esta metáfora orgánica parece satisfacer parcialmente las intenciones. Por un lado, está claro que genera emoción, miles de personas conocedoras o no de arquitectura, viajan para visitar sus obras²⁸. Mientras que por otro, el equilibrio y la forma que se arriestra a sí misma, están cuestionadas. Explicaré esta postura con el Turning Torso²⁹: la estructura no está en el límite estático ni la forma colabora con el comportamiento estructural, todo lo contrario, fueron necesarias varias paralizaciones de obra, la intervención de otros ingenieros y el reforzamiento de la estructura, para hacer viable el diseño planteado. Como resultado el tiempo y costos se elevaron considerablemente —el presupuesto se excedió en casi 85 millones de euros—.



6, 7 y 8. Dibujo, escultura y edificio del Turning Torso, Malmö, Suecia, 1999-2005.



9. Metáfora del ojo, para el diseño de L'Hemisfèric.



10. L'Hemisfèric, Valencia, España, 1998.

III

MORFOLOGÍA ESTRUCTURAL

En las escuelas hay tanto que aprender
que rara vez queda tiempo para pensar.¹

TORROJA

Este polo tendrá sus bases en la obra de figuras como: Robert Maillart, Eduardo Torroja, Félix Candela, Antonio Gaudí, entre otros. Estos, reconocieron la importancia de la forma en el comportamiento estructural, revalorando el factor estético, sin que esto signifique el detrimento de la función, técnicas imposibles o excesivos costos.

Antes de someter la obra de Calatrava al cálculo, se intuye que, como él afirma, busca lograr lo que sus predecesores, un lenguaje de formas blandas, justificadas en el comportamiento estructural:

«Podría afirmar que mi gusto por la sencillez en ingeniería procede en parte de mi observación de la obra del ingeniero suizo Robert Maillart. Maillart demostró que es posible crear un contenido sólido y suscitar una respuesta emocional con formas simples. Con la combinación adecuada de fuerza y volumen, uno puede crear emoción».²

A continuación, se explica brevemente algunas obras fruto del estudio de la forma estructural. Estudio que Calatrava intentará continuar y aplicar en sus proyectos; tal es el caso del Puente de la Exposición.

ROBERT MAILLART

Ingeniero suizo

Reintrodujo³ la variable estética a los puentes, aplicando soluciones elegantes y técnicamente apropiadas. Para él, las fuerzas siguen la forma elegida, por tanto, es de vital importancia elegir la forma adecuada.

La obra que se presenta a continuación es uno de los más hermosos puentes construidos, el Puente Schwandbach (fig. 13). En este, aplica el método de rigidización de la plataforma transitable⁴.

El método mencionado, parte de dos asunciones:

1. Las tensiones debido a las acciones variables son despreciables. Por lo tanto, estas serán asumidas por la viga rigidizadora.
2. Ya que la plataforma está unida al arco, mediante los muros transversales, se asume que la deformación de la plataforma será igual a la del arco.

Ahora, aplicamos una fuerza uniformemente distribuida W a la mitad izquierda del puente. En este contexto, se plantean dos situaciones:

1. Plataforma no rígida: Obtenemos una deformación Δ , y la acción recibida por los muros transversales será WA , dónde A es la distancia entre muros (fig. 11).
2. Plataforma rígida: Obtenemos una deformación aproximada $\Delta/10$, dado que la plataforma rígida se resistirá a la deformación, distribuyendo la acción WA en todo el puente. De esta manera, la acción WA se reduce a la mitad (fig. 12).

El elemento soportado pasa a ser soportante y colabora con el arco, obteniendo una estructura más liviana, que a su vez permite abaratar el costo de ejecución.

Adicionalmente, —por primera vez— proyecta la planta en curva, optimizando aún más el diseño:

1. Suaviza la transición entre la carretera y el puente.
2. Incrementa la rigidez frente a las acciones horizontales, ya que, el arco y muros transversales se ensanchan a los extremos, para seguir la trayectoria de la plataforma curva.
3. Debido al incremento de rigidez, elimina los muros de arranque y parapetos macizos, los cuales, habían sido hasta este momento, una táctica aplicada por el ingeniero (fig. 1).

EDUARDO TORROJA MIRET

Ingeniero español

Defendió el pensar antes de calcular, revalorando el estudio ontológico de la morfología resistente.

Por otro lado, instó a buscar el equilibrio entre la finalidad utilitaria, estructural, la exigencia estética y la limitación económica.

Una de las obras que ejemplifica lo que perseguía, y lo que finalmente consiguió, es el Hipódromo de Zarzuela (fig. 16).

El ingeniero describe su obra como una solución evidente a los requerimientos funcionales y estructurales. Partió de un esquema funcional, el cual fue puliendo según el comportamiento de las fuerzas⁵ (fig. 14):

1. Cubierta de sección variable: Se incrementa el canto a medida que se acerca al soporte, dada la flexión máxima de la zona.
2. Soportes de cubierta: El pilar anterior trabajará a compresión, mientras que el posterior, a tracción. Por lo tanto, el primero se robustece y el segundo, pasa a ser un tirante.

3. Losa de sala de apuestas: Se elimina el pilar, dado que la losa será soportada por el tirante superior. Ahora la losa trabaja como ménsula, aumentando hacia el soporte, dónde las flexiones son máximas. Se mantiene la inclinación del extremo de la losa, para permitir las visuales de la galería al paddock.
4. Losa de entreplanta: Dada la robustez del pilar de la cubierta, se elimina el de la entreplanta, pasando a ser una ménsula de canto variable.
5. Gradería: Se engrosa la gradería y el pilar se retrae, transformándola en una viga inclinada con ménsula en el extremo. Rigidizará transversalmente.
6. Articulación del pilar principal a compresión: Ya que la cubierta está estabilizada por dos puntos y, la viga inclinada rigidiza transversalmente; el ingeniero optó por articular ambos extremos del pilar, para evitar problemas de dilatación y estilizar el elemento.
7. Reducción de canto en viga inclinada: Se reduce para ganar espacio en la entreplanta.
8. Curvatura de las losas y cubierta⁶: Dado que el esquema final sugería una curvatura, se adoptó esta, para la sala de apuestas y galería —bajo la gradería—. En cuanto a la cubierta, inicialmente se pensó plana con ménsulas, dicha opción fue descartada por pesada y poco estética. Se decidió dar continuidad al diseño curvo de las losas. De unas láminas de arcos, se pasó a conoides hasta llegar a hiperboloides. El hiperboloide constituye en sí mismo la estructura portante y, resulta una curva convexa vista desde abajo, ampliando las visuales desde la gradería (fig. 15).

FÉLIX CANDELA OUTERIÑO

Arquitecto español

Candela consideraba que, si una estructura no se construye de manera sólida, capaz y económica, no puede considerarse exitosa.

En la búsqueda de esta estructura exitosa, el arquitecto encontró la geometría del paraboloides hiperbólico (fig. 17). En 1970 Colín Faber⁷ hacía la siguiente afirmación sobre el paraboloides hiperbólico: “única superficie que, en el estado actual de la técnica constructiva y analítica, reúne todas las condiciones deseables para un cascarón”⁸, debido a que:

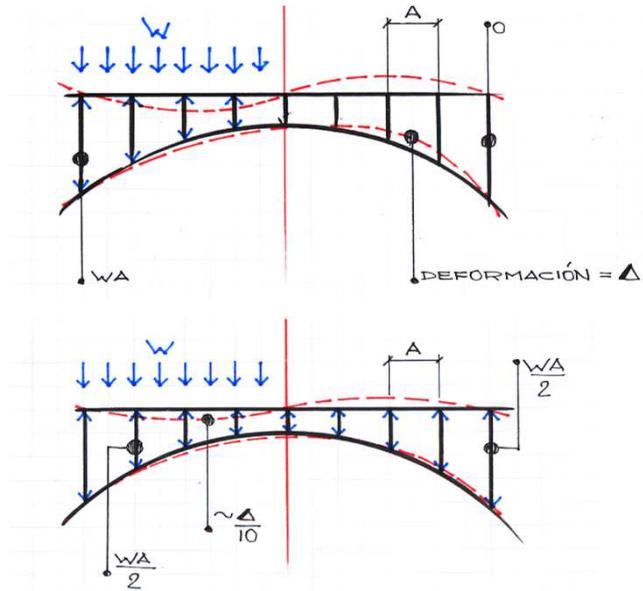
1. Tiene una forma inmutable bajo la acción de cargas cualquiera, debido a la doble curvatura.
2. Desarrolla esfuerzos de membrana exclusivamente, bajo cualquier sistema de cargas, permitiendo adelgazar la lámina al mínimo constructivamente posible.⁹

“Consiguiendo las dos ventajas de este tipo de estructuras; reducción del peso propio y posibilidad de adaptación en su comportamiento estructural en casos de cargas no previstas, sin salirse del régimen de membrana.”¹⁰ A lo que debemos sumar la factibilidad de ejecución, por estar compuesto de segmentos rectos con variación de ángulo.

Candela desarrolla una de sus mejores obras, la Capilla de Lomas (fig. 19), aplicando el paraboloides hiperbólico cortado por planos oblicuos, para dar forma a los vanos.

Gracias a los esfuerzos de membrana, la mayor parte de la estructura tiene un espesor de 4 cm. Sin embargo, fue necesario engrosar y/o reforzar con acero, aquellas zonas de acumulación de fuerzas¹¹ (fig. 18):

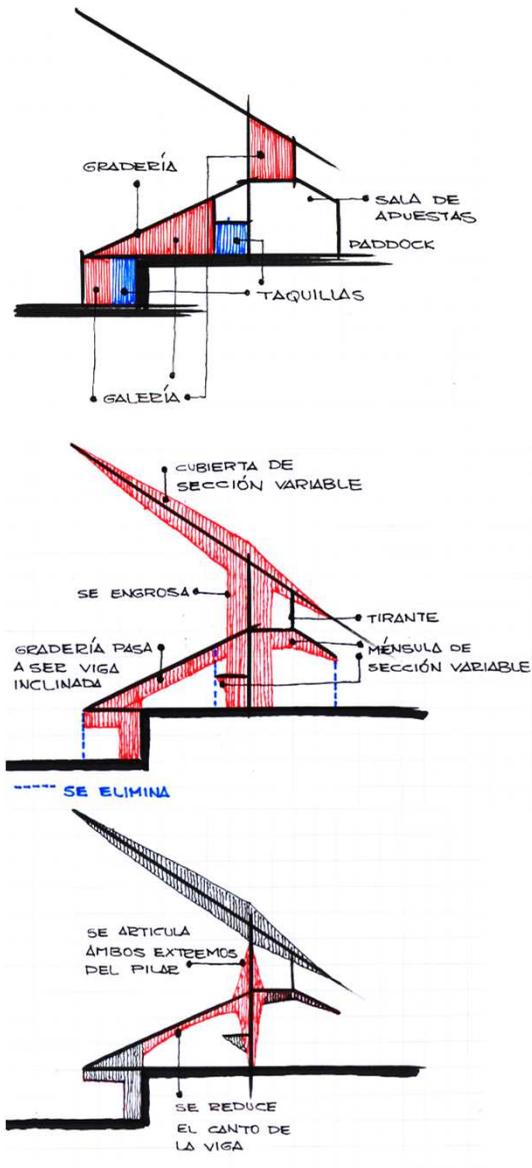
1. El borde de los vanos, dado el corte que se hizo a la geometría del paraboloides hiperbólico.
2. La base del vano más alto —21 m de altura¹²—, debido al peso propio.
3. Eje del paraboloides hiperbólico, debido a las acciones horizontales.



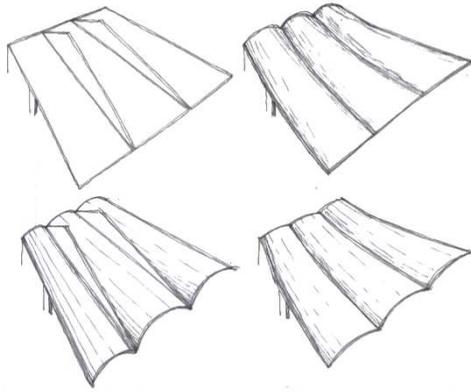
- 1, 2. Comportamiento estructural de modelos: uno con plataforma no rígida y el otro, con plataforma rígida.



3. Puente Schwandbach, Berna, Suiza, 1933.



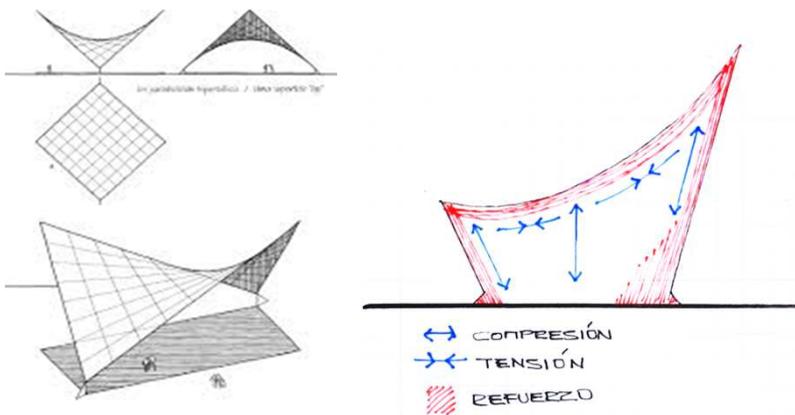
4. Evolución del diseño del Hipódromo de Zarzuela.



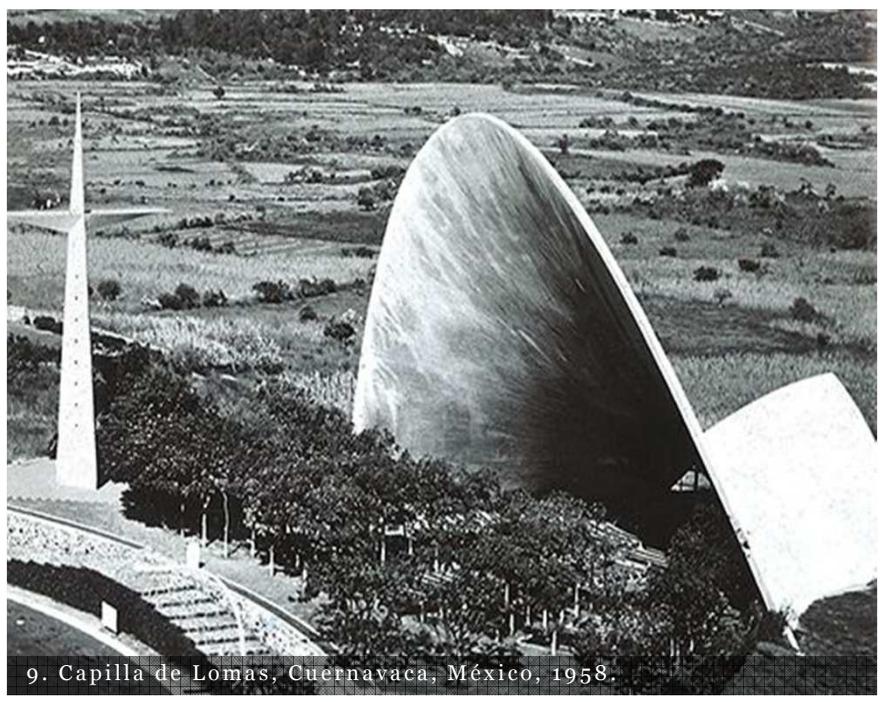
5. Cubierta plana, de arcos, conoidal e hiperboloide, de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.



6. Hipódromo de Zarzuela, Madrid, España, 1935.



7, 8. Paraboloides hiperbólico. Diagrama de esfuerzos de la capilla.



9. Capilla de Lomas, Cuernavaca, México, 1958.

SEGUNDA PARTE

El qué: la obra

IV PUENTE DE LA EXPOSICIÓN

La vitalidad de los puentes proviene de la necesidad como del hecho de que son sorprendentemente expresivos, elementos de la ciudad que no pasan inadvertidos. 1

CALATRAVA

El nombre Puente de la Exposición fue adoptado en memoria del antiguo puente construido en 1909 a raíz de la Exposición Regional de Valencia del mismo año, dicho puente fue destruido por la gran riada que sufrió Valencia en 1957.

DATOS GENERALES²

- Ubicación: Antiguo cause del río Turia, actualmente parque lineal de la ciudad de Valencia. Conecta la zona universitaria con el centro histórico, a la altura de la Avenida Colón (fig. 1).
- Año: 1992 a 1995
- Cliente: Generalitat Valenciana, Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte.
- Constructores: Entrecanales y Tavora S.A.
Ocisa, Obras y Construcciones Industriales S.A.
- Consultor: Ibérica de Estudios e Ingeniería S.A.
- Proyectista: Calatrava Valls S.A.
- Presupuesto³: 12,6 millones de euros contractuales más 23,4 millones de euros adicionales –costo global, incluye la estación Alameda—.
- Uso: Tres carriles vehiculares en sentido noreste, un carril bici y dos aceras peatonales, una a cada lado.

CONCEPTUALIZACIÓN

Los tres polos creativos que se identificaron: movimiento, metáfora orgánica y morfología estructural, son conceptos que se entrelazan naturalmente: los elementos orgánicos poseen movimiento y sus cuerpos se soportan a sí mismos por su forma y materialidad. Por tanto, al analizar la obra de Calatrava, el Puente de la Exposición, es inútil tratar de marcar fronteras entre los tres polos, y se deben entender entrelazados.

En la conferencia para el Instituto de Tecnología de Massachusetts —MIT por sus siglas en inglés—, Calatrava habló sobre su concepción estructural de los puentes: si hacemos la analogía del puente como cuerpo viviente, el corazón sería el equilibrio estático⁴.

Efectivamente, en el Puente de la Exposición se puede ver la búsqueda del límite estático mediante el diseño asimétrico en sección. En consecuencia, se toma como concepto central de diseño: el equilibrio.

Equilibrio

Como vimos, el arquitecto explora mediante la escultura, el límite estático de los cuerpos, seguramente dicha exploración lo llevó a notar que la resistencia a torsión soportada por la viga de la calzada en puentes con arco vertical/ central, estaba siendo desaprovechada.

Así, a fin de aprovechar la torsión de la viga, desplaza el arco a un costado y lo inclina, la sección resultante resulta, en esencia, igual a la escultura Bou (fig. 2).

Su primer experimento fue el Puente La Devesa en Ripoll (fig. 4): «puesto que el soporte —el arco— se ha desplazado hacia uno de los lados, el peso propio y sus cargas crean un momento

torsor en el punto de soporte. Esta torsión recae en una sección tubular que recorre toda la longitud del puente y que conecta las costillas del puente con el arco inclinado»⁵. De esta manera el momento torsor colaboraría con las acciones verticales de la plataforma (fig. 2) —asunción que verificaremos en el capítulo VIII—.

La solución de arco inclinado fue ensayada posteriormente en el Puente Ondárroa (fig. 5), y más adelante en el Puente de la Exposición (fig. 6).

La variación en el Puente de la Exposición, respecto del primer ensayo —La Devesa— fue el cambio de la sección tubular por el tablero, de manera que el tablero resiste la torsión (fig. 2).

Calatrava extendió la exploración a más puentes, con mayor o menor variación, entre los más parecidos al Puente de la Exposición encontramos cinco (fig. 3): La Devesa en Ripoll, Itsas Aurre en Ondarróa y Miraflores en Córdoba (proyecto), los tres en España; en Francia encontramos dos, Gentil en París y Europa en Orleans.

REALIZACIÓN

Proceso constructivo

El puente fue ejecutado al mismo tiempo que la Estación Alameda, la cual se encuentra debajo. Fue necesario construir el puente fuera de su posición final, para evitar congestión en la zona de obras.

El despacho del arquitecto describe así el proceso: «Debido a las limitaciones de construcción y calendario, el puente se construyó simultáneamente a la estación adyacente. Una vez se finalizó la estación, el puente se levantó con cabrestantes y se colocó en su lugar».⁶

Puente construido⁷

La estructura es completamente de acero con uniones soldadas. Solo en los revestimientos podemos encontrar otros materiales: la calzada es de asfalto con base hormigonada, las aceras están cubiertas por adoquines de piedra y existe un parachoques longitudinal de hormigón, que protege el arco y sirve de asiento a los peatones (fig. 7).

En cuanto a la forma, es un puente curvo en planta y elevación, con un arco lateral inclinado. El arco está inclinado 70° respecto de la horizontal, con péndolas de sección hexagonal dispuestos cada 5.84 m, las cuales unen el arco con la plataforma. Dicha plataforma –calzada– esta compuesta por cuatro celdas y sostiene lateralmente dos ménsulas –aceras– a desnivel.

La luz máxima la tiene el tramo central con 134 m de longitud libre, mientras que los laterales, 18 m cada uno. El ancho total es de 24 m y la altura del arco 14 m.

Todo el puente, a excepción de los pavimentos, es de color blanco, color que reduce la variación térmica y por tanto, la variación dimensional de la estructura. Aspecto importante, si consideramos el coeficiente elevado de dilatación del acero y el clima mediterráneo de la ciudad.

CRÍTICAS⁸

En cuanto a la forma, los dos aspectos criticados del puente son: la curva en elevación de la plataforma y la gran luz del tramo central.

La **curva** fue mal recibida por los peatones, ya que exige mayor esfuerzo físico –subir y bajar–, respecto de un puente plano. Esta curva podría estar justificada por colaborar con el comportamiento estructural –se verificará en el apartado VIII–.

La **luz de 134 m** es considerada por muchos, como un alarde que incrementó los costos innecesariamente. El arquitecto justifica la luz con la espacialidad lograda en la plaza que se encuentra debajo del puente –cubierta de la estación—. La ausencia de pilares intermedios, la curvatura en elevación de la plataforma y las claraboyas del piso, que proyectan luz de la estación a la plaza, configuran una zona que se percibe segura por los usuarios (fig. 8), a diferencia de lo que normalmente ocurre con otros puentes.

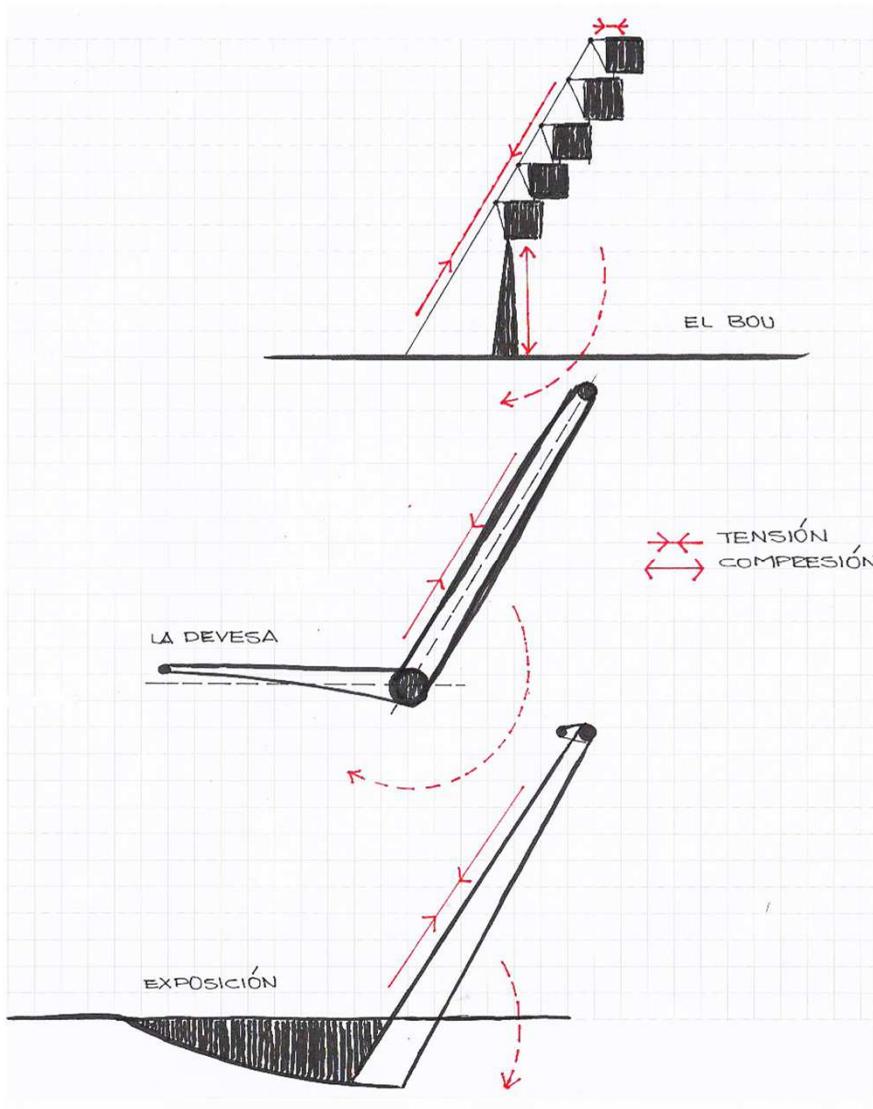
Otro aspecto criticado fueron los defectos del **asfalto** en uso. Al poco tiempo de inaugurarse el puente, el asfalto comenzó a acumularse en los extremos –partes bajas de la curva–, este defecto fue atribuido inicialmente a la forma arqueada de la plataforma, posteriormente se determinó que el problema fue la falta de capa hormigonada entre el asfalto y la estructura metálica. Se rectificó la composición del pavimento y hasta la fecha no han habido más problemas.

Y por último, el **presupuesto**. Como en muchas otras obras de Calatrava, el presupuesto inicial fue superado con creces. De los 12,6 millones de euros contractuales, pasó a 36 millones. En otras palabras, el presupuesto inicial se incrementó en 185,7% –presupuesto global que incluye la estación Alameda–.

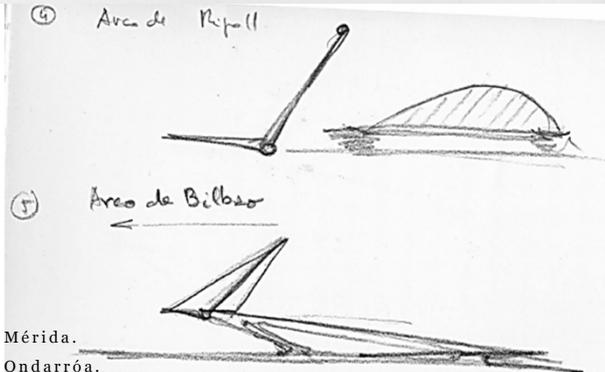
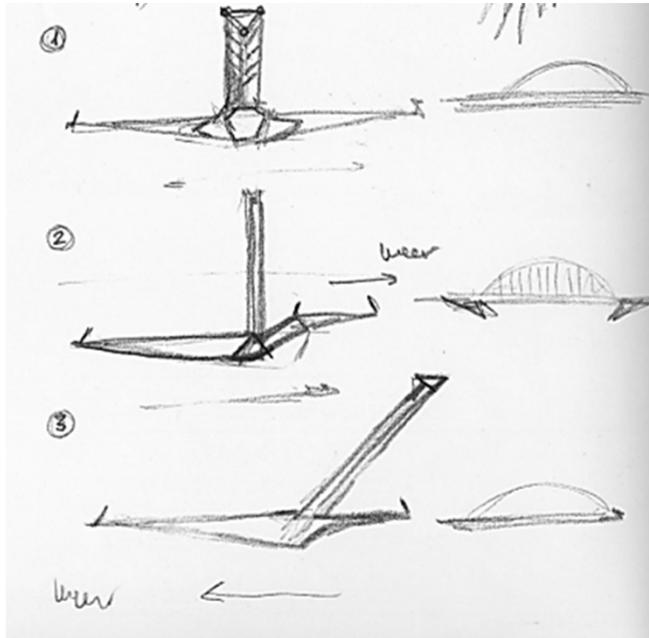
IV. PUENTE DE LA EXPOSICIÓN



1. Ubicación de los puentes con la solución de arco inclinado.



2. Semejanza de la morfología estructural entre la escultura Bou y los puentes: La Devesa y de la Exposición.

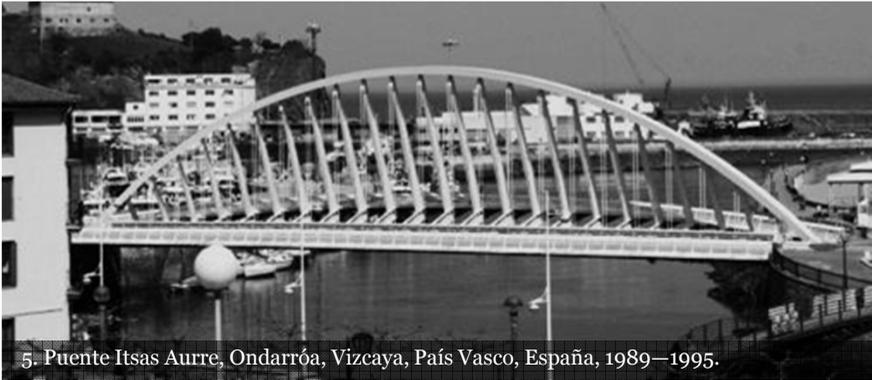


1. Arco de Mérida.
2. Arco de Ondarróa.
3. Arco de Valencia.
4. Arco de Ripoll.
5. Arco de Bilbao.

3. Bocetos de la exploración del arco inclinado por Calatrava.



4. Puente La Devesa, Ripoll, Cataluña, España, 1989—1991.



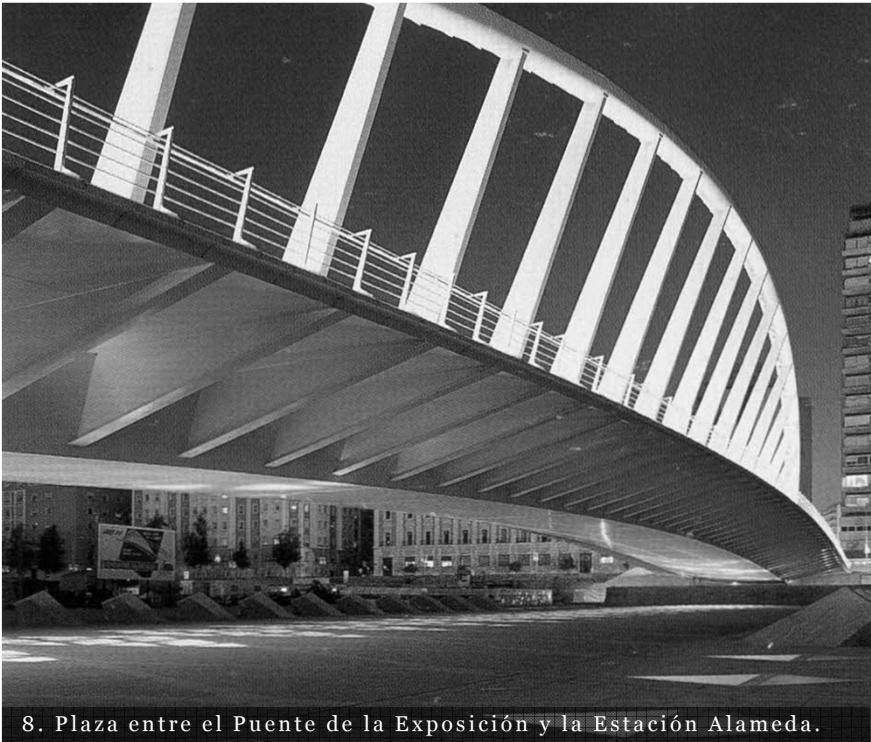
5. Puente Itsas Aurre, Ondarróa, Vizcaya, País Vasco, España, 1989—1995.



6. Puente de la Exposición, Valencia, España, 1992—1995.



7. Vista superior del Puente de la Exposición.



8. Plaza entre el Puente de la Exposición y la Estación Alameda.

TERCERA PARTE

**El porqué: la morfología
estructural**

V METODOLOGÍA

Se usó el método experimental: en base a modelos tridimensionales del puente, se realizaron pruebas alterando su morfología estructural, creando así, las condiciones necesarias que permitieron responder a la pregunta: ¿la forma del puente es o no, a un tiempo, escultórica y funcional?

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

MODELIZACIÓN

Para plantear la metodología, es necesario recordar que el objetivo del trabajo es entender el comportamiento estructural del puente en su conjunto. Por tanto, los experimentos se desarrollaron en modelos detallados y simplificados, la reducción de detalle de los segundos, ayuda a desarrollar más variedad de modificaciones a la forma del puente.

Información

Para la elaboración de los modelos tridimensionales se recolectó toda la información disponible en la bibliografía dedicada al puente. Además, se accedió a los archivos del proyecto, almacenados por la Generalitat Valenciana, bajo el nombre de: *Proyecto de construcción de la infraestructura del tramo Alameda - Avinguda del metro de Valencia*¹.

Elaboración de modelos

Los modelos fueron elaborados en el programa AutoCAD, con las funciones *línea* y *3Dcara*. Terminado el modelo, este fue llevado al programa de cálculo SAP2000, para aplicar las respectivas condiciones de materialidad, apoyo y acciones, usando el *Método de Elementos Finitos*¹. Una vez completo, el programa se encargó de calcular los esfuerzos y deformaciones resultantes.

Transición del modelo detallado al simplificado

Una vez obtenidas las deformaciones resultantes del modelo detallado, se procedió a elaborar un modelo simplificado con los mismos apoyos y acciones, los materiales fueron alterados gradualmente hasta que la deformación de ambos modelos sea la más próxima posible $-+4 \text{ mm}-$.

Variaciones al modelo

El modelo simplificado fue alterado en base a tres factores que se consideraron dominantes en la morfología:

1. Inclinación del arco (fig. 1): se elaboraron cuatro modelos adicionales con diferentes ángulos de inclinación $-cada 20^\circ-$.
2. Posición del arco respecto al eje (fig. 2): se elaboró un modelo adicional con el arco al eje.
3. Curvatura de la plataforma (fig. 3): se elaboraron cuatro modelos adicionales con diferentes contraflechas $-cada 0.80 \text{ m}-$.

Las variaciones tienen el fin de generar los escenarios, que permitan leer el efecto de cada uno de los tres actores en el comportamiento estructural del puente.

ACCIONES

Para determinar las acciones aplicables al caso de experimentación, se estudió la *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera* (IAP)². De todas las acciones, se aplicaron aquellas determinantes en el diseño de un puente:

1. Acciones permanentes: Se consideraron todas.
2. Acciones permanentes de valor no constante: No se consideraron, ya que no son determinantes en el comportamiento estructural del puente.
3. Acciones variables: Se consideraron todas las sobrecargas de uso más la de nieve. No se consideró viento, térmicas ni las debidas al agua, dado que no son determinantes en el comportamiento estructural del puente.
4. Acciones accidentales: Se consideró el sismo, mas no los impactos, ya que no es objetivo de este trabajo.

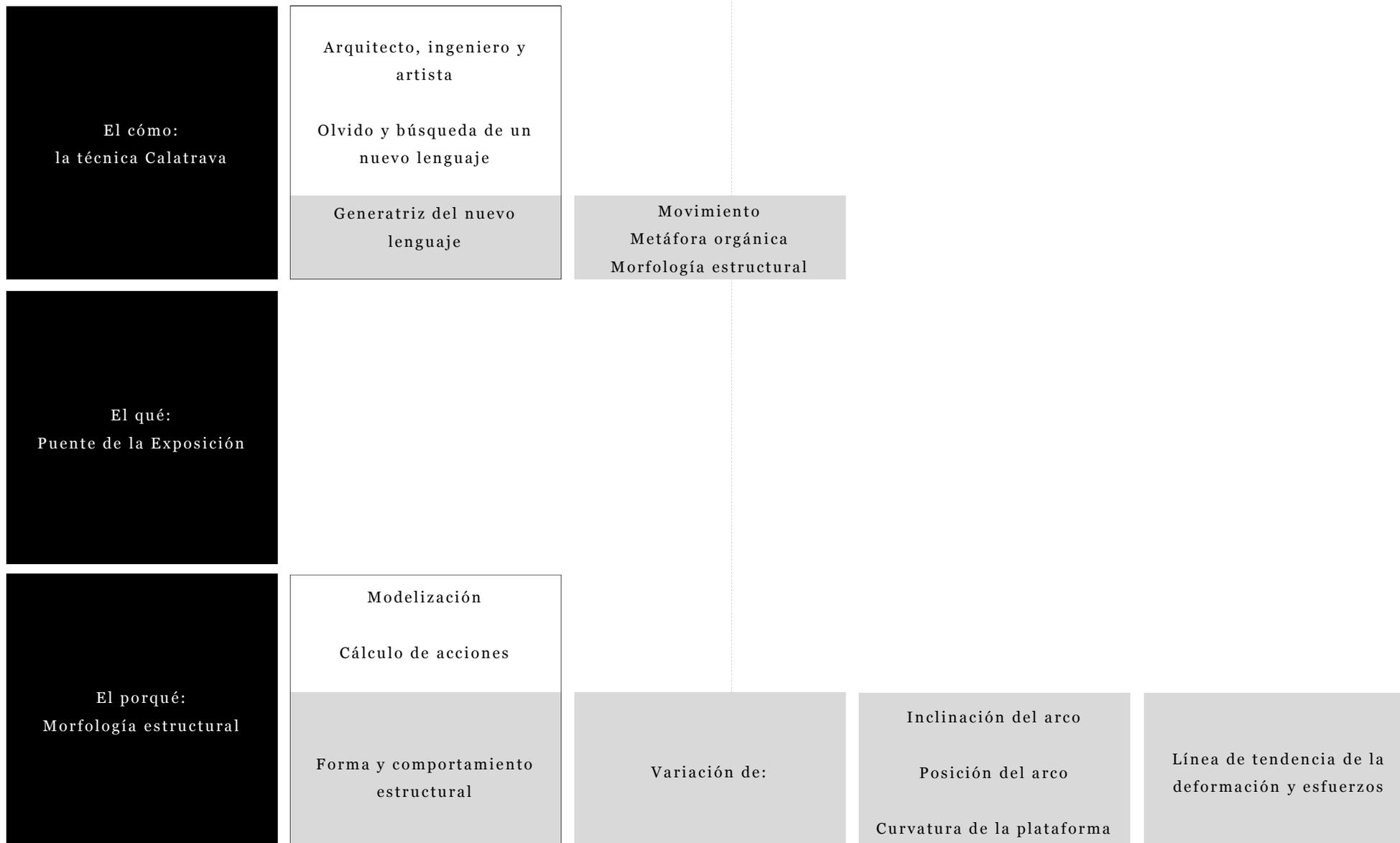
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

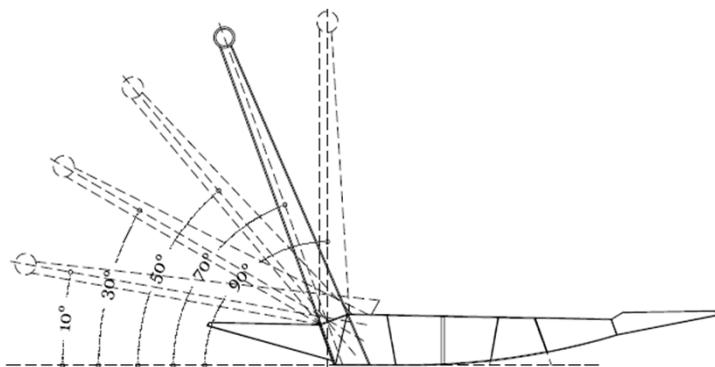
Con las deformaciones resultantes, tanto del modelo original como de sus nueve variaciones, se pudieron trazar las líneas de tendencia de deformación del puente, según cada una de las tres variables —inclinación del arco, posición del arco y curvatura del tablero—. Las líneas de tendencia permiten valorar el nivel de adecuación de la forma al funicular de fuerzas, y por tanto, valorar la pertinencia de la elección formal.

En cuanto a las fuerzas resultantes, estas posibilitan la comprensión del porqué de las deformaciones, ratificando las conclusiones obtenidas.

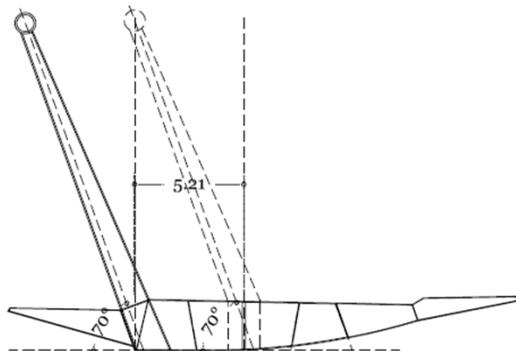
Los resultados están presentados en láminas codificadas y anteceditas de un texto explicativo.

Tabla 1: Esquema metodológico

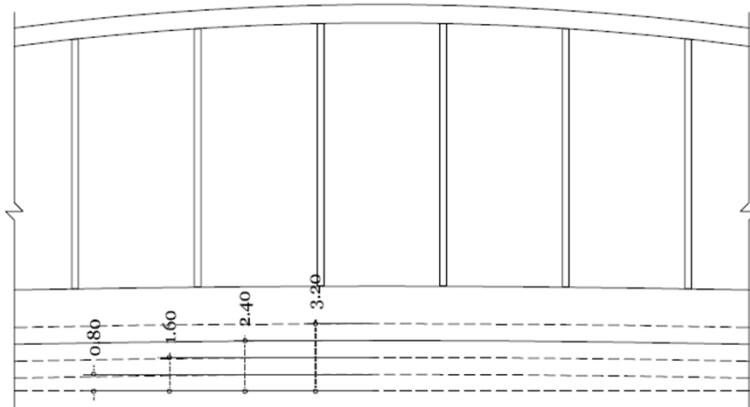




1. Variación del ángulo de inclinación del arco cada 20°.



2. Variación de la posición del arco.

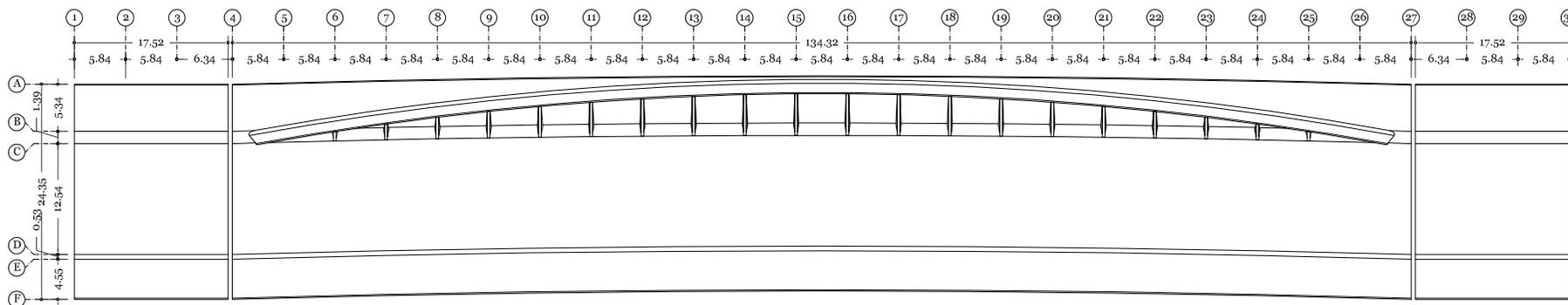


3. Variación de la curvatura de la plataforma, contraflecha cada 0.80 m.

VI MODELIZACIÓN

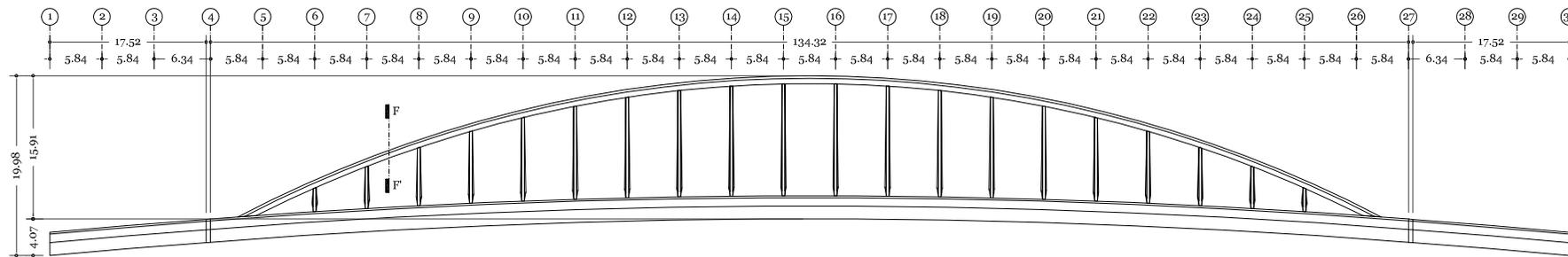
En las siguientes páginas se desarrollan los planos, base de los modelos tridimensionales: detallado y simplificado.

MODELO DETALLADO



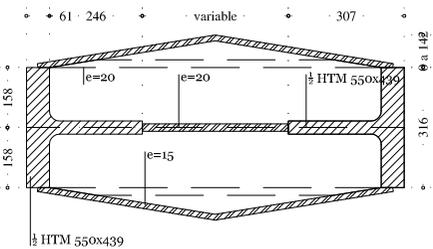
PLANTA

ESC: 1/750



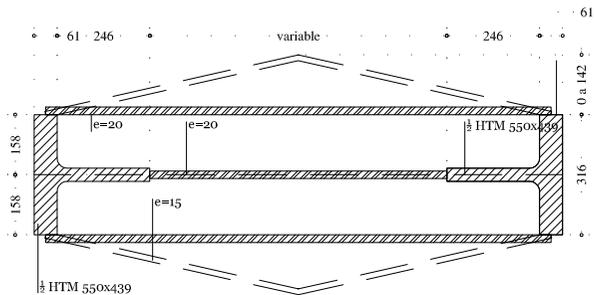
ELEVACIÓN

ESC: 1/750



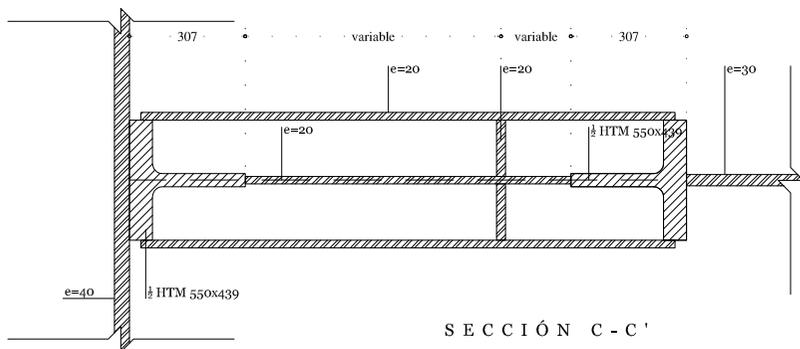
SECCIÓN A - A'

ESC: 1 / 20



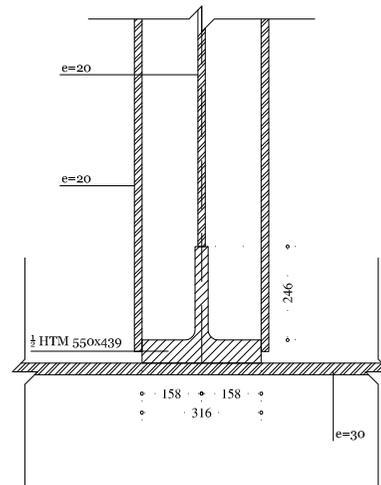
SECCIÓN B - B'

ESC: 1 / 20



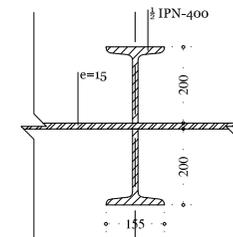
SECCIÓN C - C'

ESC: 1 / 20



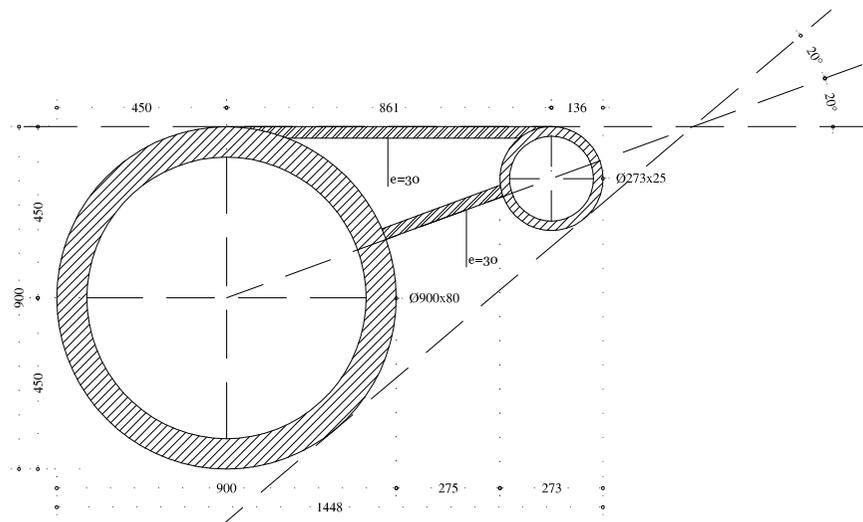
SECCIÓN D - D'

ESC: 1 / 20



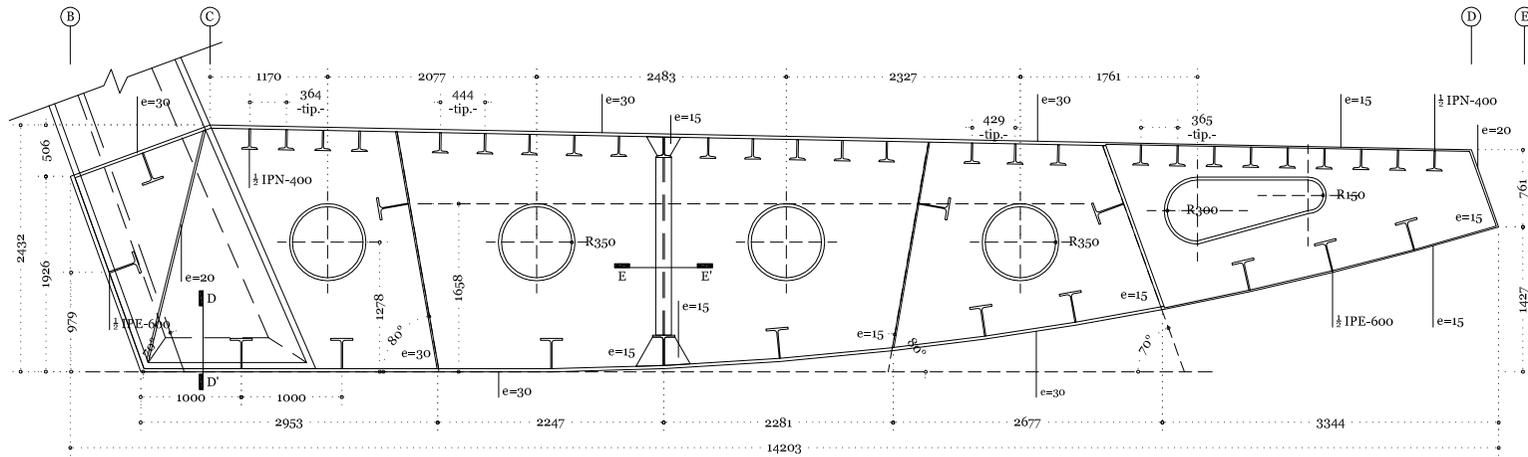
SECCIÓN E - E'

ESC: 1 / 20



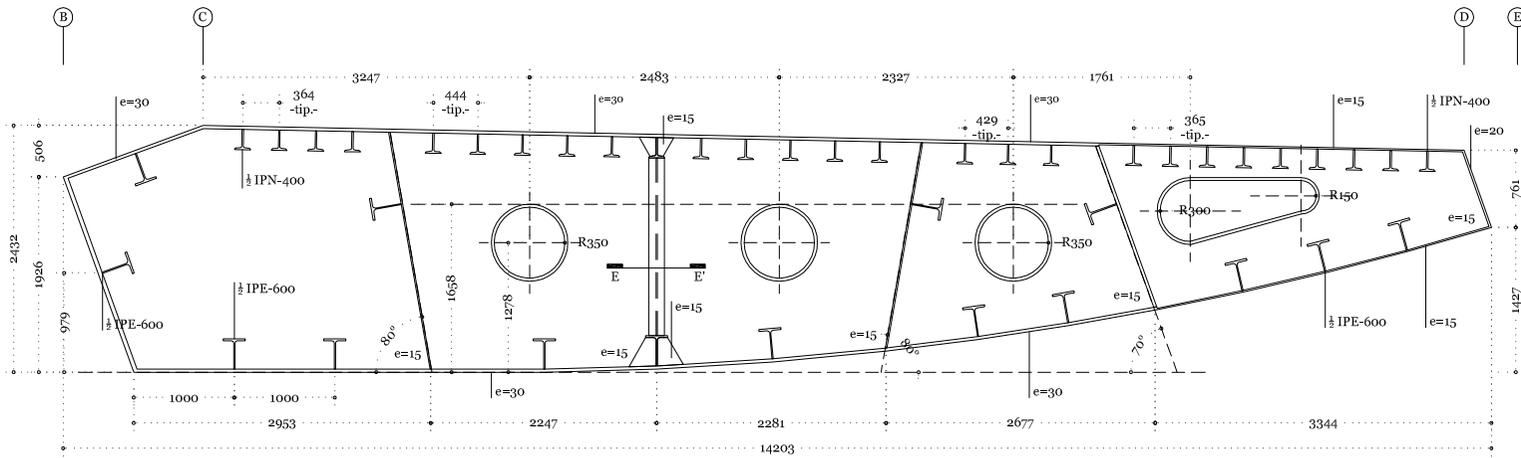
SECCIÓN F - F'

ESC: 1 / 20



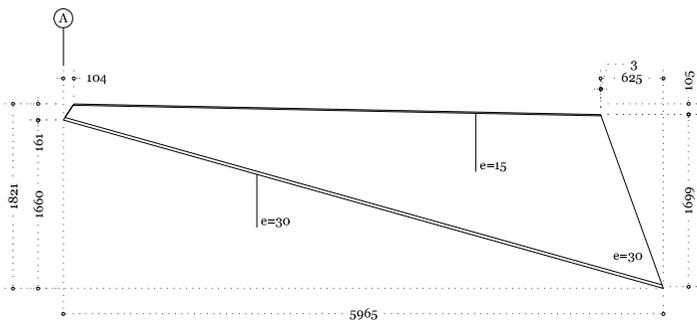
SECCIÓN TÍPICA: DIAFRAGMA EN EJE DE PILAR

ESC: 1/75



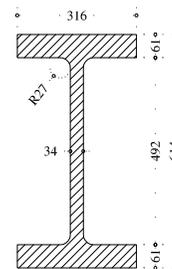
SECCIÓN TÍPICA: DIAFRAGMA ENTRE PILARES

ESC: 1/75



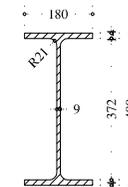
SECCIÓN TÍPICA: MÉNSULA EJE A-B

ESC: 1/75



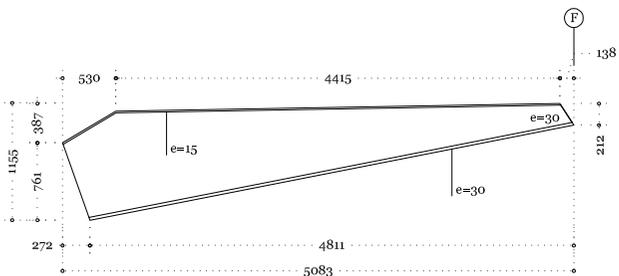
HTM-550x439

ESC: 1/20



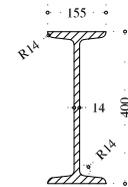
IPE-400

ESC: 1/20



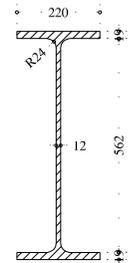
SECCIÓN TÍPICA: MÉNSULA EJE E-F

ESC: 1/75



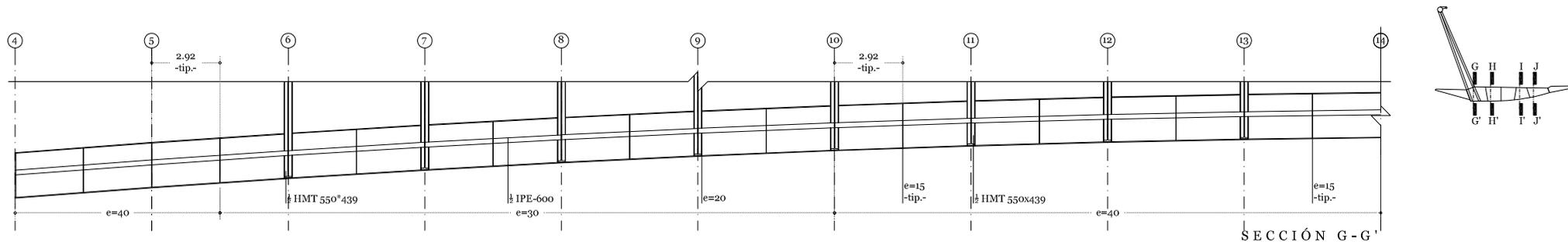
IPN-400

ESC: 1/20

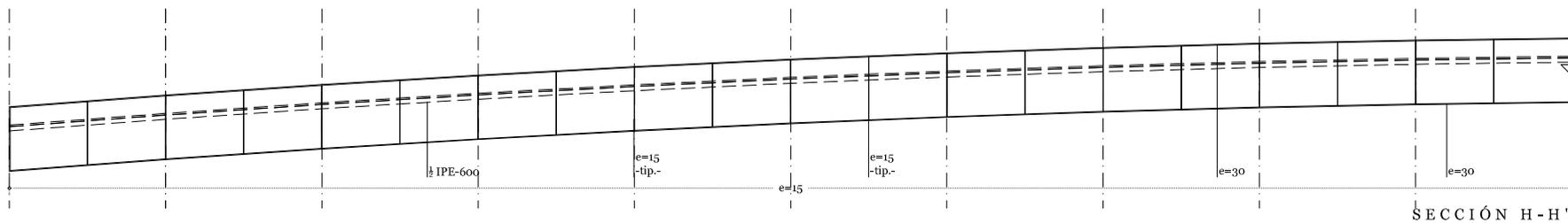


IPE-600

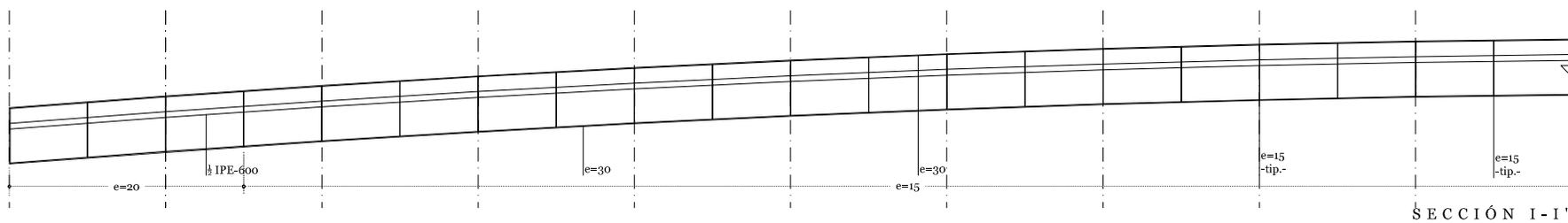
ESC: 1/20



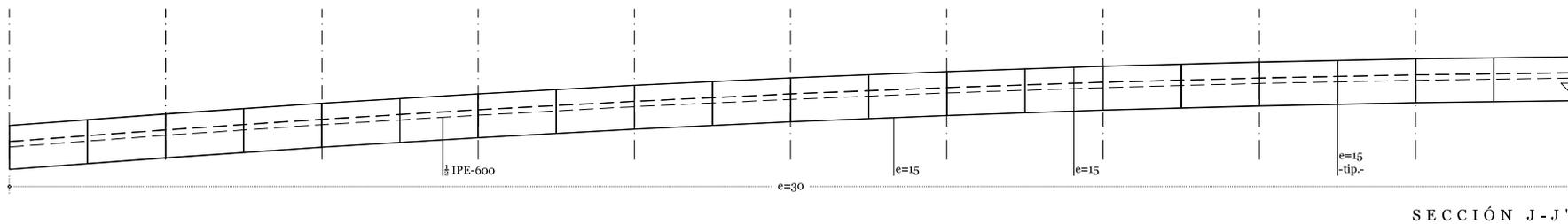
ESC: 1/250



ESC: 1/250

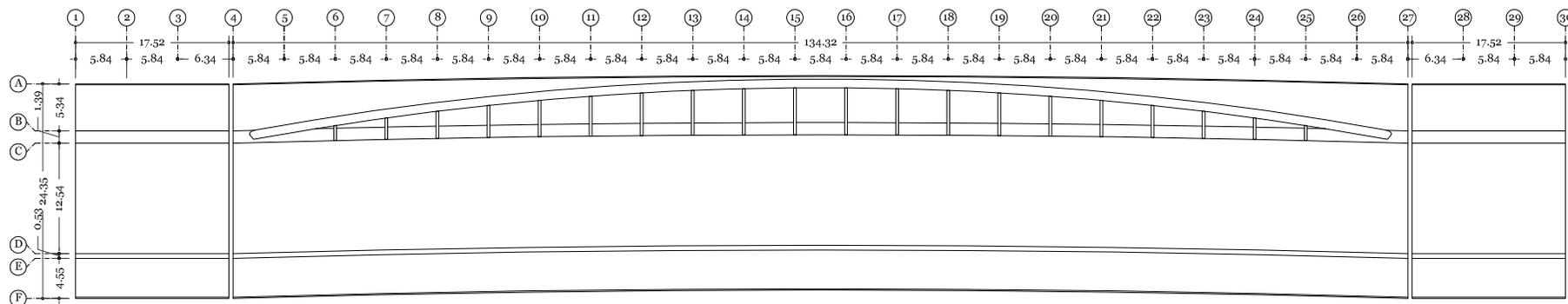


ESC: 1/250



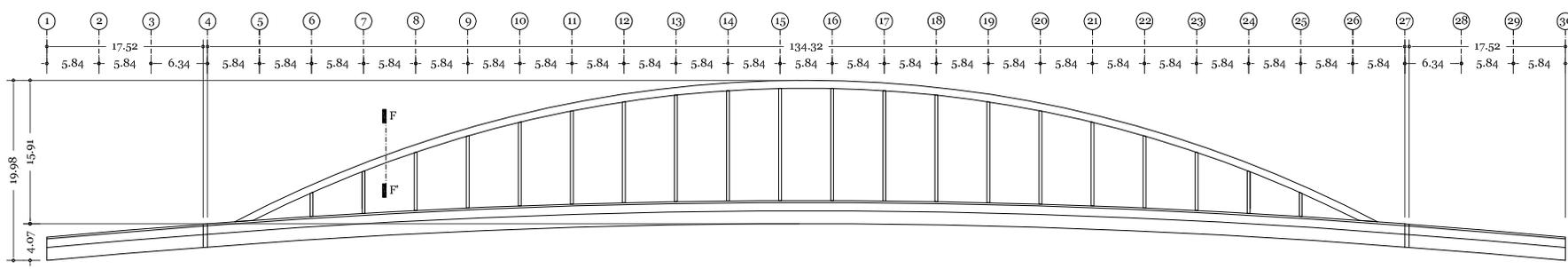
ESC: 1/250

MODELO SIMPLIFICADO



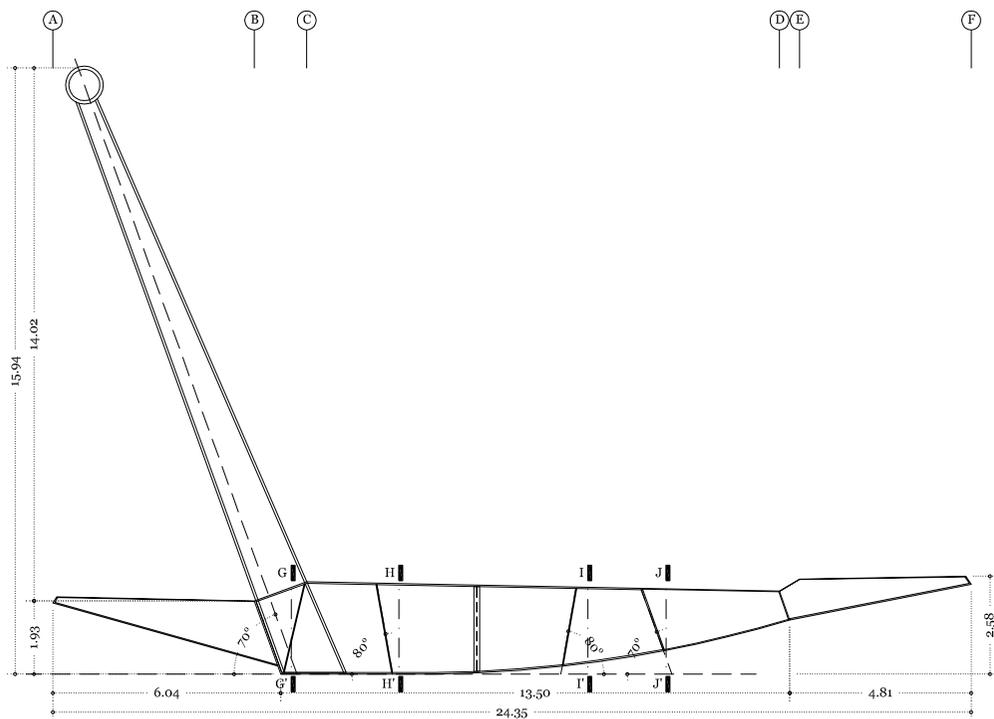
PLANTA

ESC: 1/750



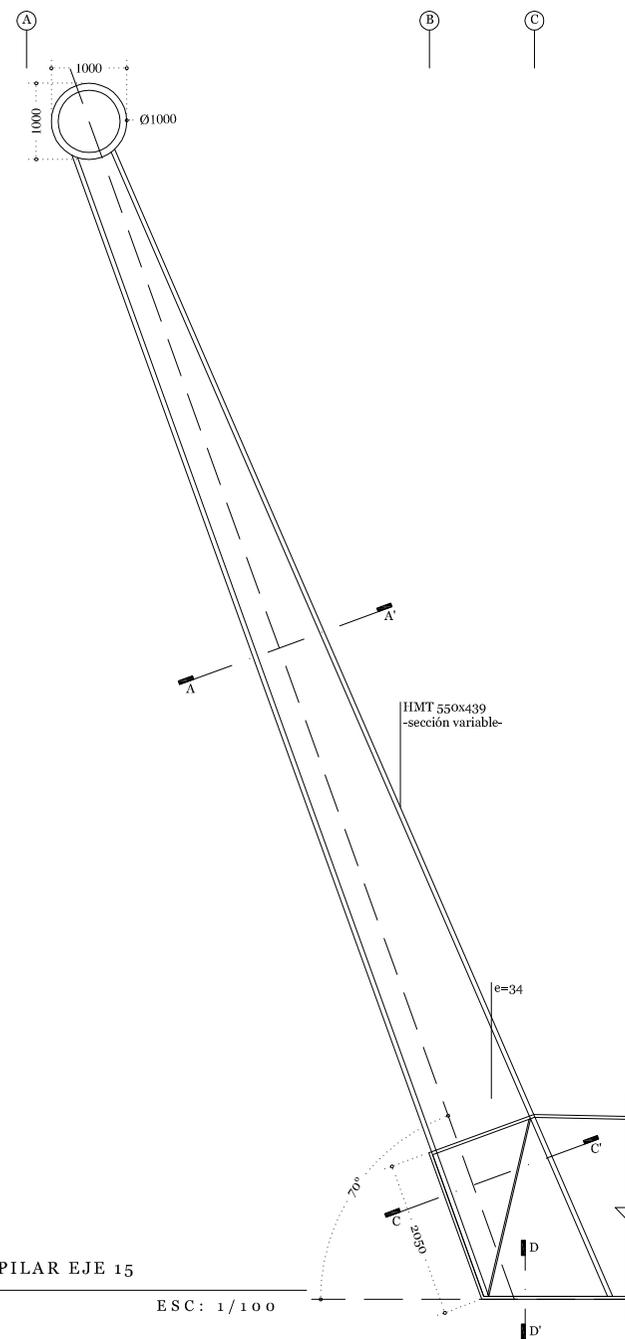
ELEVACIÓN

ESC: 1/750



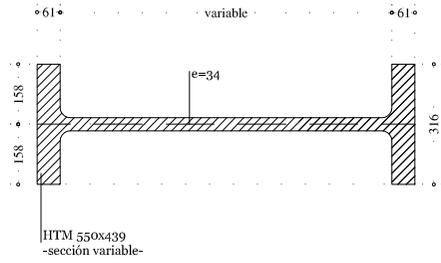
SECCIÓN GENERAL EJE 15

ESC: 1/200



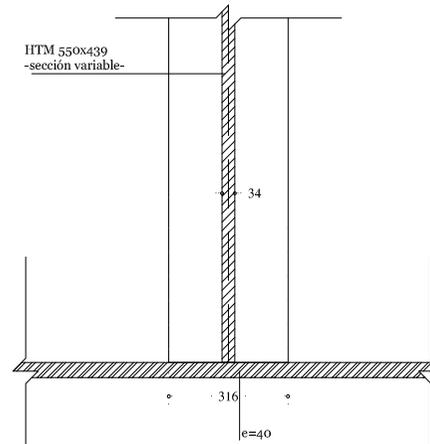
ALZADO DE PILAR EJE 15

ESC: 1/100



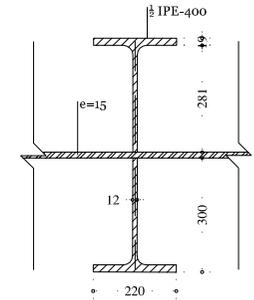
SECCIÓN A - A'

ESC: 1/20



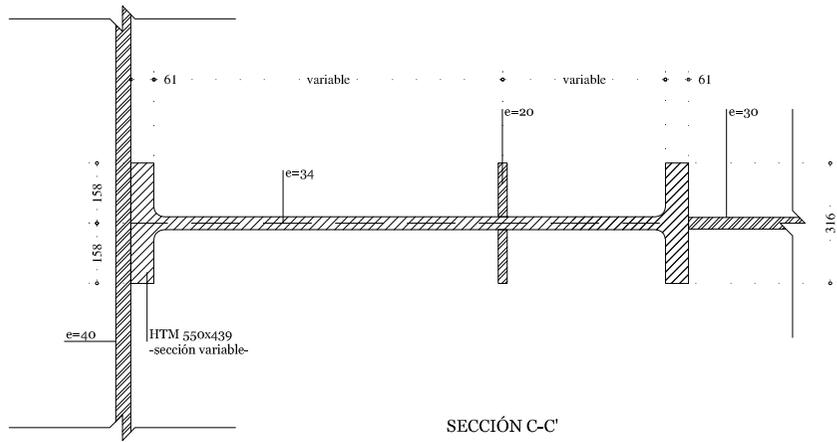
SECCIÓN D - D'

ESC: 1/20



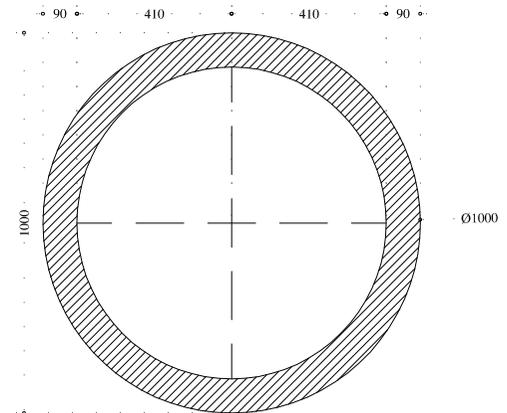
SECCIÓN E - E'

ESC: 1/20



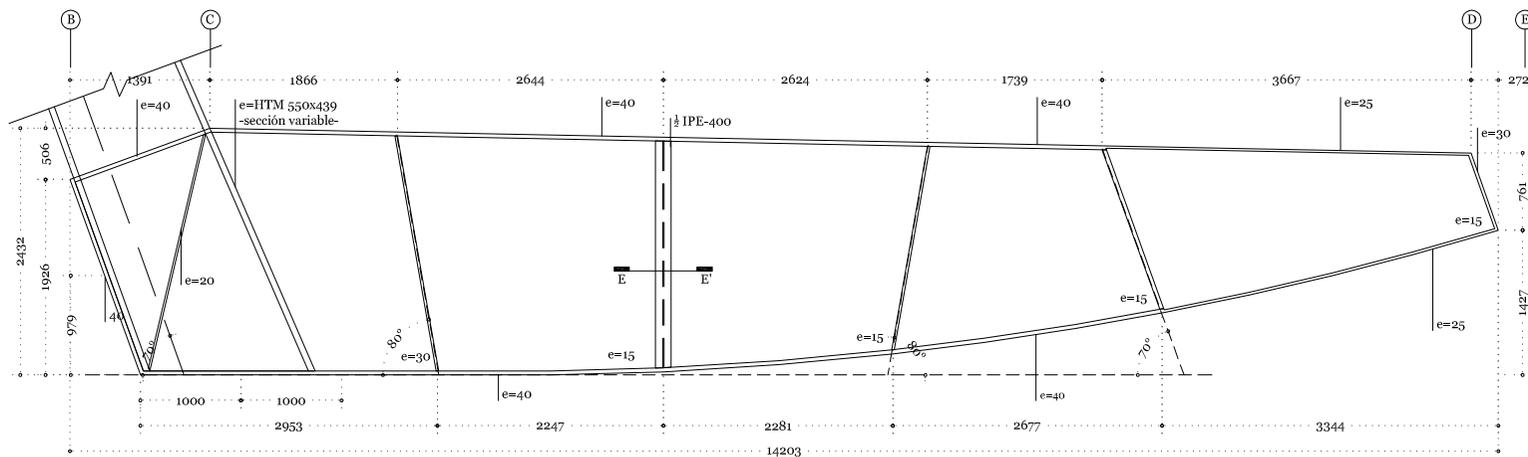
SECCIÓN C - C'

ESC: 1/20



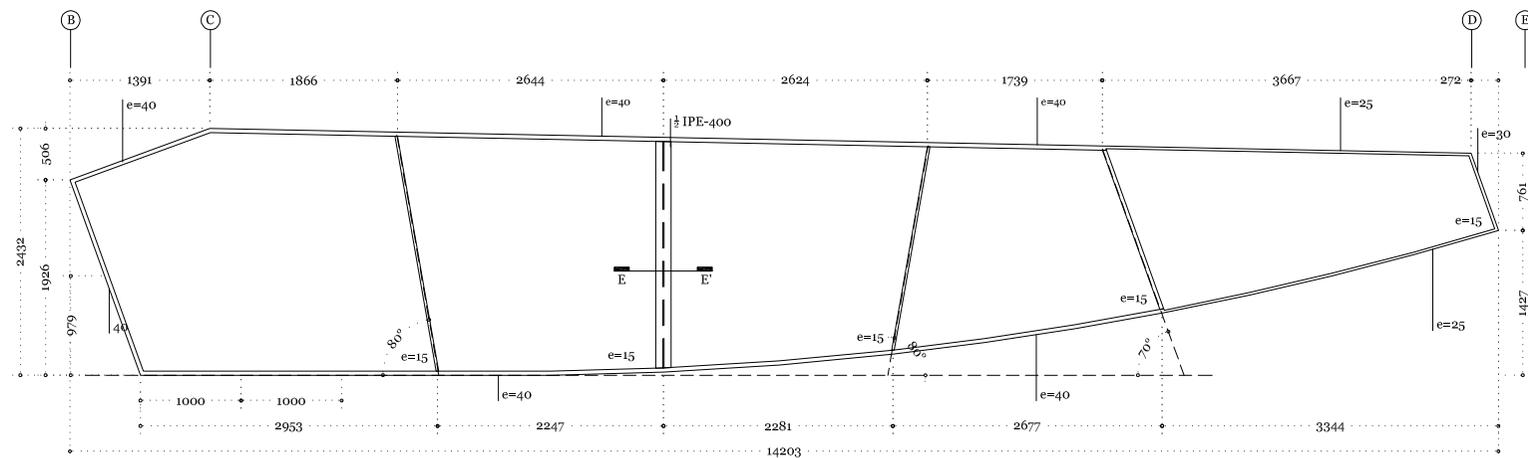
SECCIÓN F - F'

ESC: 1/20



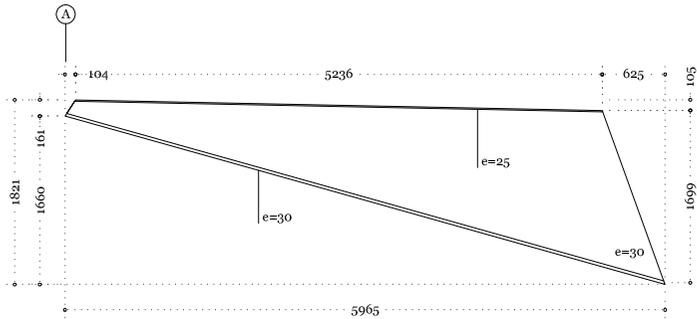
SECCIÓN TÍPICA: DIAFRAGMA EN EJE DE PILAR

ESC: 1/75



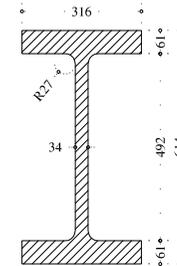
SECCIÓN TÍPICA: DIAFRAGMA ENTRE PILARES

ESC: 1/75



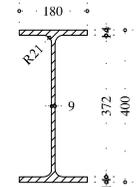
SECCIÓN TÍPICA: MÉNSULA EJE A-B

ESC: 1/75



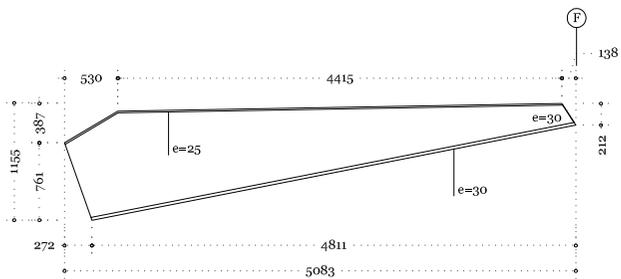
HTM - 550 x 439

ESC: 1/20



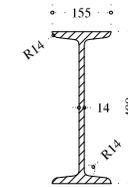
IPE - 400

ESC: 1/20



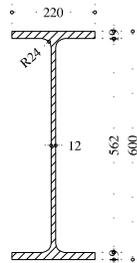
SECCIÓN TÍPICA: MÉNSULA EJE E-F

ESC: 1/75



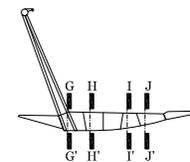
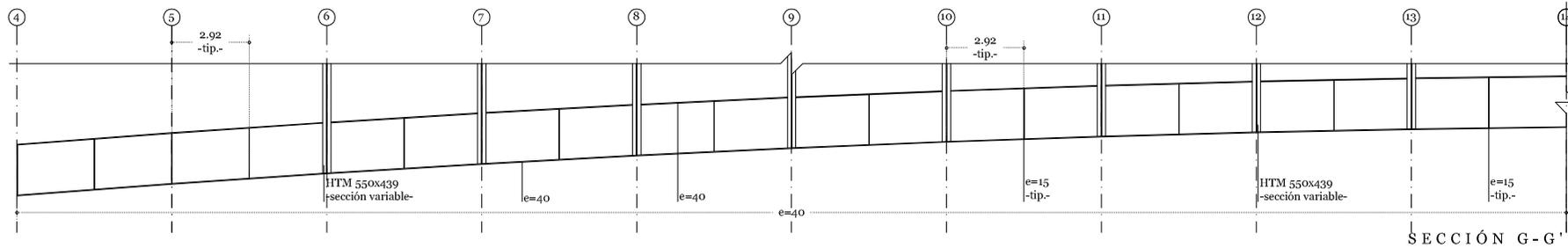
IPN - 400

ESC: 1/20

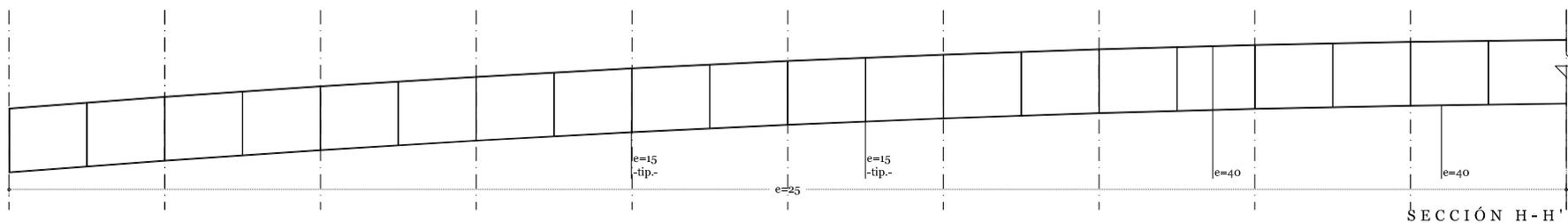


IPE - 600

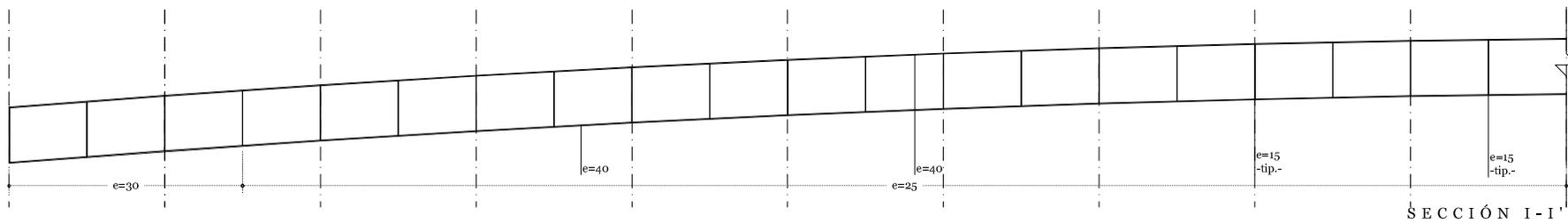
ESC: 1/20



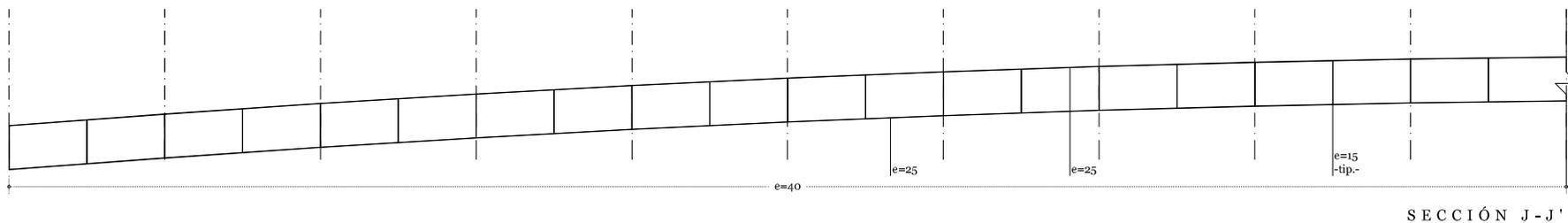
ESC: 1/250



ESC: 1/250



ESC: 1/250



ESC: 1/250

VII ANÁLISIS ESTRUCTURAL

CÁLCULO DE ACCIONES

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

Acciones permanentes (G)

Peso propio

Corresponde al peso de los elementos estructurales. Estas acciones fueron calculadas por el programa informático SAP2000.

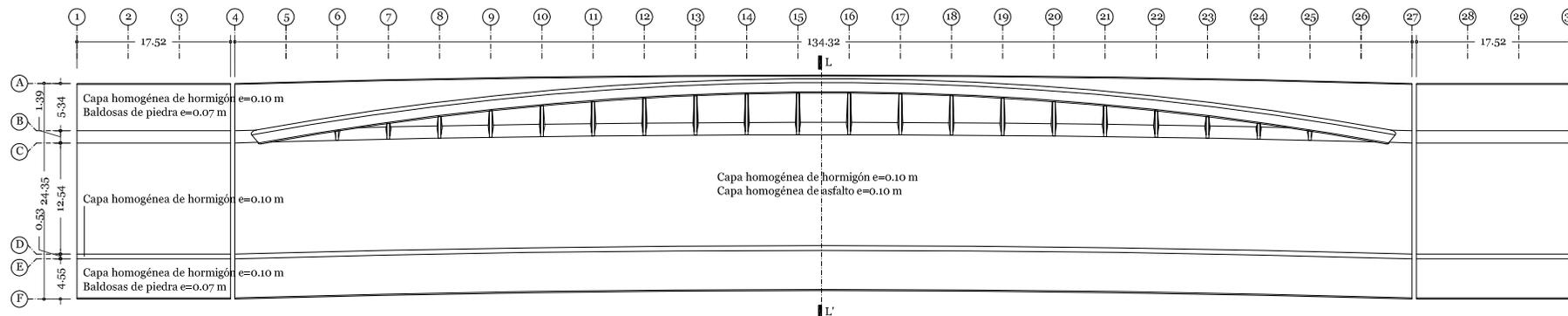
Cargas muertas

En este apartado se consideró el peso de todos los elementos permanentes no estructurales: pavimentos y mobiliario.

Pavimentos:

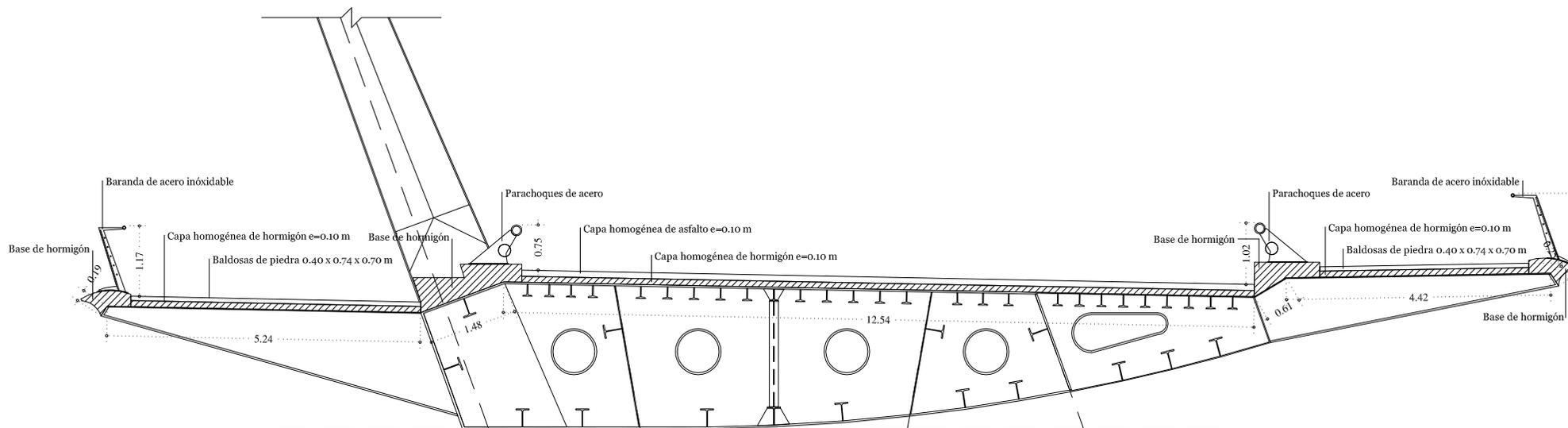
Tabla 1: Carga muerta permanente, acera eje A-B y E-F

Material	Peso esp.	Cant.	Ancho	Largo	Área	Espesor	Volumen	F. total	F. por m ²
	kn/m ³	und	m	m	m ²	m	m ³	kn	kn/m ²
Piedra	26.00	-	5.43	169.36	919.62	0.07	64.37	1673.72	1.82
Hormigón	24.00	-	5.43	169.36	919.62	0.10	91.96	2207.10	2.40
Piedra	26.00	-	4.66	169.36	789.22	0.07	55.25	1436.38	1.82
Hormigón	24.00	-	4.66	169.36	789.22	0.10	78.92	1894.12	2.40



PLANTA

ESC: 1/750



SECCIÓN L-L'

ESC: 1/100

Tabla 2: Carga muerta permanente, calzada eje C-D

Material	Peso esp.	Cant.	Ancho	Largo	Área	Espesor	Volumen	F. total	F. por m ²
	kn/m ³	und	m	m	m ²	m	m ³	kn	kn/m ²
Hormigón	24.00	-	12.54	169.36	2123.77	0.10	212.38	5097.06	2.40
Asfalto	24.00	-	12.54	169.36	2123.77	0.10	212.38	5097.06	2.40

Mobiliario

Tabla 3: Carga muerta permanente, parachoque eje B-C y D-E

Material	Peso esp.	Cant.	Ancho	Largo	Área	Espesor	Volumen	F. total	F. por m ²
	kn/m ³	und	m	m	m ²	m	m ³	kn	kn/m ²
Hormigón	24.00	-	-	169.36	0.42	-	70.91	1701.86	6.79
Hormigón	24.00	-	0.61	169.36	103.31	0.10	10.33	247.94	2.40
Acero:									
Tubo	78.50	2	-	169.36	0.01	-	3.39	265.90	-
Parante	78.50	467	-	-	0.19	0.01	0.87	68.14	-
Base	78.50	234	0.20	0.63	0.13	0.01	0.29	23.11	-
								357.14	1.01

Tabla 4: Carga muerta permanente, baranda eje A-B y E-F

Material	Peso esp.	Cant.	Ancho	Largo	Área	Espesor	Volumen	F. total	F. por m ²
Acero:	kn/m ³	und	m	m	m ²	m	m ³	kn	kn/m ²
Pasama.	78.50	2	-	169.36	0.0002	-	0.07	5.32	-
Parante	78.50	229	-	-	0.12	0.02	0.41	32.34	-
Barras	78.50	10	-	169.36	0.0003	-	0.51	39.88	-
Base	78.50	229	0.22	0.53	0.11	0.01	0.26	20.47	-
Filete	78.50	458	0.02	0.02	0.0004	1.05	0.19	15.02	-
								113.03	0.07

Acciones variables (Q)

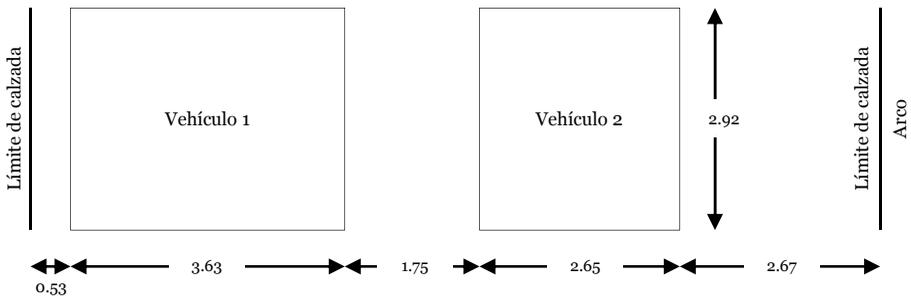
Sobre carga de uso

Se consideraron los componentes verticales del tren de cargas, que consiste en tres acciones actuando simultáneamente:

1. Una sobrecarga uniforme de cuatro kilonewtons por metro cuadrado (4 kN/m²) extendida en toda la calzada.
2. Una sobre carga uniforme de cuatro kilonewtons por metro cuadrado (4 kN/m²) extendida en todas las aceras.
3. Dos vehículos de seiscientos kilonewtons (600 kN) cada uno.

Ambos vehículos se ubican en la parte central del puente, la más desfavorable.

Se adaptaron las distancias indicadas en la IAP, según la cuadrícula de *elementos finitos* que exige el modelo de cálculo (fig. 1).



1. Croquis de los vehículos pesados, medidas en metros.

Acciones climáticas

Se consideró la sobrecarga de nieve en todas aquellas superficies horizontales sobre las que no se ha considerado la actuación de la sobrecarga de uso.

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.

Como valor característico de la sobrecarga de nieve sobre superficies de tablero (q), se optó el definido por la siguiente expresión dada por la IAP:

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

Donde:

s_k (sobrecarga característica de nieve sobre un terreno horizontal) = 0.4 kN/m²

Acciones accidentales (A)

Acciones sísmicas

Se calculó en base al espectro elástico de respuesta: representación simplificada de la interacción entre el terreno y la estructura.

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) = 1.4

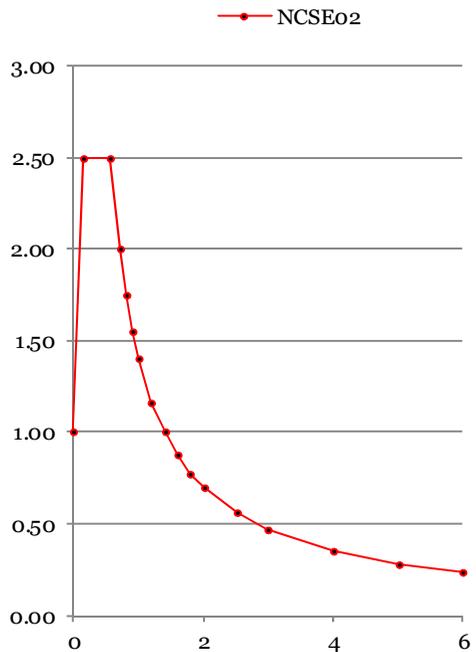
ρ (grado de importancia del edificio) = 1

Ω (coeficiente de amortiguación) = 5%

Tabla 5: Espectro elástico de respuesta

K	1	a_b/g	0.06	μ	2
C	1.4	ρ	1	Ω	5
T_A	0.14	S	1.12	ν	1
T_B	0.56	a_c/g	0.067	β	0.5
T	$\alpha(T)$	SAP X Y	0.33	SAP Z	0.231

	o	1.00
T_A	0.14	2.50
T_B	0.56	2.50
	0.7	2.00
	0.8	1.75
	0.9	1.56
	1	1.40
	1.2	1.17
	1.4	1.00
	1.6	0.88
	1.8	0.78
	2	0.70
	2.5	0.56
	3	0.47
	4	0.35
	5	0.28
	6	0.23



VIII

MORFOLOGÍA ESTRUCTURAL

El puente tiene un problema concreto: materializar el camino en el aire. Por tanto, es en esencia una estructura resistente cuya forma de organizar la materia, debe soportar las acciones y transmitir las al terreno en puntos aislados.

De las tradicionales formas, el Puente de la Exposición se encuentra dentro de los *puentes arco*¹, sin embargo Calatrava va más allá y experimenta una nueva forma de organizar la materia: descentrando e inclinando dicho arco.

En el presente capítulo, se explorará la relación causal entre la **forma** y el **comportamiento estructural** del Puente de la Exposición.

FORMA ESTRUCTURAL

Formas que componen el puente

El puente está formado por cuatro elementos principales: los apoyos, el tablero, las péndolas y el arco. Cuyas formas y relación entre ellas, definen las deformaciones y esfuerzos resultantes.

Apoyos

El puente posee tres tramos: uno central principal de 134 m de luz y dos laterales de 18 m cada uno.

El tramo central está apoyado en muros de contención, un lado es fijo y el otro deslizante. Liberar el movimiento de uno de los apoyos, dota de flexibilidad al tramo principal, frente a los efectos térmicos; además de disminuir los empujes que soportan los muros de contención.

Los arranques de los cuerpos laterales se apoyan en el terreno, el extremo opuesto se apoya en el tramo central, siendo deslizantes y fijos respectivamente.

Si bien, la unión entre tramos no cumple los requerimientos de empotramiento, el artificio de apoyar los tramos laterales en el central podría representar cierta disminución en el momento flector²; ya que, tengamos en mente: una viga empotrada con carga uniformemente repartida disminuye el momento flector a $2/3$ en los arranques, y $1/3$ en el centro, respecto de una viga apoyada.

Arco

El puente posee un arco metálico de sección compuesta por dos tubos unidos mediante chapas. Respecto a la horizontal, está inclinado a 70° y se ubica a un extremo del tablero.

El arco es el mayor invento tensional de la construcción clásica. Su resistencia se debe a su forma, es geometría hecha estructura resistente. Muestra de su grandeza es la definición escrita en el frontispicio del templo del puente de Alcántara «*Ars ubi materia vincitur ipsa sua*» que significa «El arte donde la materia se vence a sí misma». O el proverbio árabe que dice: el arco nunca duerme.³

El arco al fijar sus extremos —pueden ser articulados o empotrados— transforma las flexiones de una viga curva en compresiones. Este comportamiento de las fuerzas supone una buena cimentación o unos buenos muros de contención para soportar los empujes.

Una táctica bastante usada y efectiva es aprovechar el terreno ya existente y ajeno a la estructura en sí misma, para soportar los empujes y fijar los extremos del arco. Sin embargo, el arco del puente estudiado no está apoyado en el terreno, sino en unos muros de contención. Para reducir los empujes y economizar

el dimensionamiento de los muros de contención, Calatrava liberó el movimiento de uno de los extremos haciéndolo deslizante. Y para mantener la condición de arco, fija los extremos del arco con el tablero haciendo de tirante.

Otro aspecto a tomar en cuenta en un arco metálico es la forma de la sección. Al ser el acero, un material con alta resistencia, los arcos de este material suelen ser esbeltos y proclives al pandeo por los axiles de compresión. Lo ideal es una forma que dote de rigidez al elemento. De las formas geométricas, la ideal es la circunferencia por ser uniforme, dicha forma es adoptada acertadamente por Calatrava para sus puentes de arco (fig. 1).

Tablero

El tablero es una *viga de cajón metálica con alma llena* (fig. 2), está provista de tres almas y refuerzos con perfiles IPE e IPN. Su forma presenta doble curvatura, visto en planta la distancia entre la horizontal y el punto más alejado de la curva es de 0.95 m, visto en elevación la distancia es de 2.40 m (fig. 3).

La viga monolítica sobre pilastras es el primer logro del ser humano para salvar luces. Eduardo Torroja supone, lógicamente, que la primera viga fue un tronco, luego un monolito de piedra, el tercero un sillar y el cuarto un dintel dovelado, hasta llegar a las vigas de cajón metálico. Hicieron falta muchos siglos de prueba y error para entender que la viga resiste más si el material soporta flexiones y que, mientras más alto es el peralte, menores las deformaciones. Dados estos requerimientos de flexión, el acero es el material ideal y adecuadamente elegido para materializar la plataforma de 134 m de luz.

En este tipo de elemento, el momento flector es máximo en el centro y disminuye en los arranques, pudiendo ser nulo si está apoyado. Por el contrario, el esfuerzo cortante se acrecienta hacia

los apoyos y es nulo al centro. Entonces, las dimensiones ideales de una viga en forma de I , sería de cabeza creciente y espesor de alma decreciente, a medida que la sección se acerca al centro. La viga del puente de la Exposición está apoyada, la cabeza es uniforme a todo lo largo, sin embargo el alma incrementa espesor a medida que se acerca a los apoyos, adaptándose al fenómeno tensional.

Por otro lado, vimos que la plataforma además de viga, cumple las funciones de tirante para el arco, fijando los extremos. Dada su función en el comportamiento estructural, Calatrava incrementa acertadamente el área de la sección, incluye los refuerzos longitudinales mencionados: chapas metálicas —almas—, perfiles IPE e IPN. Además, curva la plataforma, intuyendo que la forma disminuiría los axiles de tracción que soporta⁴.

Péndolas

Posee 20 péndolas de sección hexagonal, alineadas al arco, las cuales soportan axiles de tracción. Dado el comportamiento de las fuerzas, se puede decir que la forma hexagonal tiene motivaciones enteramente estéticas⁵.

Vinculación entre las formas

Un factor primordial en el comportamiento de las estructuras es la vinculación entre los elementos, esta interacción puede modificar radicalmente el lenguaje de las fuerzas.

Al liberar uno de los extremos del arco en la dirección que une los apoyos, transformar el tablero en un tensor y al coser ambos elementos con péndolas, estos pasan a formar un tipo estructural que trabaja como una celosía. La forma más adecuada de llamarlo sería *celosía de canto variable adaptada a las leyes de*

esfuerzos, dónde el cordón superior es el arco, el inferior es el tablero y las péndolas son las montantes (fig. 4). La unión entre las péndolas y el tablero está descentrada, generando dos momentos: por el arco y por el tablero en volado (fig. 6).

Formas dominantes

Sin duda los cuatro componentes mencionados: apoyos, tablero, péndolas y arco; juegan un rol decisivo en el comportamiento de las fuerzas. No obstante, no todos generan el mismo impacto emocional en los usuarios. Partiendo de ahí, las formas que destacan y caracterizan formalmente al puente son:

1. Arco —y péndolas— inclinado
2. Arco —y péndolas— descentrado
3. Plataforma curva

Por tanto, centraremos el análisis en estas tres características formales. En el presente capítulo se alterarán estos componentes a fin de generar las condiciones que permitan corroborar si esta forma innovadora de agrupar la materia es la respuesta correcta al problema de materializar el camino en el aire.

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Con el fin de entender el lenguaje de las fuerzas actuantes en el puente, se estudiaron las deformaciones y esfuerzos resultantes, haciendo uso de las combinaciones: Estado Límite de Servicio Uso (ELSu) y Estado Límite Último Uso (ELUu), respectivamente.

A continuación se explica el comportamiento general de la estructura:

Longitudinalmente

Como vimos, el puente trabaja principalmente como una *celosía de canto variable adaptada a la ley de esfuerzos – parábola–*, donde el cordón superior son los perfiles curvos del arco, el cordón inferior es el tablero, y las montantes son los perfiles hexagonales.

Globalmente, presenta grandes momentos flectores en el eje Y, debidos a la luz de 134 m. La *celosía* transforma los esfuerzos globales de flexión en esfuerzos locales de axiles: compresión y tracción (fig. 5). Por tanto, los perfiles tubulares del arco –cordón superior– presentan esfuerzos principales de compresión, los perfiles hexagonales – montantes– y el tablero –cordón inferior–, tracción.

Transversalmente

En sección, el puente trabaja como *forjado en volado*, cuyo único apoyo está descentrado. Presenta momentos torsores, por el tablero volado y el arco descentrado inclinado. Estos momentos son transformados en axiles por la forma de *viga de cajón metálica de alma llena*: manifiesta tracciones en la parte superior y compresiones en la inferior (fig. 7).

Codificación de las láminas por deformaciones y esfuerzos:

Modelo original (O): detallado

Deformaciones resultantes (D)

O.D_1. Deformación en escala de colores	107
O.D_2. Cuadro de deformaciones	117

Esfuerzos resultantes (E)

O.E_3. Stresses Von Mises en escala de colores	121
O.E_4. Cuadro de Tensiones Von Mises	131
O.E_5. Axiles en flechas	133

Modelos alternativos: simplificado

Variación ángulo de inclinación del arco (VA)

Deformaciones resultantes (D)

VA.D_6. Deformación en escala de colores	153
VA.D_7. Deformación en plano cartesiano	157
VA.D_8. Línea de tendencia de la deformación	163
VA.D_9. Cuadro de deformaciones	165

Esfuerzos resultantes (E)

VA.E_10. Gráfico de axiles	171
VA.E_11. Axiles en el plano cartesiano	173
VA.E_12. Línea de tendencia de axiles	175

Variación posición del arco respecto al eje (VP)

Deformaciones resultantes (D)

VP.D_13. Deformación en escala de colores.....	183
VP.D_14. Deformación en plano cartesiano	187
VP.D_15. Línea de tendencia de la deformación	189
VP.D_16. Cuadro de deformaciones	191

Esfuerzos resultantes (E)

VP.E_17. Momentos en el plano cartesiano	195
--	-----

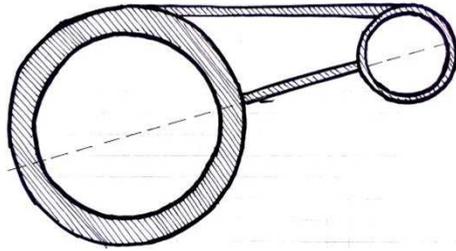
Variación curvatura de la plataforma (VC)

Deformaciones resultantes (D)

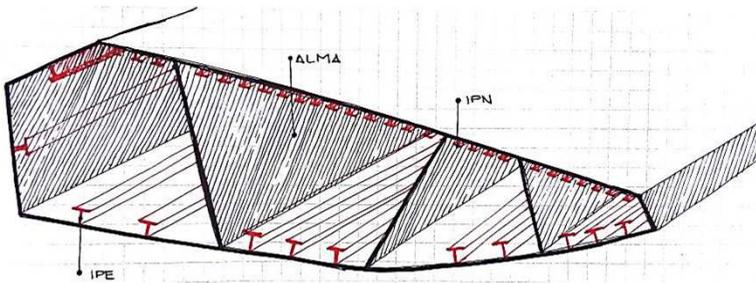
VC.D_18. Deformación en escala de colores	201
VC.D_19. Deformación en plano cartesiano	205
VC.D_20. Línea de tendencia de la deformación.....	211
VC.D_21. Cuadro de deformaciones	213

Esfuerzos resultantes (E)

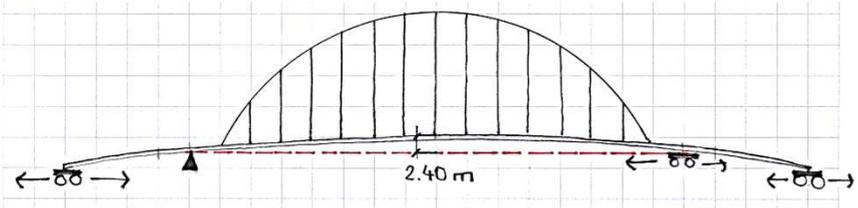
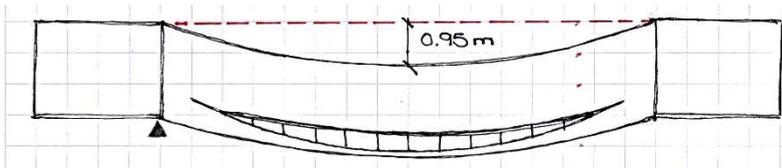
VC.E_22. Gráfico de axiles	219
VC.E_23. Axiles en el plano cartesiano	221
VC.E_24. Línea de tendencia de axiles	223



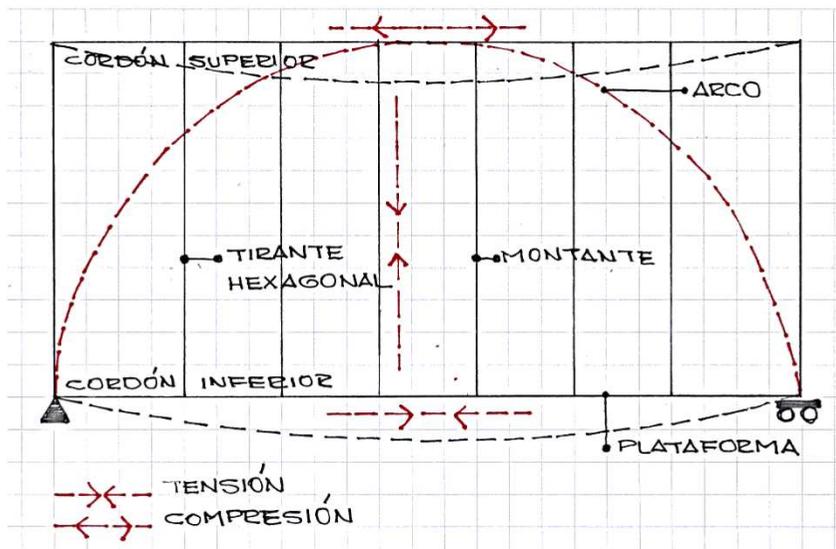
1. Sección del arco del Puente de la Exposición, donde se aprecia su forma cilíndrica.



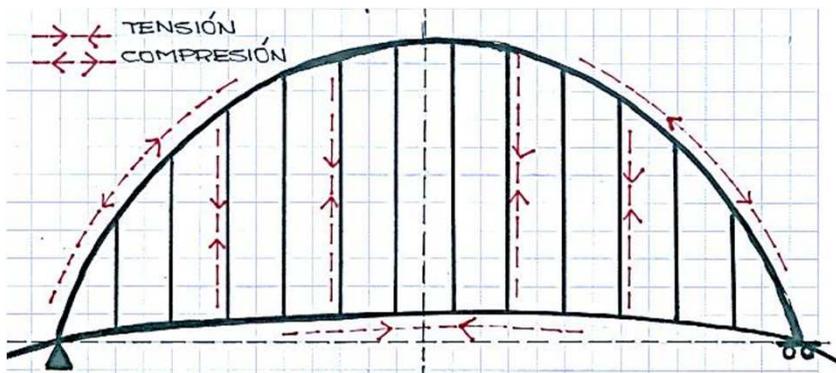
2. Sección del tablero del Puente de la Exposición, donde se aprecia la viga de cajón metálica con alma llena.



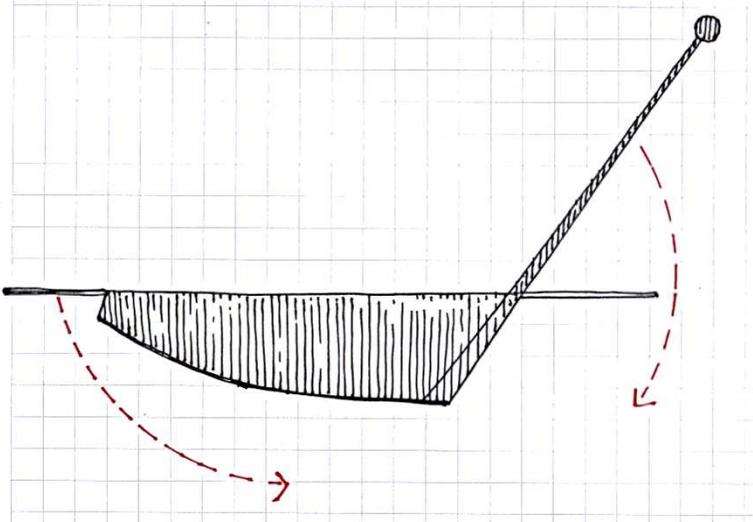
3. Esquema que muestra la distancia entre la horizontal y el punto más alejado de la curva de la plataforma.



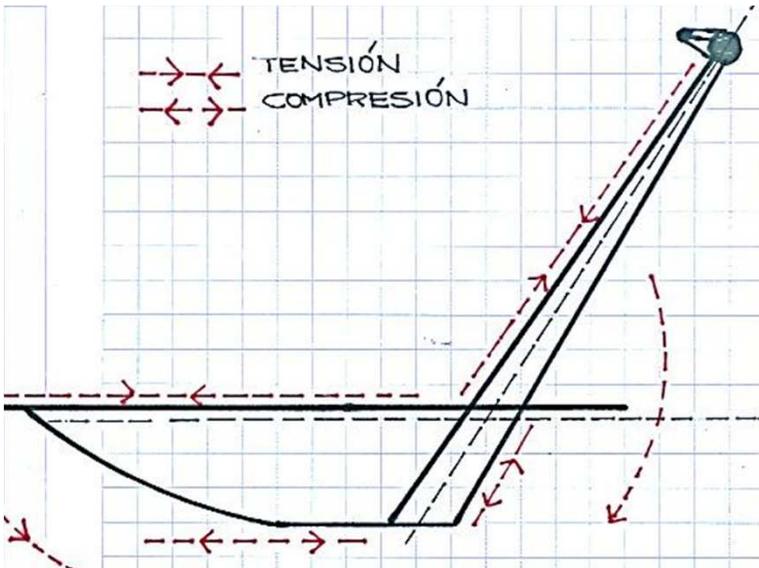
4. Celosía de canto variable adaptada a la ley de esfuerzos.



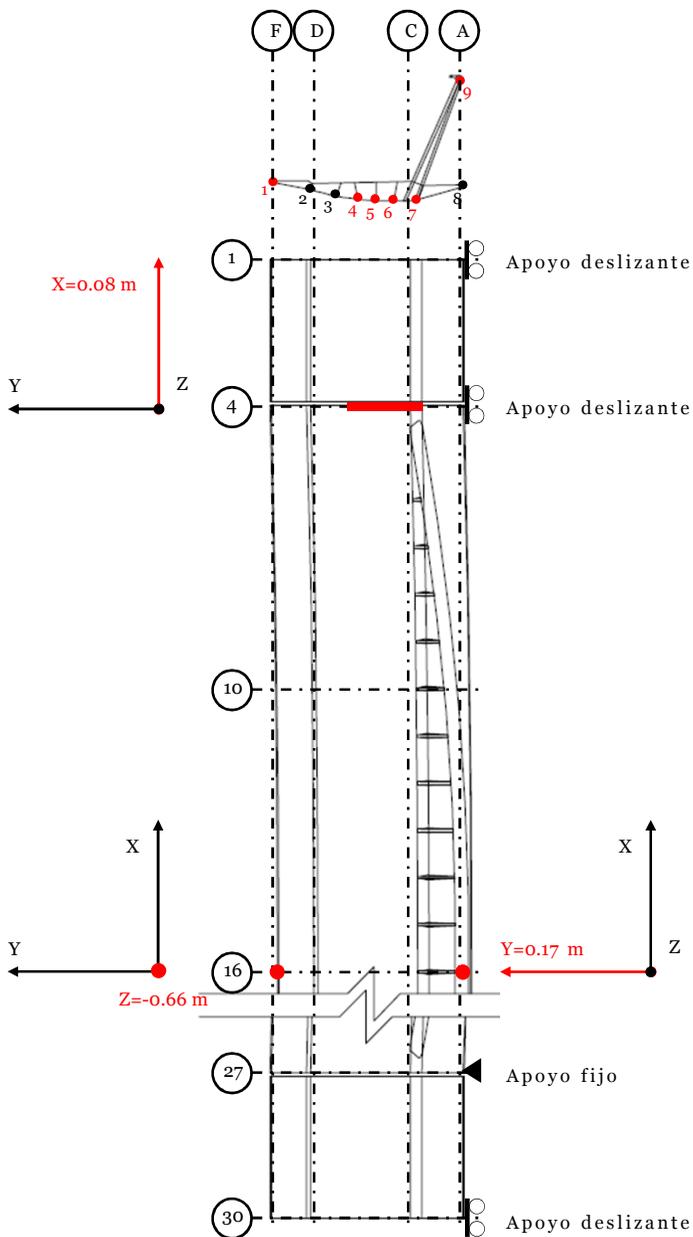
5. Esquema de esfuerzos de la celosía.



6. Momentos torsores, por apoyo descentrado y arco inclinado.



7. Esquema de esfuerzos de forjado en volado.



8. Esquema de máximas deformaciones del puente.

MODELO ORIGINAL: DETALLADO

Deformaciones resultantes

EJE X

Las deformaciones en el eje cartesiano X son provocadas principalmente por los tipos de apoyo del puente: un apoyo fijo y tres deslizantes.

Por tanto, la máxima deformación la sufre el extremo opuesto del apoyo fijo. La deformación máxima alcanza 0.08 m en el eje 4, puntos 4, 5, 6 y 7 (fig. 8).

EJE Y

El desplazamiento de la estructura en este eje se debe a la excentricidad del arco. Dicha posición del arco significa una plataforma en volado de 18 m, la cual genera un efecto de volteo, desplazando la estructura en el eje Y.

La máxima deformación es 0.17 m y la sufre el arco en su punto más alto, eje 16-17 (fig. 8).

EJE Z

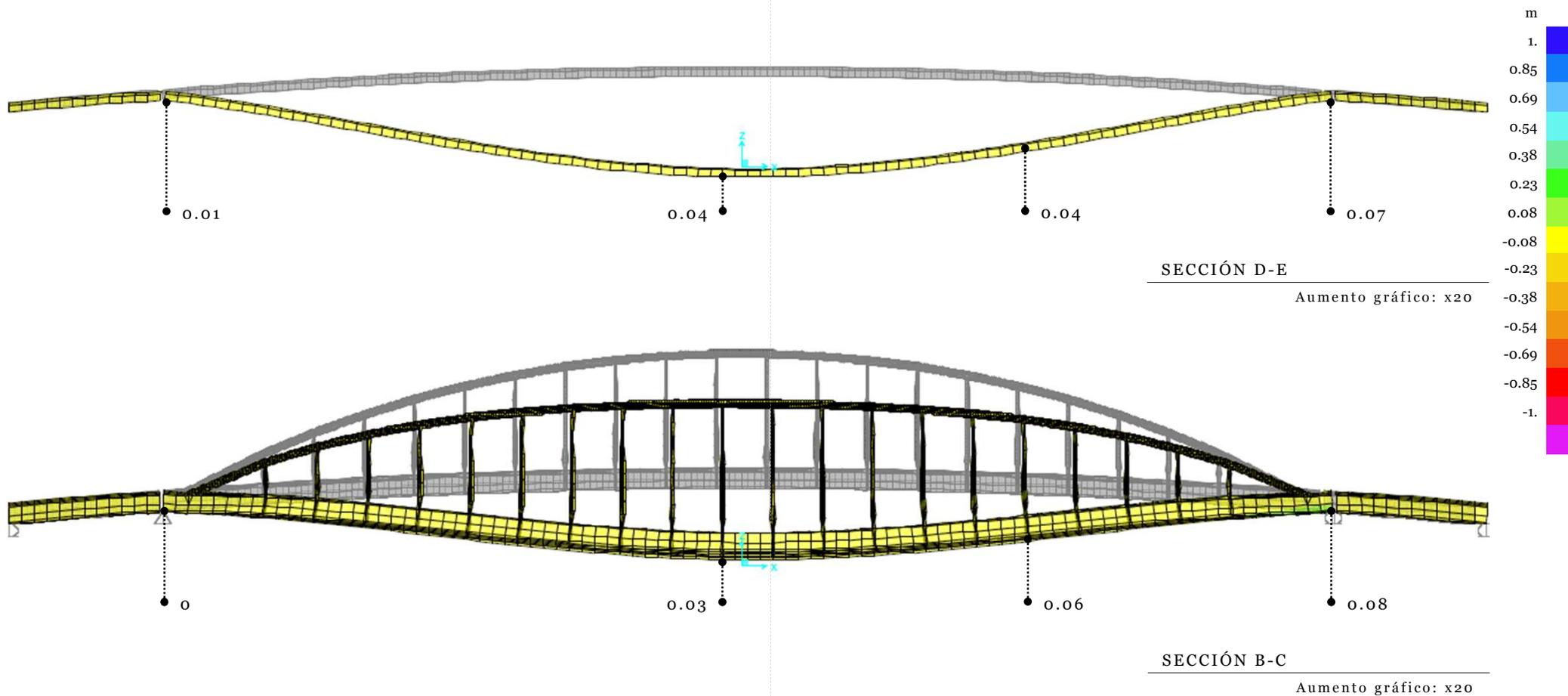
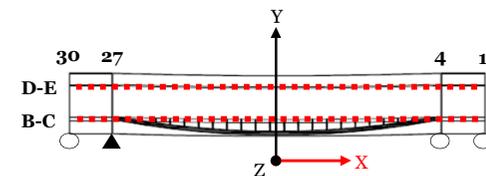
La magnitud que determina la deformación vertical del puente es la luz libre de 134 m.

La máxima deformación se da en el tramo central de la plataforma, la zona más alejada del arco, eje 16-17/F. Alcanza -0.66 m de desplazamiento (fig. 8).

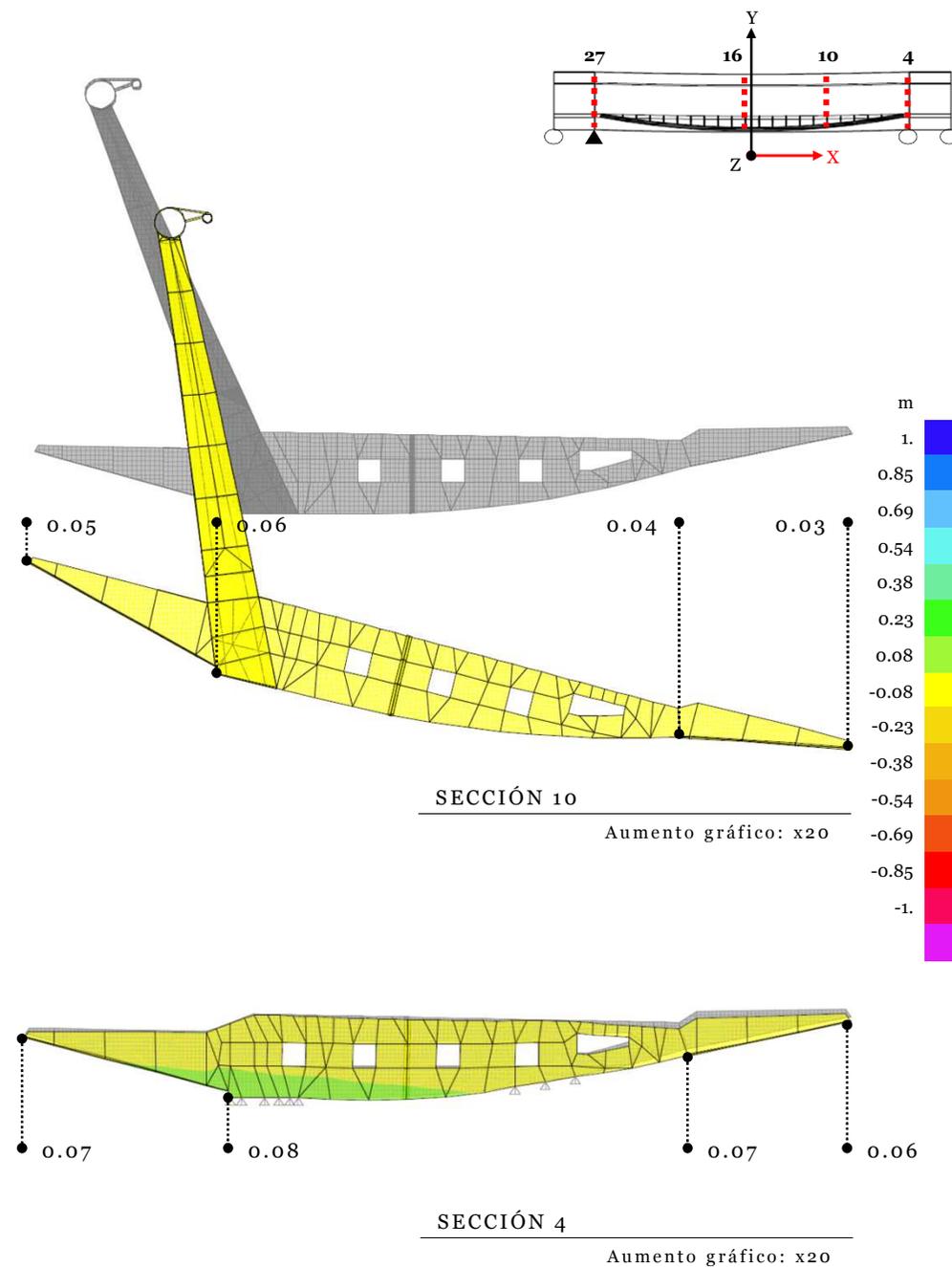
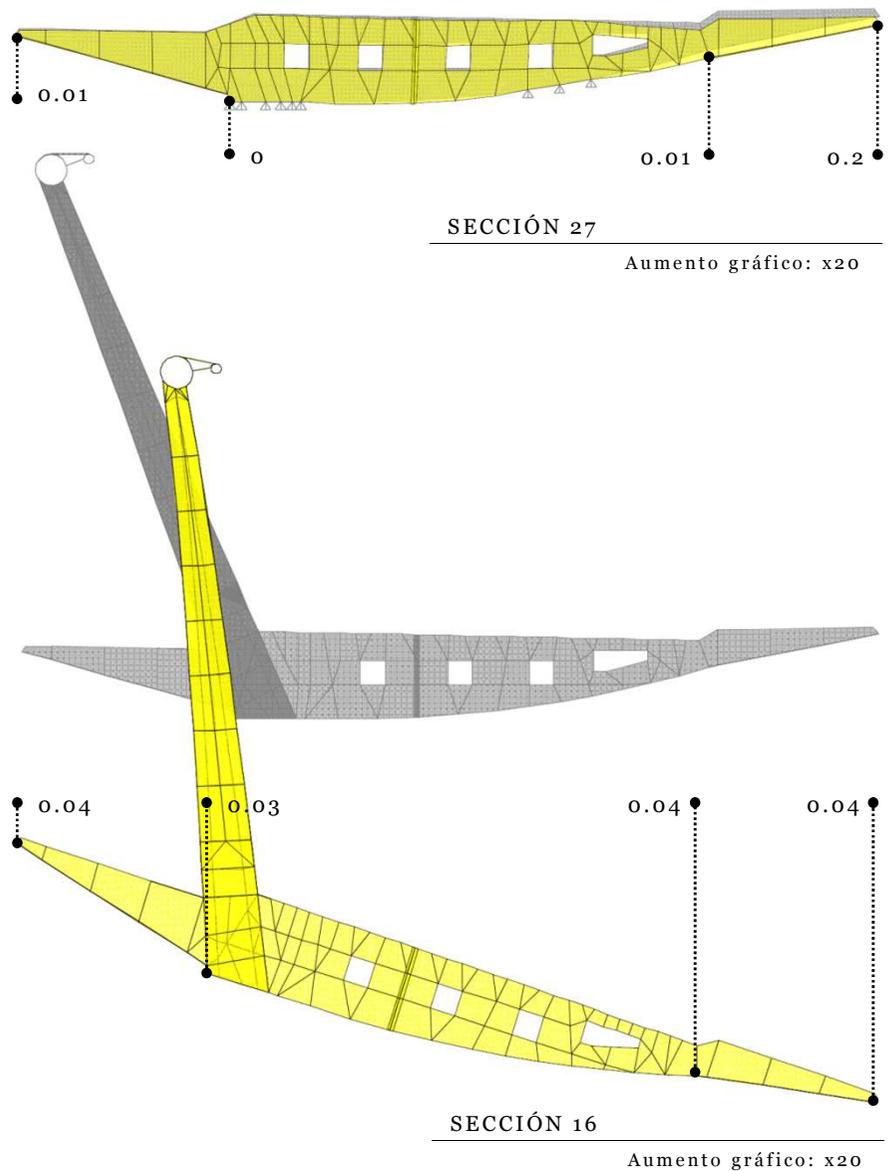
O.D_1. Deformación en escala de colores: horizontal X

Existen dos tipos de apoyo:

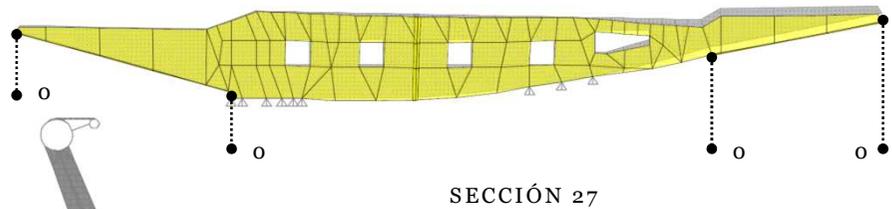
1. Deslizante (○): restricción de movimiento en Y y Z.
Corresponde a los ejes 1, 4 y 30.
2. Empotrado (▲): restricción de movimiento en X, Y y Z.
Corresponde al eje 27.



O.D_1. Deformación en escala de colores: horizontal X

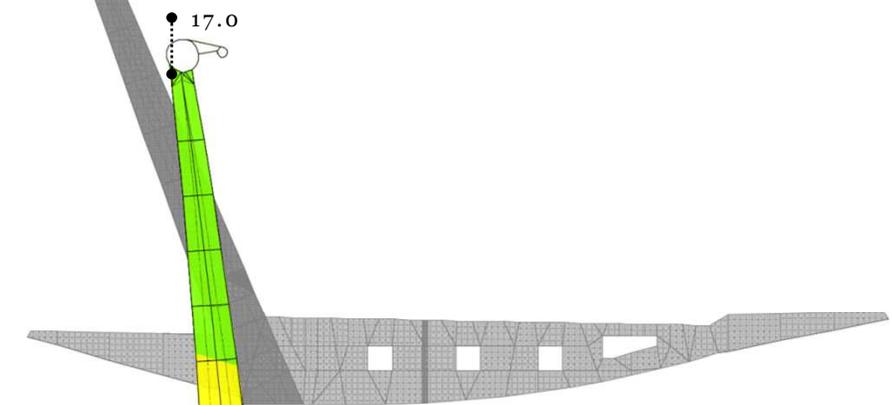


O.D_1. Deformación en escala de colores: horizontal Y



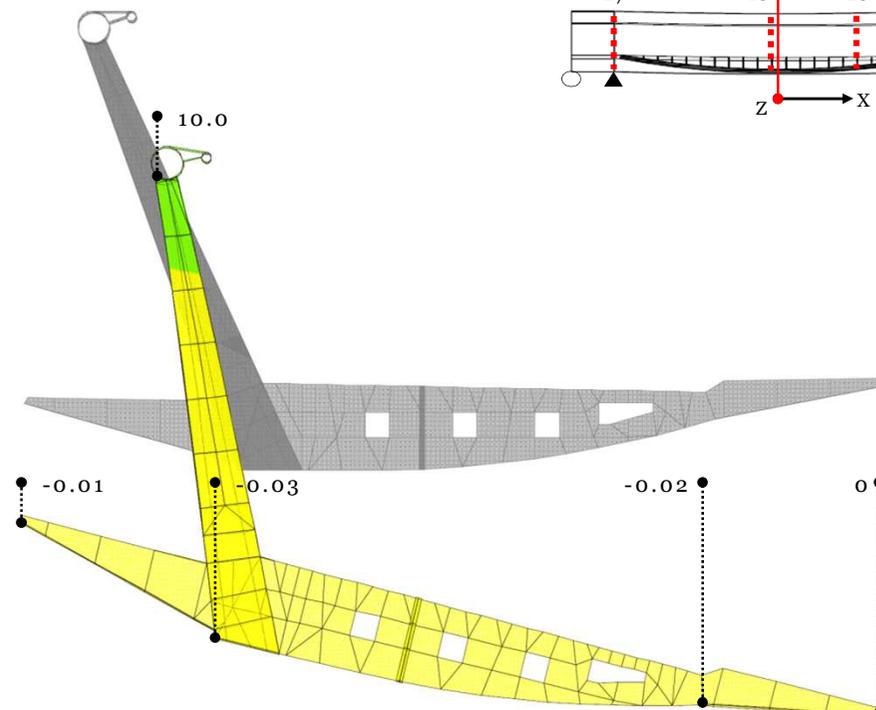
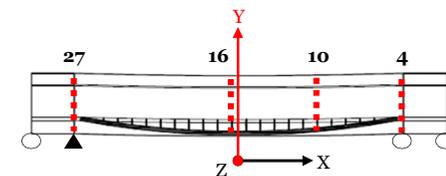
SECCIÓN 27

Aumento gráfico: x20



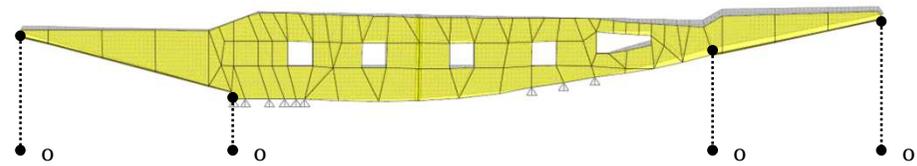
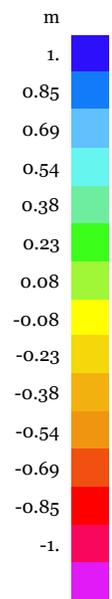
SECCIÓN 16

Aumento gráfico: x20



SECCIÓN 10

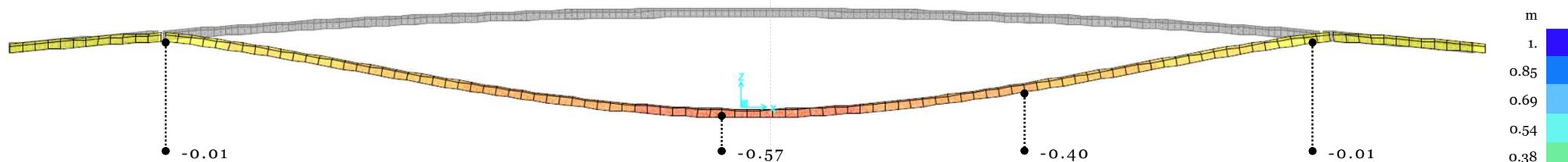
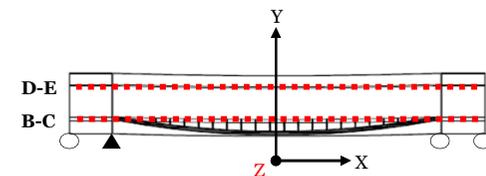
Aumento gráfico: x20



SECCIÓN 4

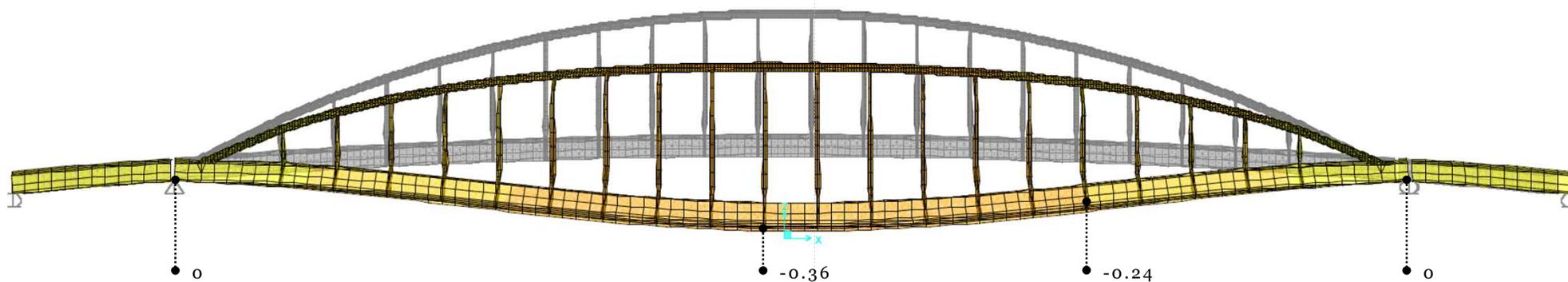
Aumento gráfico: x20

O.D_1. Deformación en escala de colores: vertical Z



SECCIÓN D-E

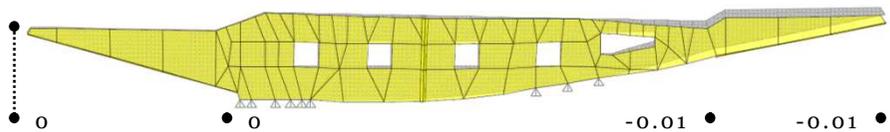
Aumento gráfico: x20



SECCIÓN B-C

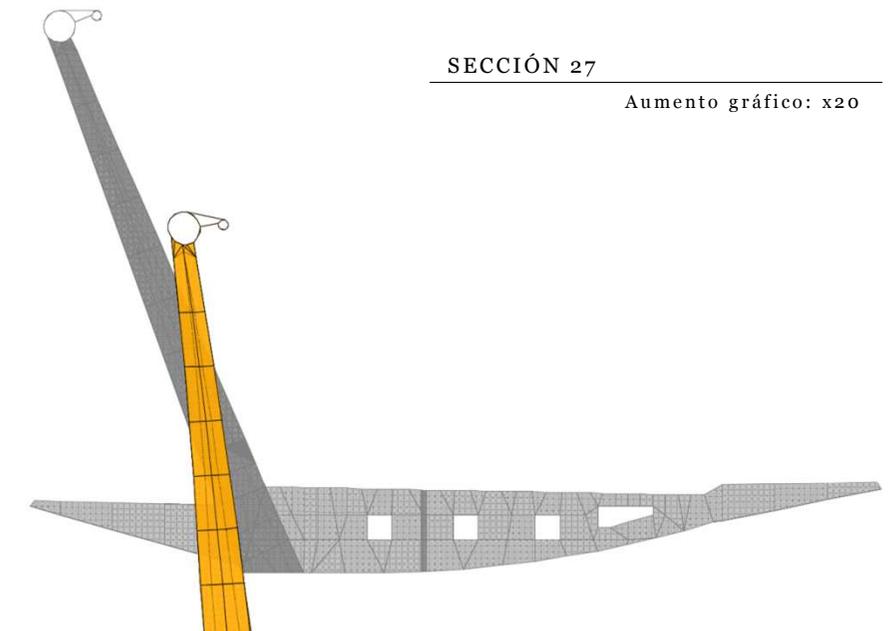
Aumento gráfico: x20

O.D_1. Deformación en escala de colores: vertical Z



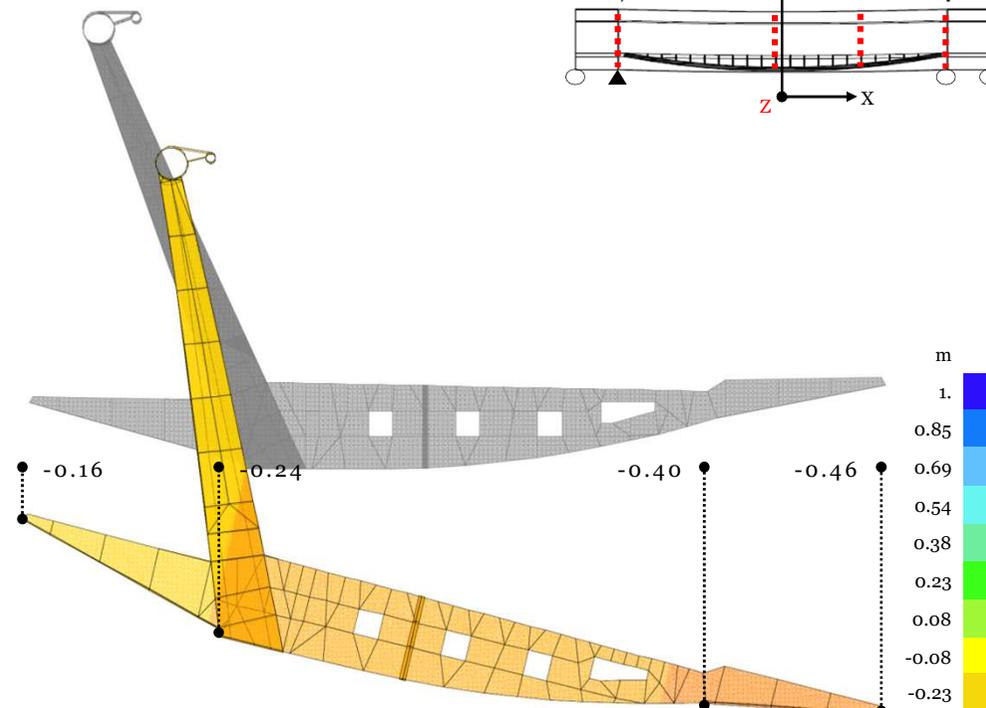
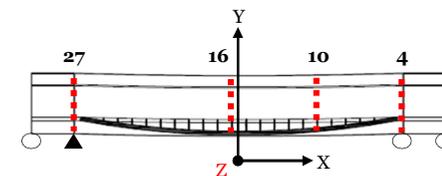
SECCIÓN 27

Aumento gráfico: x20



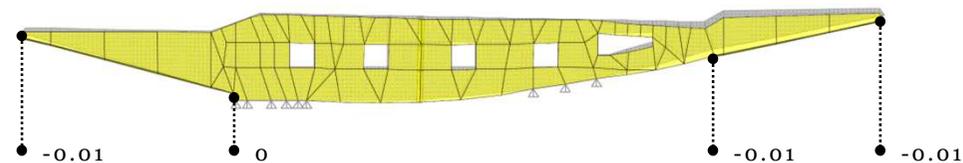
SECCIÓN 16

Aumento gráfico: x20



SECCIÓN 10

Aumento gráfico: x20



SECCIÓN 4

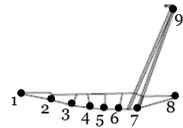
Aumento gráfico: x20

O.D_2. Cuadro de deformaciones

Tabla 1: Deformación y rotación del modelo original detallado

Ref.	x		y		z	
	m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección eje 4: apoyo deslizante						
1	0.06	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00
2	0.07	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00
3	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
4	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01
5	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
6	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
7	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01
8	0.07	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00
Sección eje 10						
1	0.03	-0.01	0.00	-0.01	-0.46	0.00
2	0.04	-0.01	-0.02	-0.01	-0.40	0.00
3	0.05	-0.01	-0.03	-0.01	-0.36	0.00
4	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.33	0.00
5	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.30	0.00
6	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.27	0.00
7	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.24	0.00
8	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.16	0.00
9	0.03	-0.01	0.10	-0.01	-0.19	0.00

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

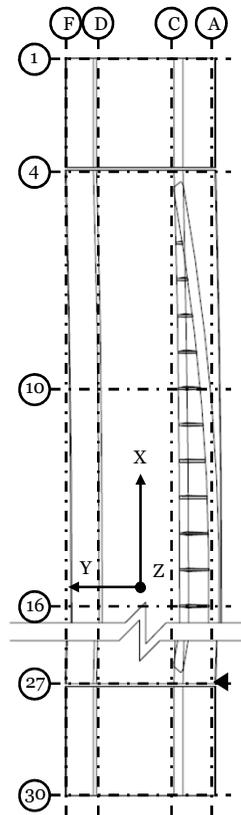


Sección eje 16

1	0.04	-0.02	0.00	0.00	-0.66	0.00
2	0.04	-0.02	-0.02	0.00	-0.57	0.00
3	0.04	-0.02	-0.03	0.00	-0.52	0.00
4	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.48	0.00
5	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.44	0.00
6	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.40	0.00
7	0.03	-0.02	-0.04	0.00	-0.36	0.00
8	0.04	-0.02	-0.01	0.00	-0.27	0.00
9	0.04	-0.01	0.17	0.00	-0.28	0.00

Sección eje 27: apoy o fijo

1	0.02	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00
2	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01
8	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Esfuerzos resultantes

El modelo detallado fue sometido a SVM —Tensión de Von Mises por sus siglas en inglés— en la combinación ELUu, considerando como valor máximo $338\ 100\ \text{kN/m}^2$ —la resistencia del acero $355\ \text{kN/m}^2$, dividida por un factor de minoración 1.05—.

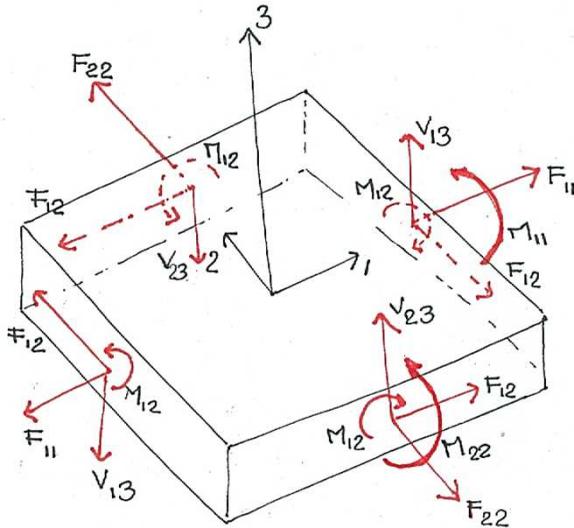
La tensión de Von Mises⁶ es una magnitud física proporcional a la energía de deformación elástica que combina todas las tensiones (fig. 9). Se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de esfuerzos estáticos permisibles en estructuras. En otras palabras, controla que el diseño no salga del dominio elástico.

Los elementos del puente presentan distintos niveles de tensiones. El arco es el único elemento del puente que soporta tensiones uniformes, sus valores van desde $260\ 000$ a $338\ 100\ \text{kN/m}^2$, que es el máximo admisible por el material aplicado en el modelo. Mientras que los valores correspondientes a las péndolas y el tablero, varían desde 800 a $360\ 000\ \text{kN/m}^2$.

El 49% de la estructura trabaja por debajo de los $182\ 000\ \text{kN/m}^2$ —54% de la resistencia máxima del material—. EL 47% resiste entre $182\ 000$ y $312\ 000\ \text{kN/m}^2$ —92% de la resistencia del material—. Entre tanto, el 4% restante trabaja al máximo o incluso supera la resistencia del acero (tabla 2).

Las zonas de mayores tensiones se ubican en los encuentros arco-tablero y tablero-muros de contención. Dichos encuentros son eficaces gracias a las propiedades de ductilidad y tenacidad del acero que le permiten amoldarse. Antes de romperse, el acero acepta deformaciones importantes de tipo plástico en la zonas de acciones más concentradas, produciendo una distensión y una uniformización del régimen tensional.

Cabe mencionar que el promedio ponderado de tensiones Von Mises alcanza los 151 281 kN/m², en otras palabras, el puente trabaja al 45% de su capacidad resistente.



Donde:

M_{11} : momento en Y

M_{22} : momento en X

M_{12} : momento de alabeo

F_{11} : fuerza normal en X

F_{22} : fuerza normal en Y

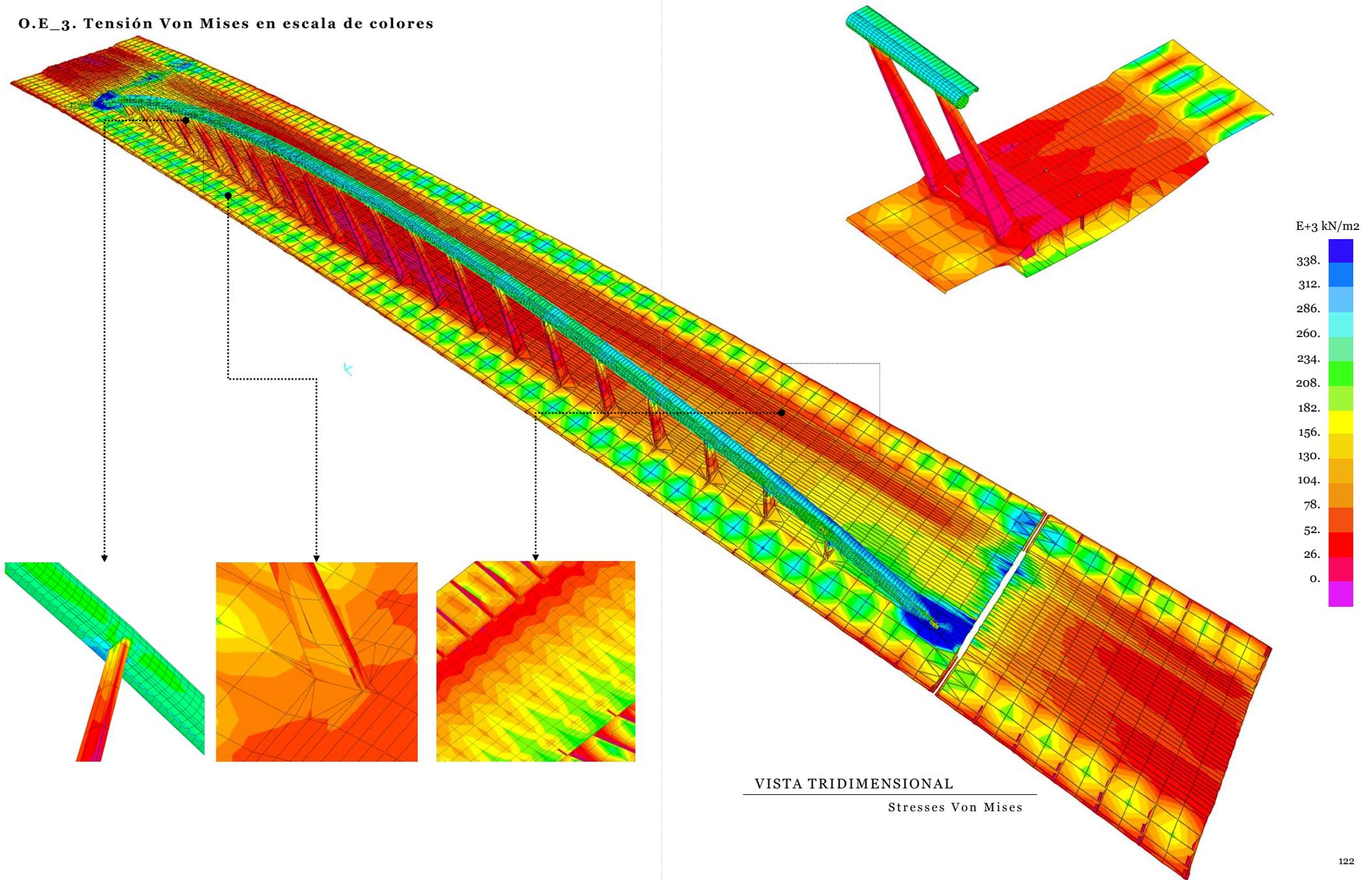
F_{12} : fuerza tangencial

V_{13} : cortante en X

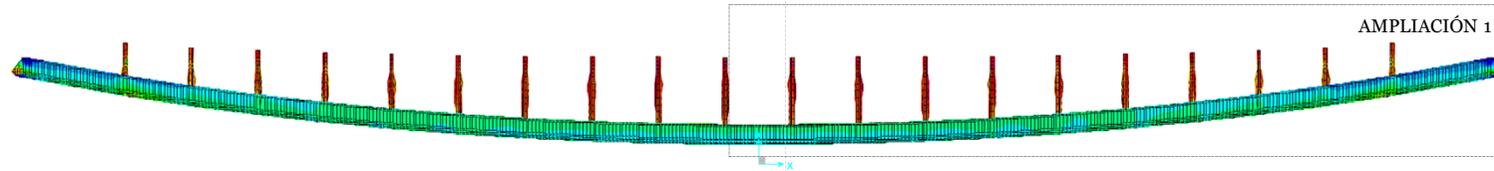
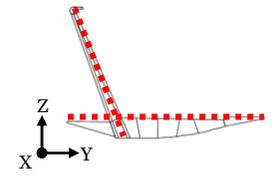
V_{23} : cortante en Y

9. Esquema de tensiones en un plano, las cuales son integradas en la Tensión Von Mises.

O.E_3. Tensión Von Mises en escala de colores



O.E_3. Tensión Von Mises en escala de colores



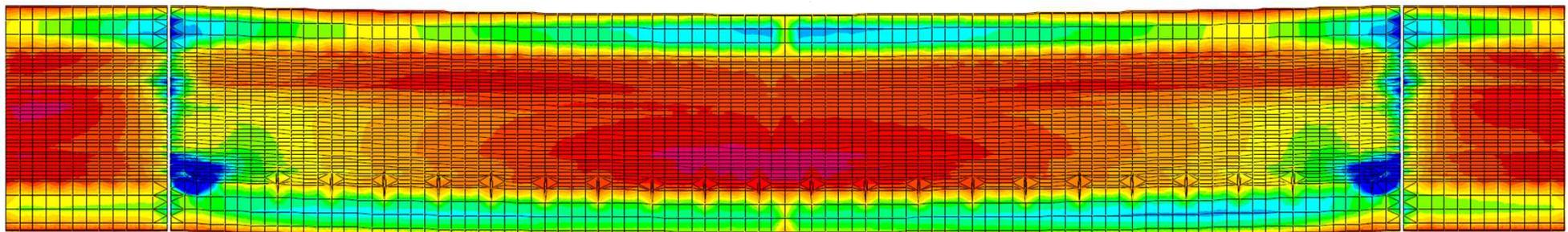
ARCO EN PLANTA

Stresses Von Mises



ARCO EN ELVACIÓN

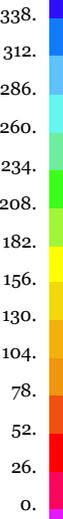
Stresses Von Mises



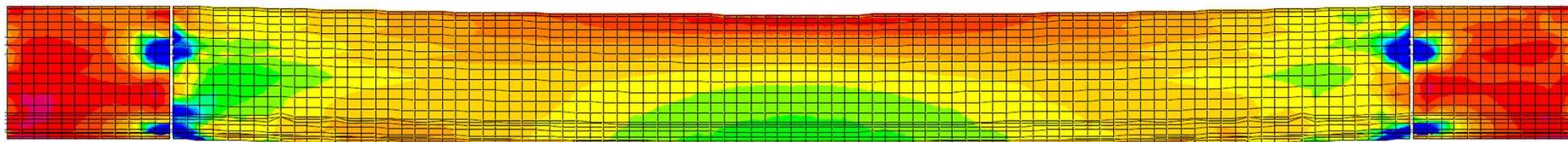
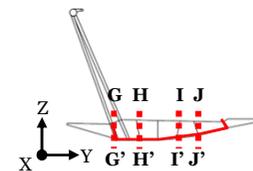
TABLERO EN PLANTA: SUPERIOR

Stresses Von Mises

E+3 kN/m²



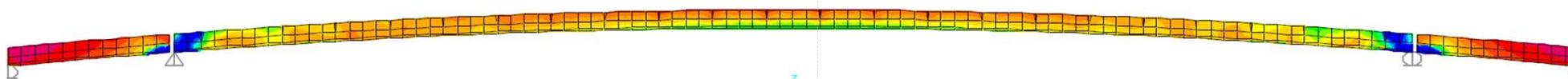
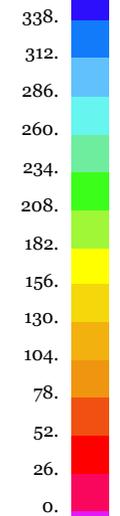
O.E_3. Tensión Von Mises en escala de colores



TABLERO EN PLANTA: INFERIOR

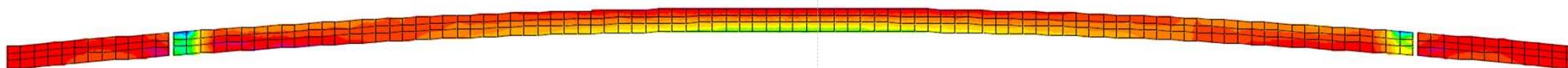
Stresses Von Mises

E+3 kN/m²



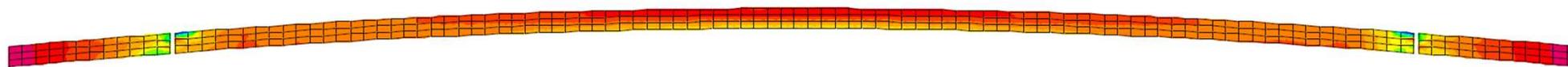
SECCIÓN G-G'

Stresses Von Mises



SECCIÓN H-H'

Stresses Von Mises



SECCIÓN I-I'

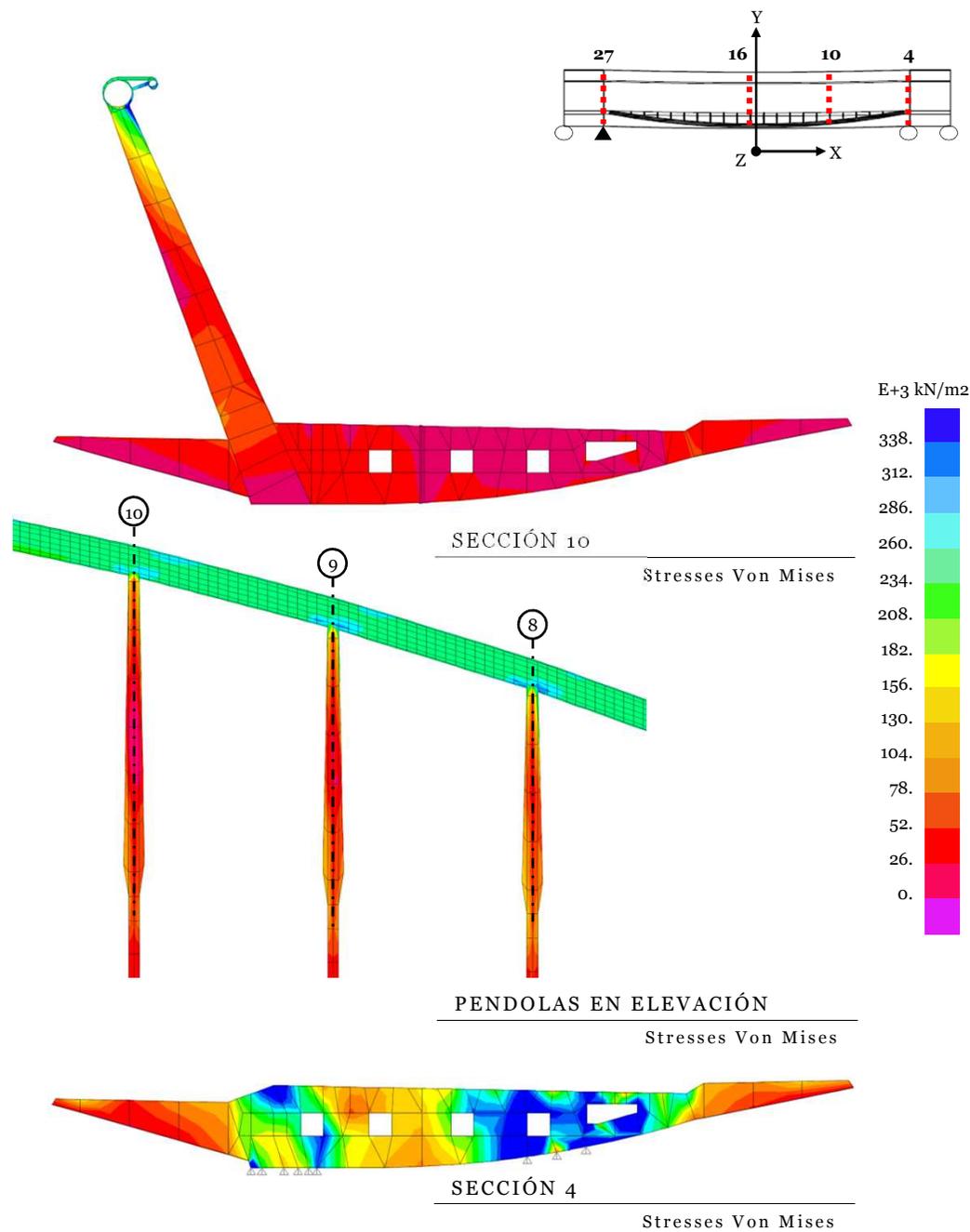
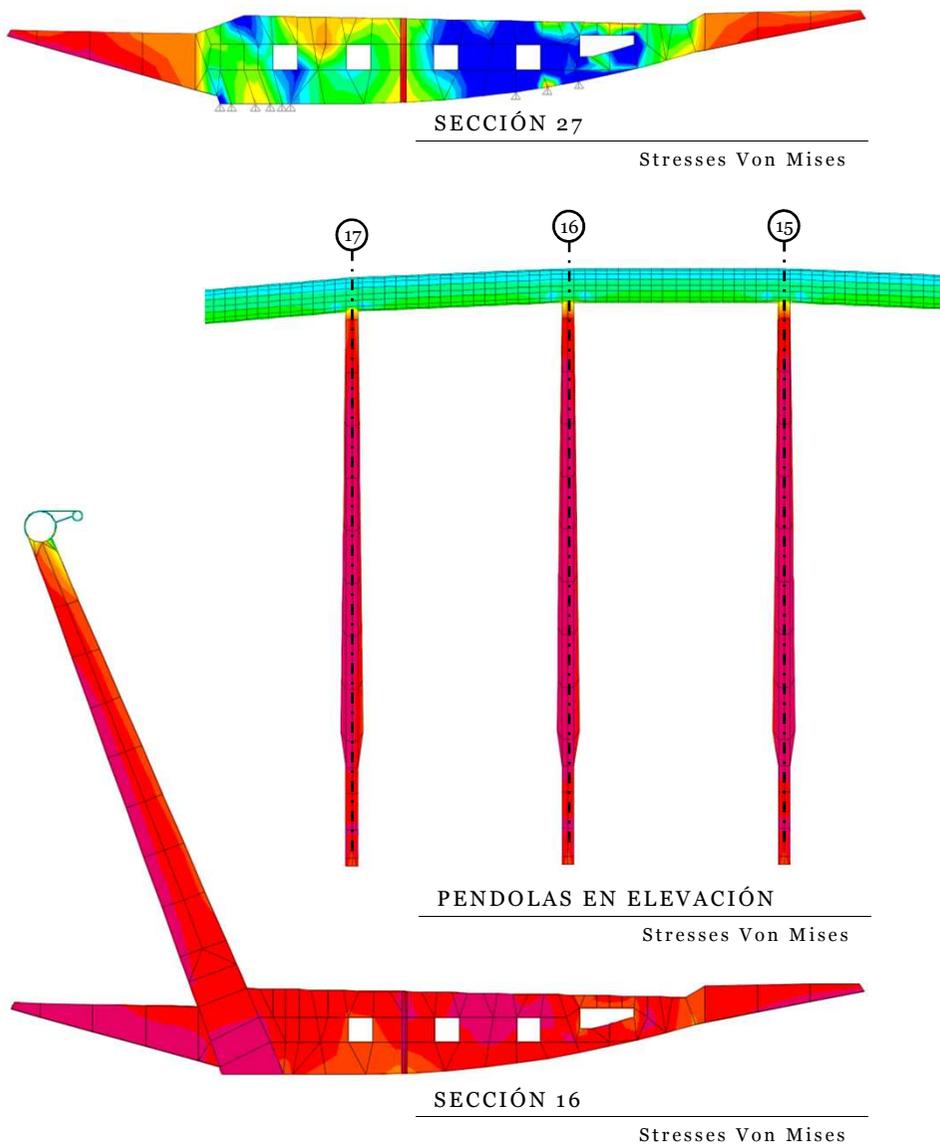
Stresses Von Mises



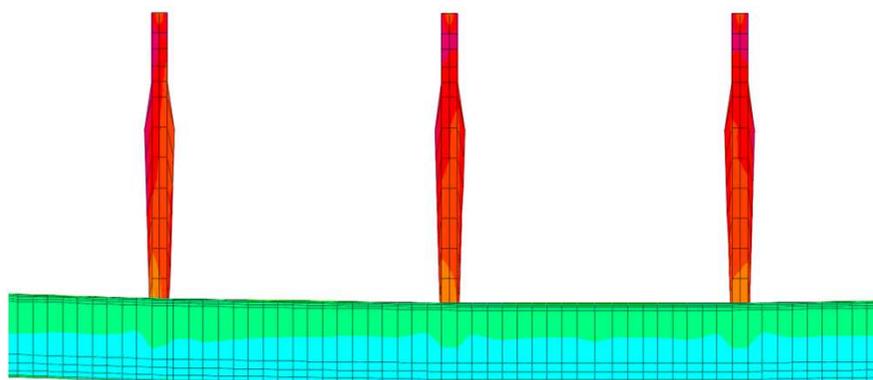
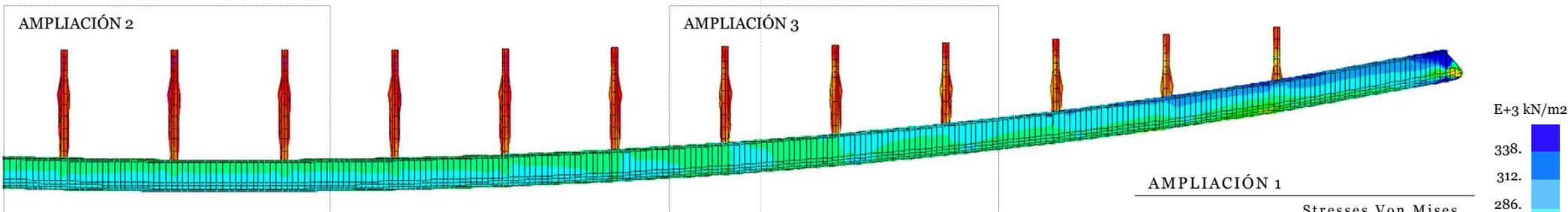
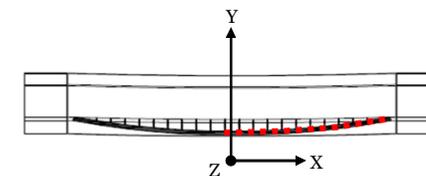
SECCIÓN J-J'

Stresses Von Mises

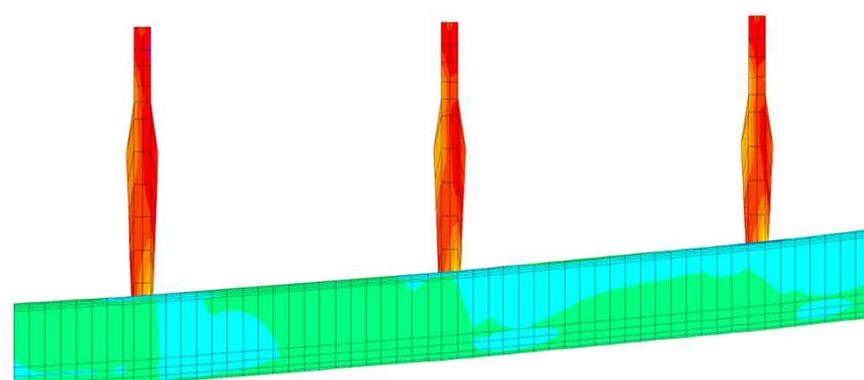
O.E_3. Tensión Von Mises en escala de colores



O.E_3. Tensión Von Mises en escala de colores



AMPLIACIÓN 2
Stresses Von Mises

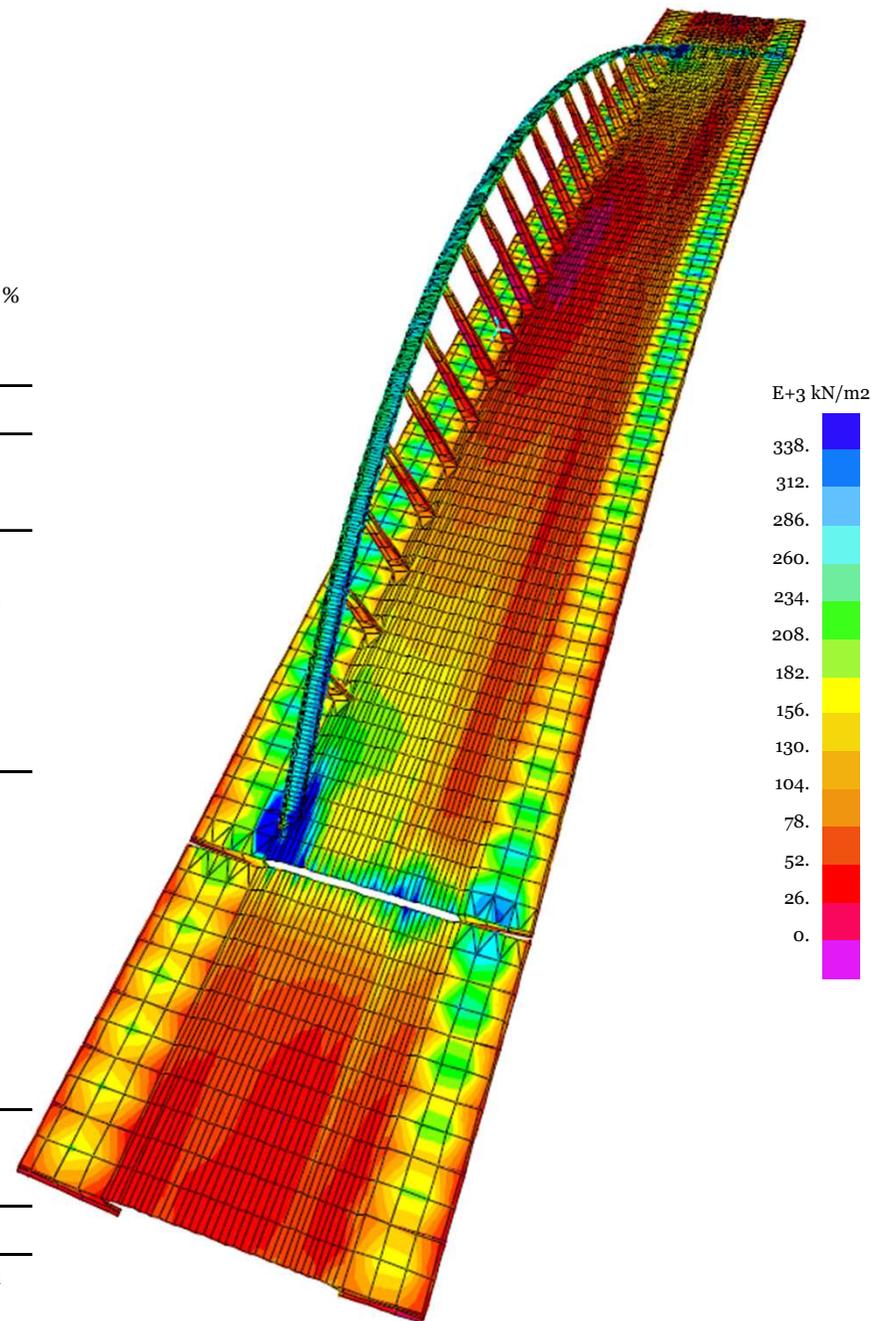


AMPLIACIÓN 3
Stresses Von Mises

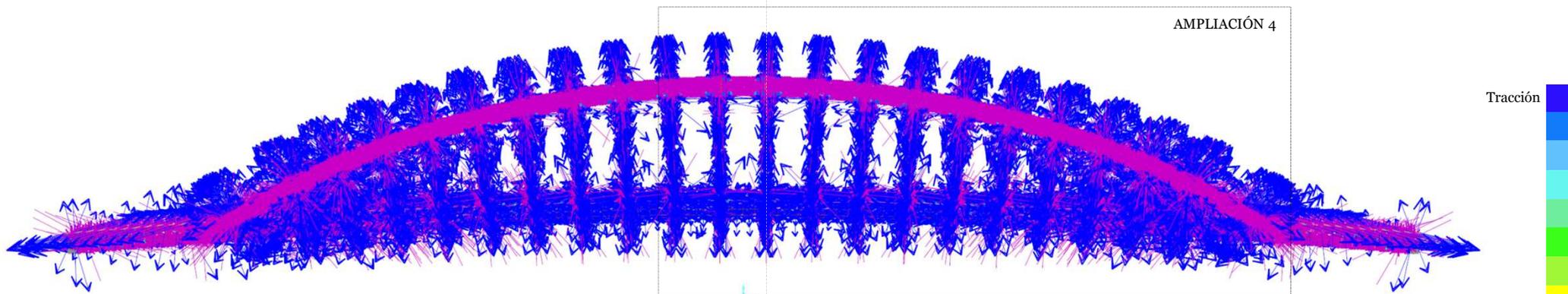
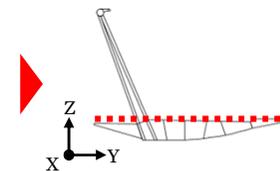
O.E_4. Cuadro de Tensiones Von Mises

Tabla 2: Tensiones Von Mises por porcentaje de puntos del modelo tridimensional

Tensión Von Mises			Modelo tridimensional		Tensión por % de puntos
Admisible	Máxima	Mínima	Puntos		
Porcentaje	<=	>	Conteo	Porcentaje	
%	kn/m ²		und.	%	%kn/m ²
	∞	338100	846	2.78%	9402.78
100.00%	338100	312000	586	1.93%	6010.26
92.28%	312000	286000	2066	6.79%	19423.93
84.59%	286000	260000	3710	12.20%	31709.40
76.90%	260000	234000	5654	18.59%	43492.31
69.21%	234000	208000	2213	7.27%	15131.62
61.52%	208000	182000	509	1.67%	3045.30
53.83%	182000	156000	625	2.05%	3205.13
46.14%	156000	130000	964	3.17%	4119.66
38.45%	130000	104000	1207	3.97%	4126.50
30.76%	104000	78000	1625	5.34%	4166.67
23.07%	78000	52000	2602	8.55%	4447.86
15.38%	52000	26000	3510	11.54%	3000.00
7.69%	26000	0	4303	14.15%	0.00
Promedio ponderado de la Tensión Von Mises global del puente					
					kn/m ²
44.74%	∞	0	30420	100.00%	151281.41



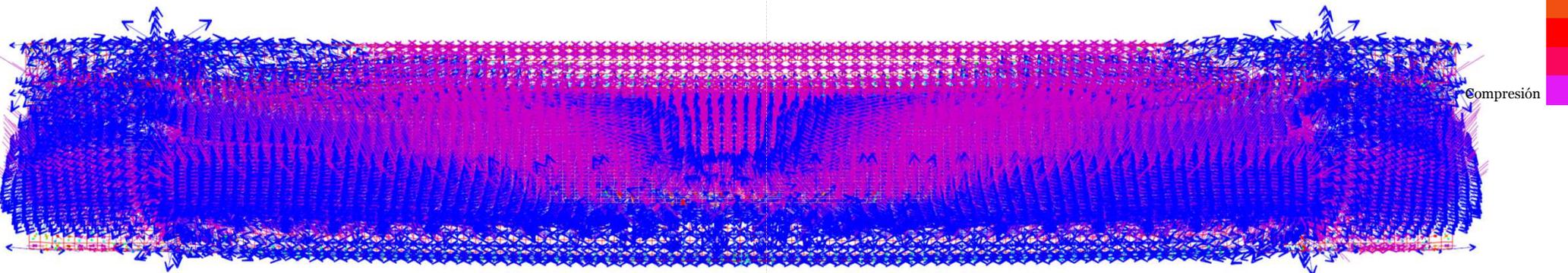
O.E_5. Axiles en flechas



AMPLIACIÓN 4

PUENTE EN ELEVACIÓN

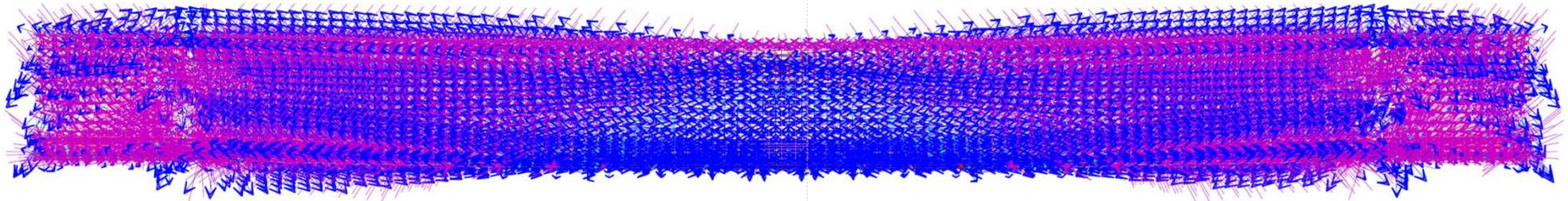
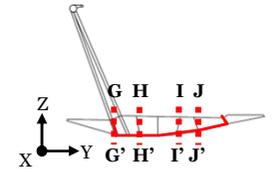
Axiles en flechas



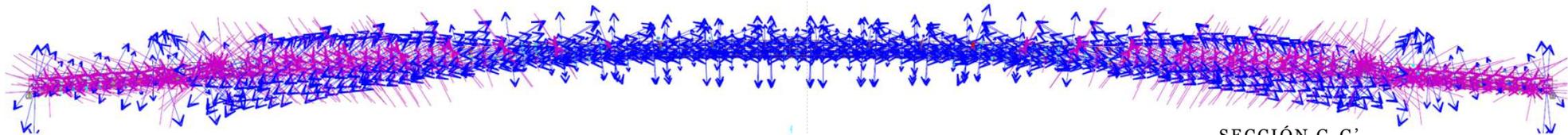
TABLERO EN PLANTA

Axiles en flechas

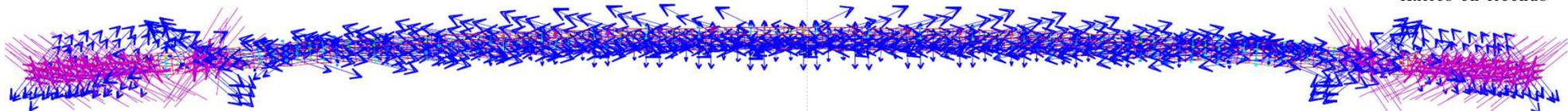
O.E_5. Axiles en flechas



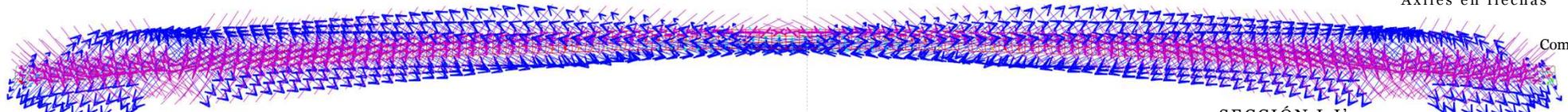
TABLERO EN PLANTA: INFERIOR Tracción
Axiles en flechas



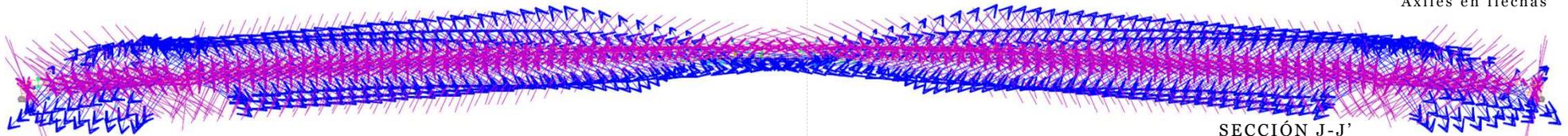
SECCIÓN G-G'
Axiles en flechas



SECCIÓN H-H'
Axiles en flechas



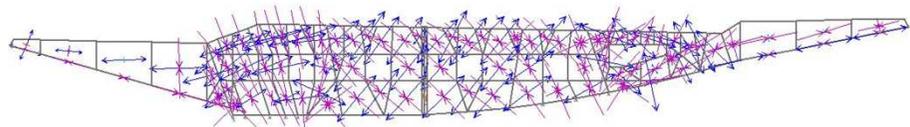
SECCIÓN I-I'
Axiles en flechas



SECCIÓN J-J'
Axiles en flechas

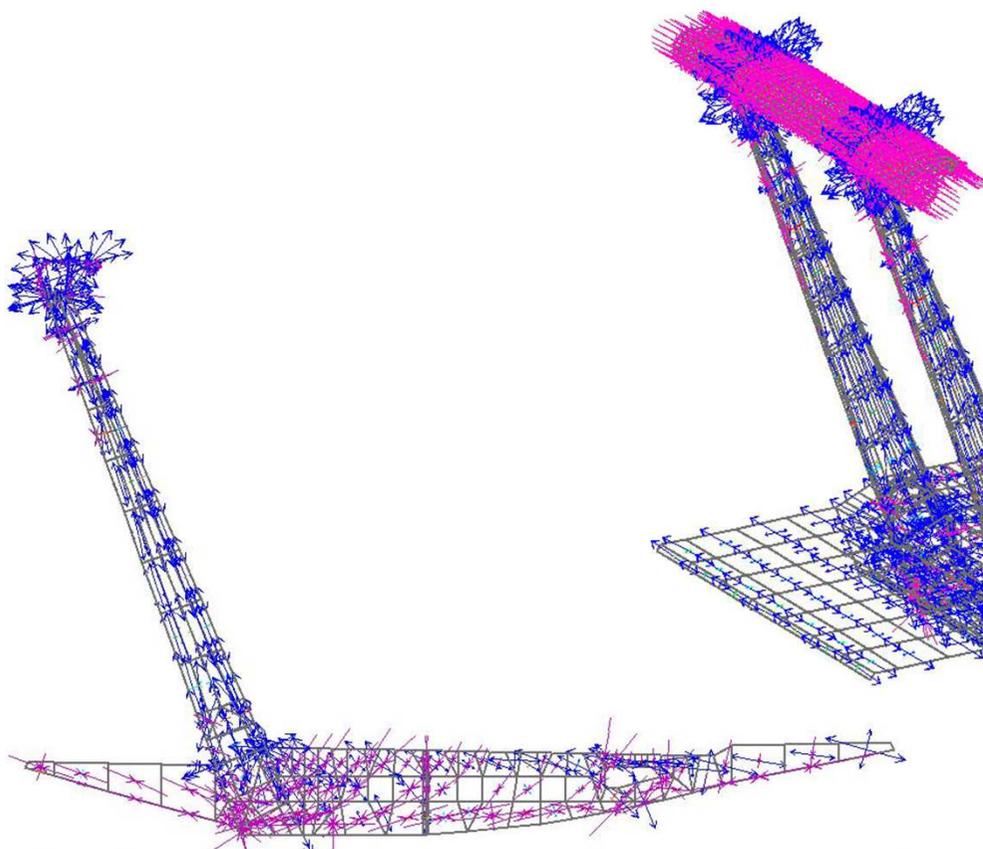


O.E_5. Axiles en flechas



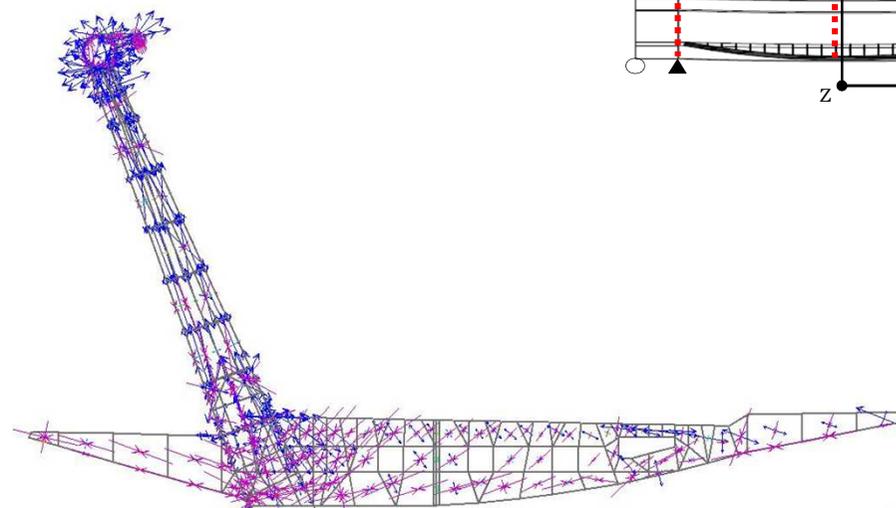
SECCIÓN 27

Axiles en flechas



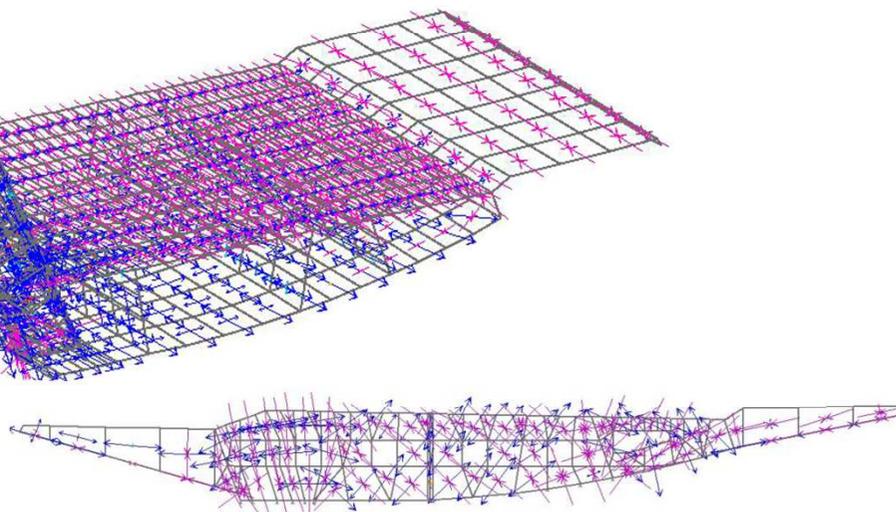
SECCIÓN 16

Axiles en flechas



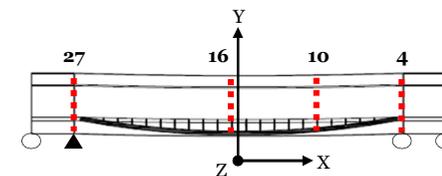
SECCIÓN 10

Axiles en flechas

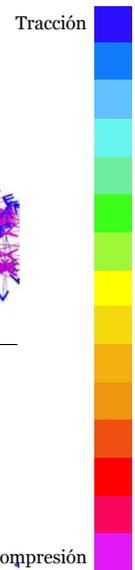
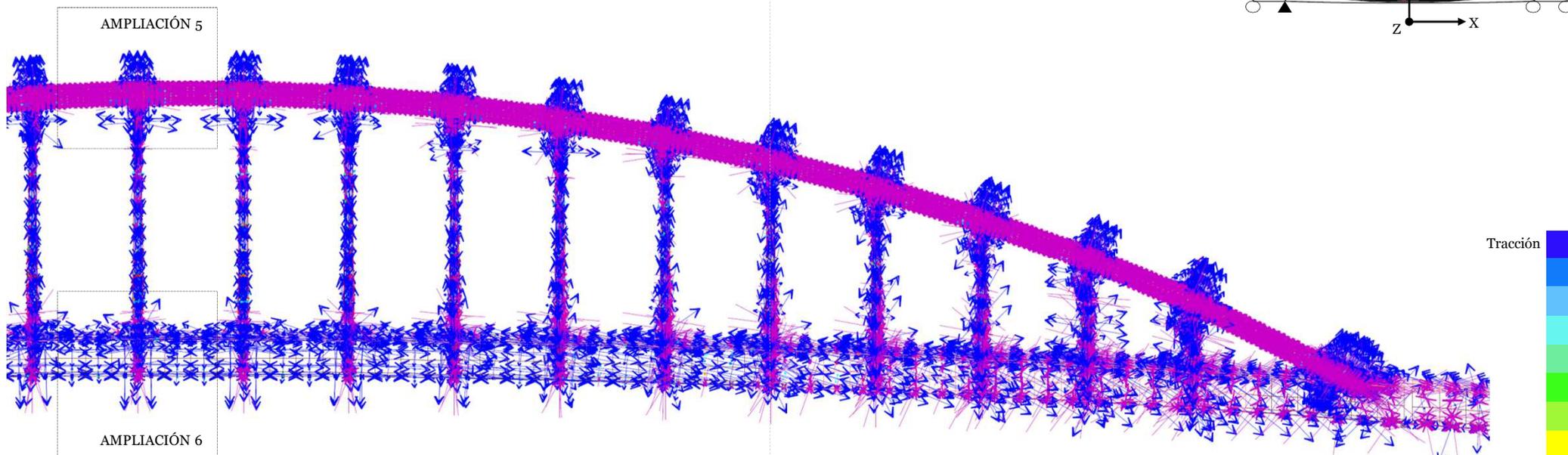
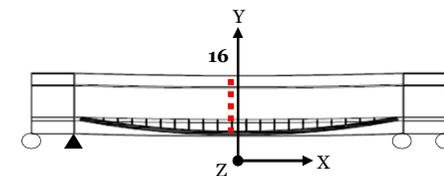


SECCIÓN 4

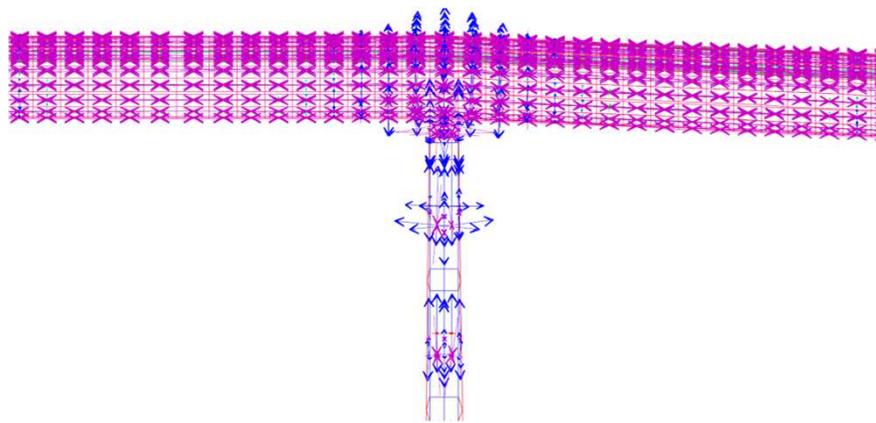
Axiles en flechas



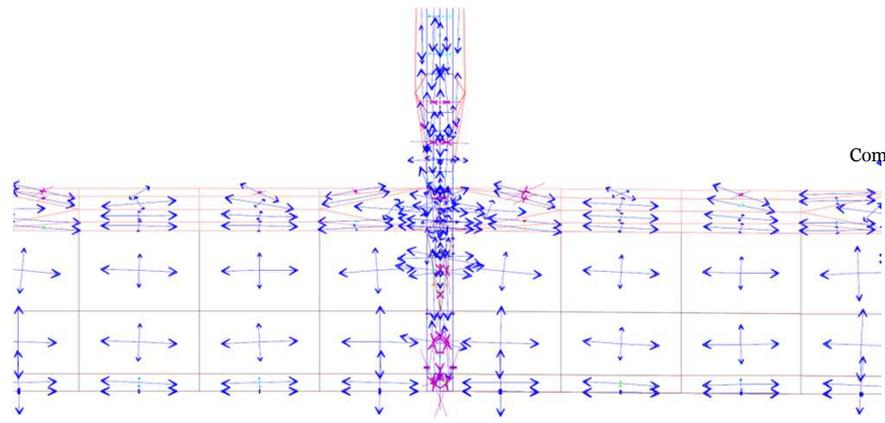
O.E_5. Axiles en flechas



AMPLIACIÓN 4
Axiles en flechas



AMPLIACIÓN 5
Axiles en flechas



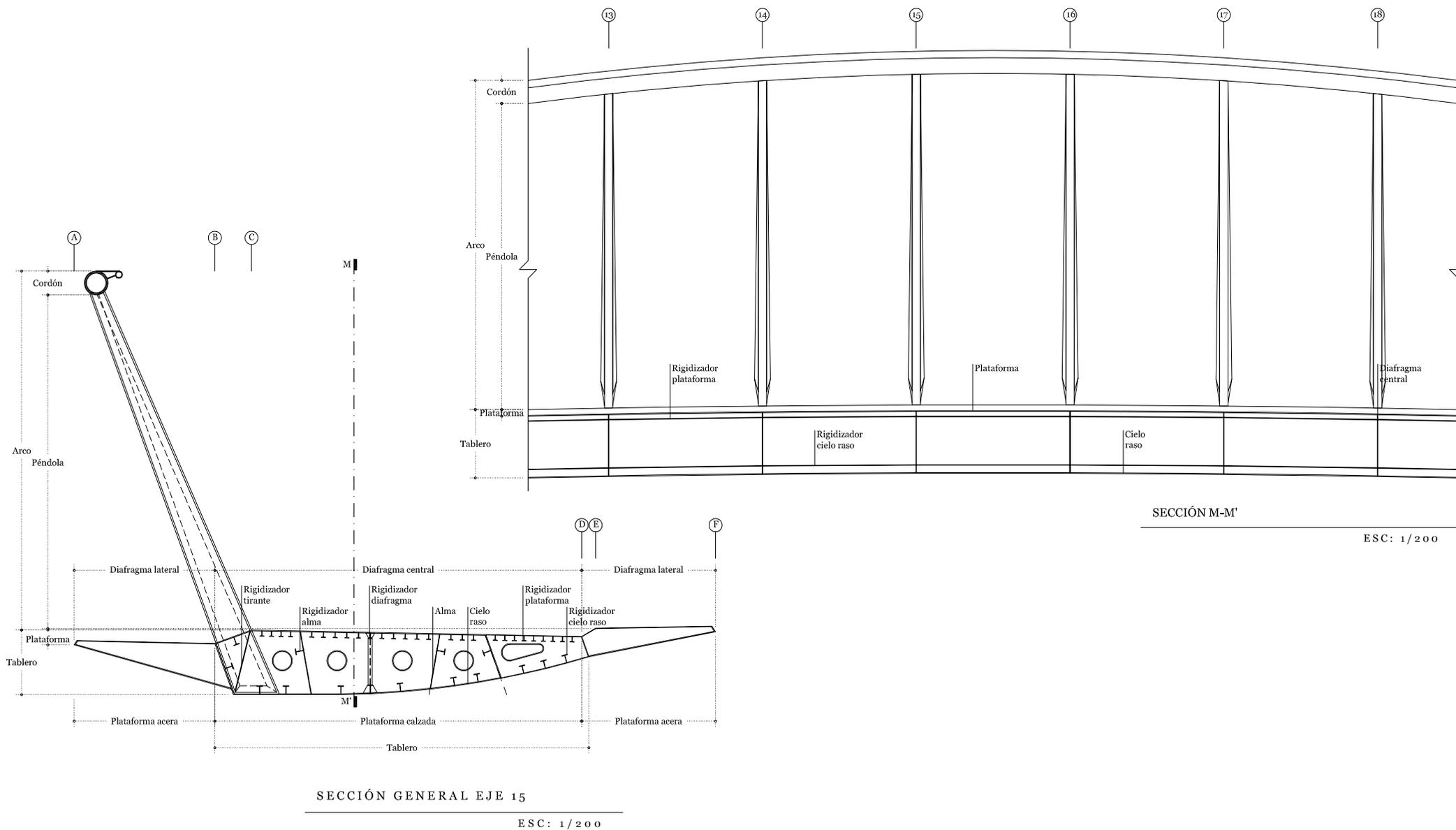
AMPLIACIÓN 6
Axiles en flechas

TRANSICIÓN DEL MODELO DETALLADO AL SIMPLIFICADO

Se variaron el espesor y dimensiones de los materiales del modelo simplificado a fin de igualar las deformaciones con las del modelo detallado.

Tabla 3: Variación de los materiales del modelo simplificado
Materialidad

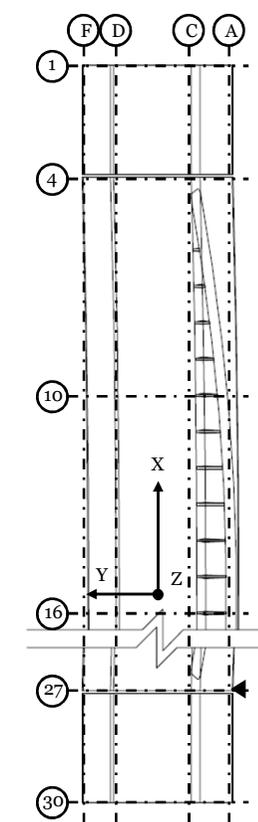
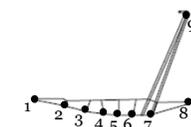
Elementos (fig. 5)		Materialidad	
		Modelo detallado	Modelo simplificado
Arco	Cordón	Tubo de 900 x 80	
		Tubo de 273 x 25	Tubo de 1000 x 90
		Plancha de 30	
Péndola	Péndola	HTM 550 x 439	HTM de sección variable, desde 1754 x 316 hasta 638 x 316
		Plancha de 20	
		Plancha de 15	
Plataforma	Calzada	Plancha de 30	Plancha de 40
	Acera	Plancha de 15	Plancha de 25
Diafragma	Central	Plancha de 15	Plancha de 15
		Plancha de 30	Plancha de 30
	Lateral	Plancha de 30	Plancha de 30
Alma		Plancha de 15	Plancha de 25
		Plancha de 20	Plancha de 30
		Plancha de 30	Plancha de 40
Rigidizador	Plataforma	IPN-400	-
	Alma	IPE-600	-
	Cielo raso	IPE-600	-
	Péndola	Plancha de 20	Plancha de 20
	Diafragma	IPN-400	IPN-400
Cielo raso		Plancha de 15	Plancha de 25
		Plancha de 20	Plancha de 30
		Plancha de 30	Plancha de 40
		Plancha de 40	Plancha de 40
Unión	Superior	Tubo de 100 x 100 x 20	Tubo de 100 x 100 x 20
	Inferior	Tubo de 500 x 500 x 30	Tubo de 500 x 500 x 30



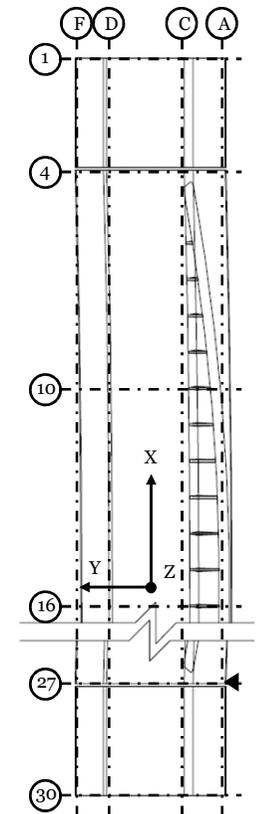
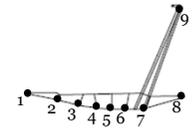
5. Esquema que nombra las partes del puente.

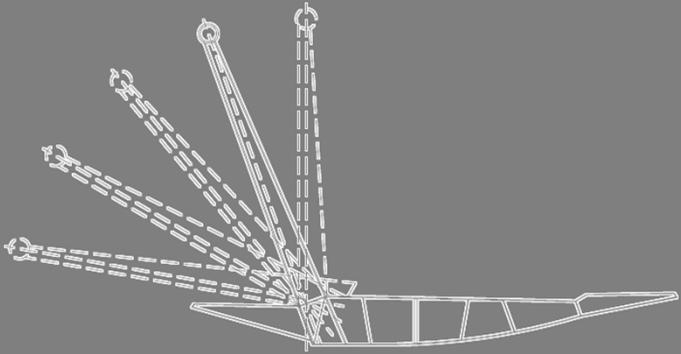
Tabla 4: Comparación de la deformación del modelo detallado y el simplificado

Ref.	Detallado						Simplificado						Diferencia					
	x		y		z		x		y		z		x		y		z	
	m		m		m		m		m		m		m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección eje 4: apoyo deslizante																		
1	0.06	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.07	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00
5	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
6	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
8	0.07	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00
Sección eje 10																		
1	0.03	-0.01	0.00	-0.01	-0.46	0.00	0.03	-0.01	0.00	-0.01	-0.44	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.02	0.00
2	0.04	-0.01	-0.02	-0.01	-0.40	0.00	0.04	-0.01	-0.01	-0.01	-0.39	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00
3	0.05	-0.01	-0.03	-0.01	-0.36	0.00	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.35	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00
4	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.33	0.00	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.32	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
5	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.30	0.00	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.30	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
6	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.27	0.00	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.28	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00
7	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.24	0.00	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.25	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00
8	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.16	0.00	0.05	-0.01	0.00	-0.01	-0.19	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.02	0.00
9	0.03	-0.01	0.10	-0.01	-0.19	0.00	0.03	-0.01	0.09	-0.01	-0.21	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00



Ref.	Detallado						Simplificado						Diferencia					
	x		y		z		x		y		z		x		y		z	
	m		m		m		m		m		m		m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección eje 16																		
1	0.04	-0.02	0.00	0.00	-0.66	0.00	0.04	-0.02	0.01	0.00	-0.64	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.02	0.00
2	0.04	-0.02	-0.02	0.00	-0.57	0.00	0.04	-0.01	-0.01	0.00	-0.57	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00
3	0.04	-0.02	-0.03	0.00	-0.52	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.52	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
4	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.48	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.48	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00
5	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.44	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.45	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00
6	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.40	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.42	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.02	0.00
7	0.03	-0.02	-0.04	0.00	-0.36	0.00	0.03	-0.01	-0.02	0.00	-0.38	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.02	0.00
8	0.04	-0.02	-0.01	0.00	-0.27	0.00	0.04	-0.01	0.00	0.00	-0.30	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.04	0.00
9	0.04	-0.01	0.17	0.00	-0.28	0.00	0.04	-0.01	0.16	0.00	-0.31	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00
Sección eje 27: apoyo fijo																		
1	0.02	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.01
8	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.01	0.00





MODELOS ALTERNATIVOS: SIMPLIFICADO

Variación ángulo de inclinación del arco

Se elaboraron cuatro modelos adicionales, variando el ángulo de inclinación del arco respecto a la horizontal:

1. Modelo con arco perpendicular al tablero
2. Modelo con arco inclinado a 70° —original—
3. Modelo con arco inclinado a 50°
4. Modelo con arco inclinado a 30°
5. Modelo con arco inclinado a 10°

Deformaciones resultantes

En valores absolutos, la inclinación del arco es proporcional a la deformación del puente, siendo la mejor opción el arco perpendicular al tablero. Sin embargo, en magnitudes relativas, la inclinación del arco disminuye proporcionalmente la deformación del extremo volado del tablero (lámina VA.D_6, 7, 8 y 9).

Eje X :

El incremento de la inclinación del arco es directamente proporcional al incremento de las deformaciones en todos los puntos. En decir, la mejor opción para este eje es un arco perpendicular a la plataforma.

Eje Y:

Este eje experimenta mejora en el comportamiento estructural a medida que se inclina el arco, alcanzando su posición óptima a los 30° , con ángulos menores la deformación empieza a incrementar.

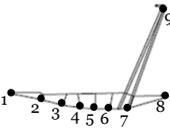
Eje Z:

En este eje las mejores posiciones del arco son a 70° y a 90° . A partir de los 70° para abajo, las deformaciones aumentan exponencialmente.

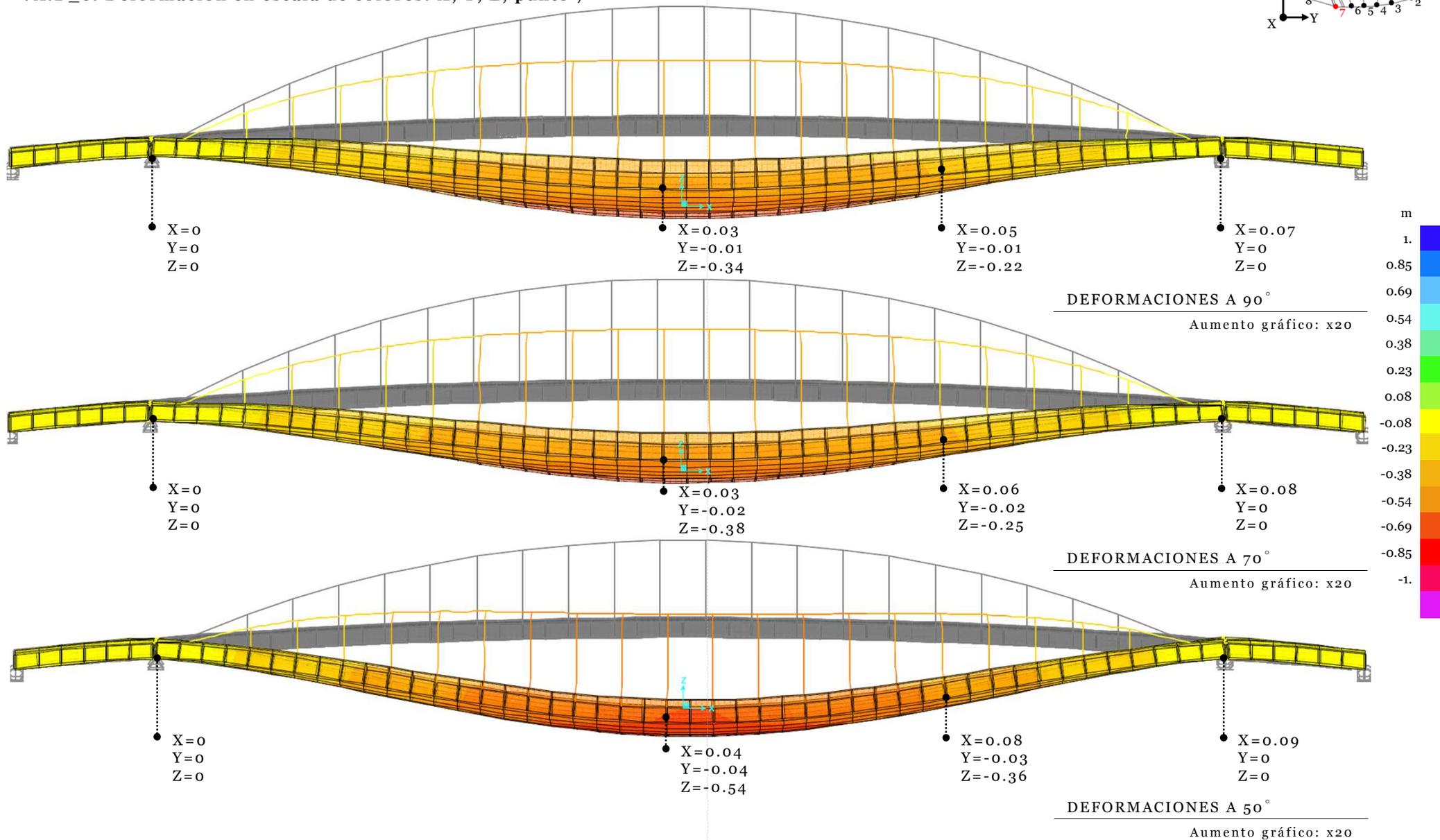
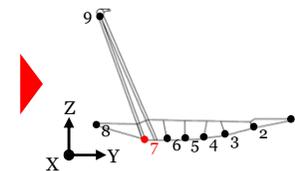
Del estudio, se puede afirmar que de las opciones inclinadas, la mejor es la original a 70° , esta presenta deformaciones similares a las del modelo óptimo -90° – e incluso deformaciones considerablemente menores en los ejes Y y Z –véase abajo, cifras resaltadas en rojo–.

Tabla 5: Comparación entre los dos modelos con menor deformación: arco perpendicular a tablero y arco inclinado a 70°

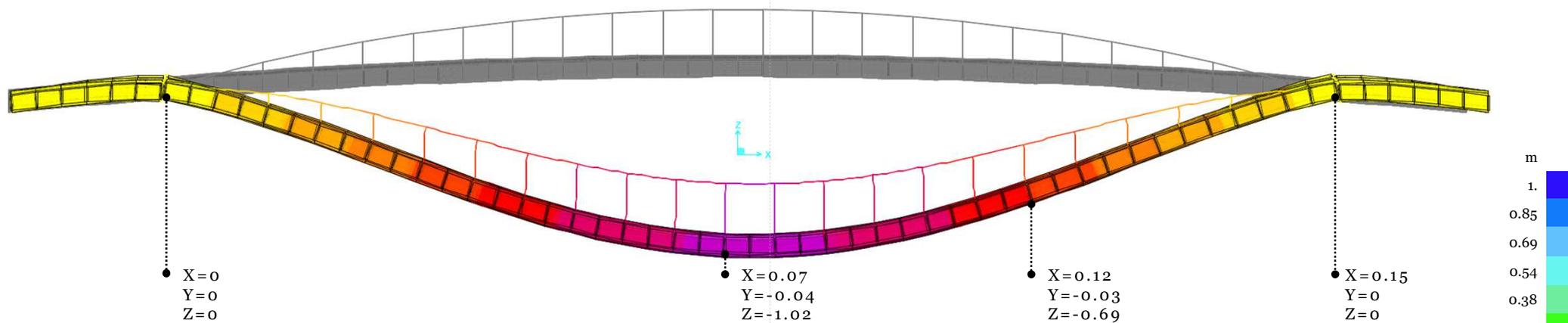
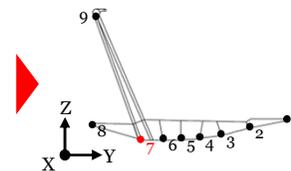
	Variación	Deformación			
		1	7	8	9
	$^\circ$	m	m	m	m
Eje X	90	0.036	0.033	0.035	0.037
	70	0.039	0.035	0.036	0.040
	Diferencia	0.003	0.002	0.001	0.003
	90	0.032	-0.005	0.024	0.236
Eje Y	70	0.008	-0.024	0.000	0.157
	Diferencia	0.024	0.019	0.023	0.079
	90	-0.640	-0.343	-0.251	-0.330
Eje Z	70	-0.636	-0.382	-0.304	-0.314
	Diferencia	0.003	0.039	0.053	0.016



VA.D_6. Deformación en escala de colores: X, Y, Z; punto 7

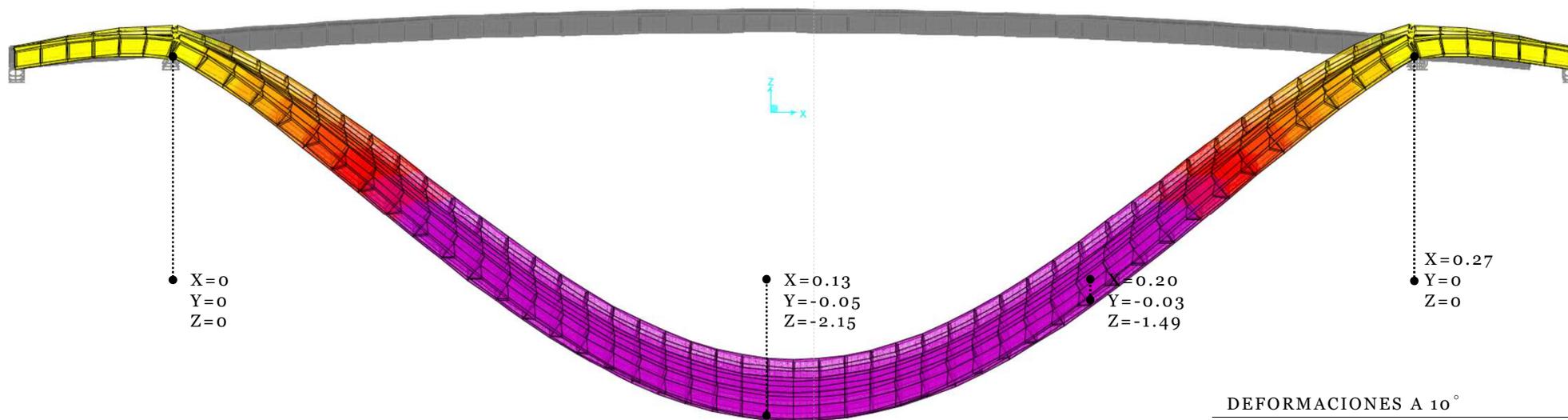
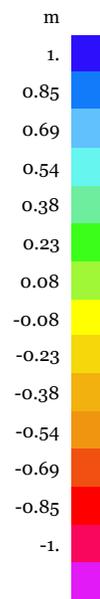


VA.D_6. Deformación en escala de colores: X, Y, Z; punto 7



DEFORMACIONES A 30°

Aumento gráfico: x20



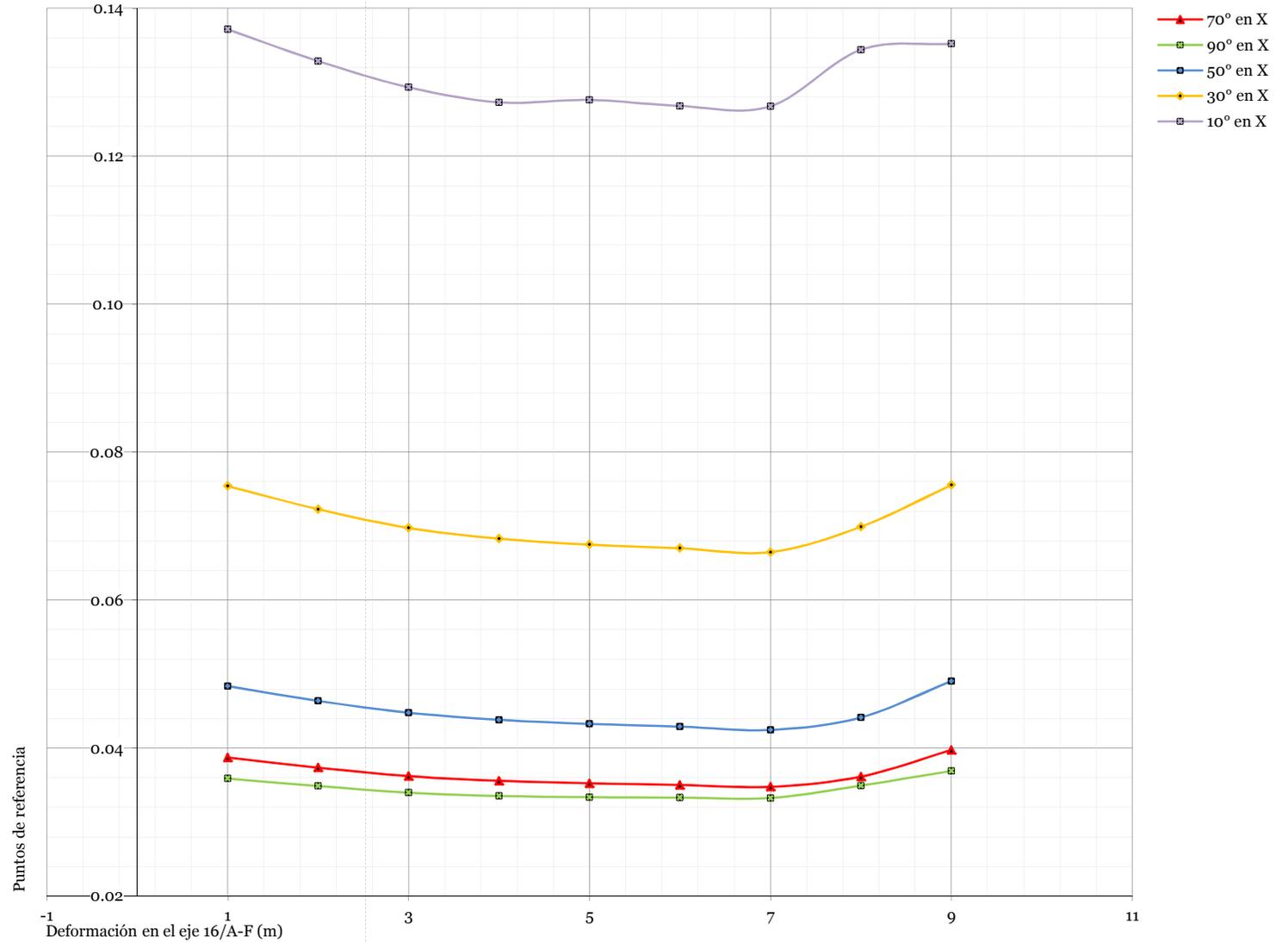
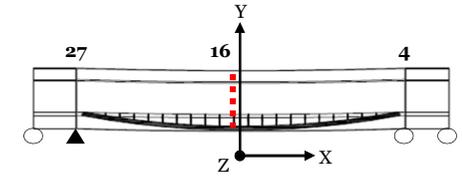
DEFORMACIONES A 10°

Aumento gráfico: x20

VA.D_7. Deformación en plano cartesiano

Tabla 6: Deformación horizontal X de modelos con variación de inclinación de arco, eje 16

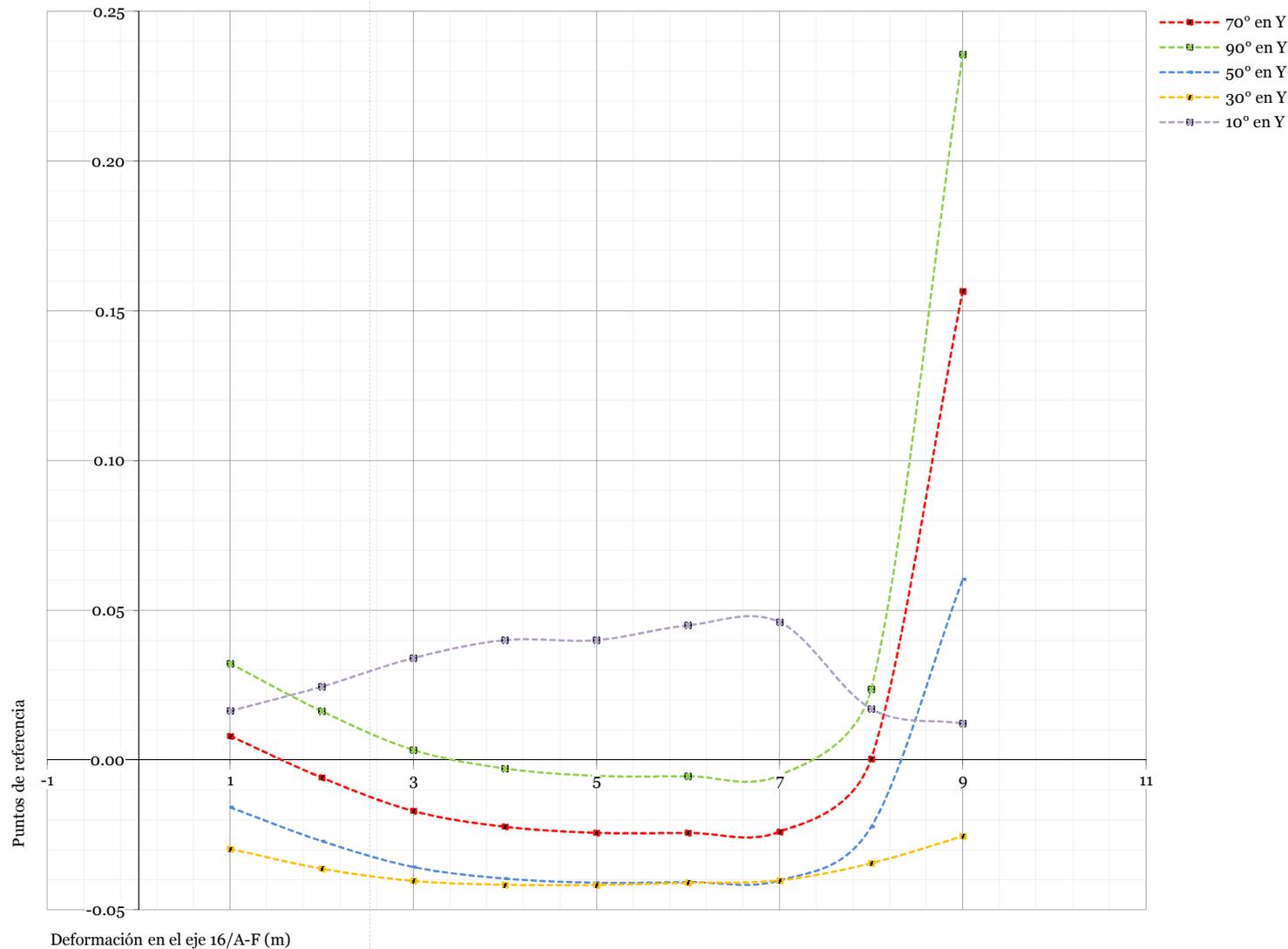
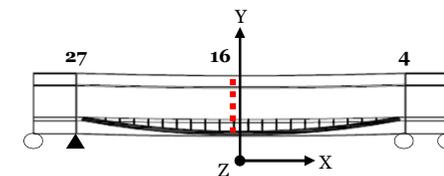
Ref.	70°	90°	50°	30°	10°
	x	x	x	x	x
	m	m	m	m	m
	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.
Sección eje 16					
1	0.04	0.04	0.05	0.08	0.14
2	0.04	0.03	0.05	0.07	0.13
3	0.04	0.03	0.04	0.07	0.13
4	0.04	0.03	0.04	0.07	0.13
5	0.04	0.03	0.04	0.07	0.13
6	0.04	0.03	0.04	0.07	0.13
7	0.03	0.03	0.04	0.07	0.13
8	0.04	0.03	0.04	0.07	0.13
9	0.04	0.04	0.05	0.08	0.14



VA.D_7. Deformación en plano cartesiano

Tabla 7: Deformación horizontal Y de modelos con variación de inclinación de arco, eje 16

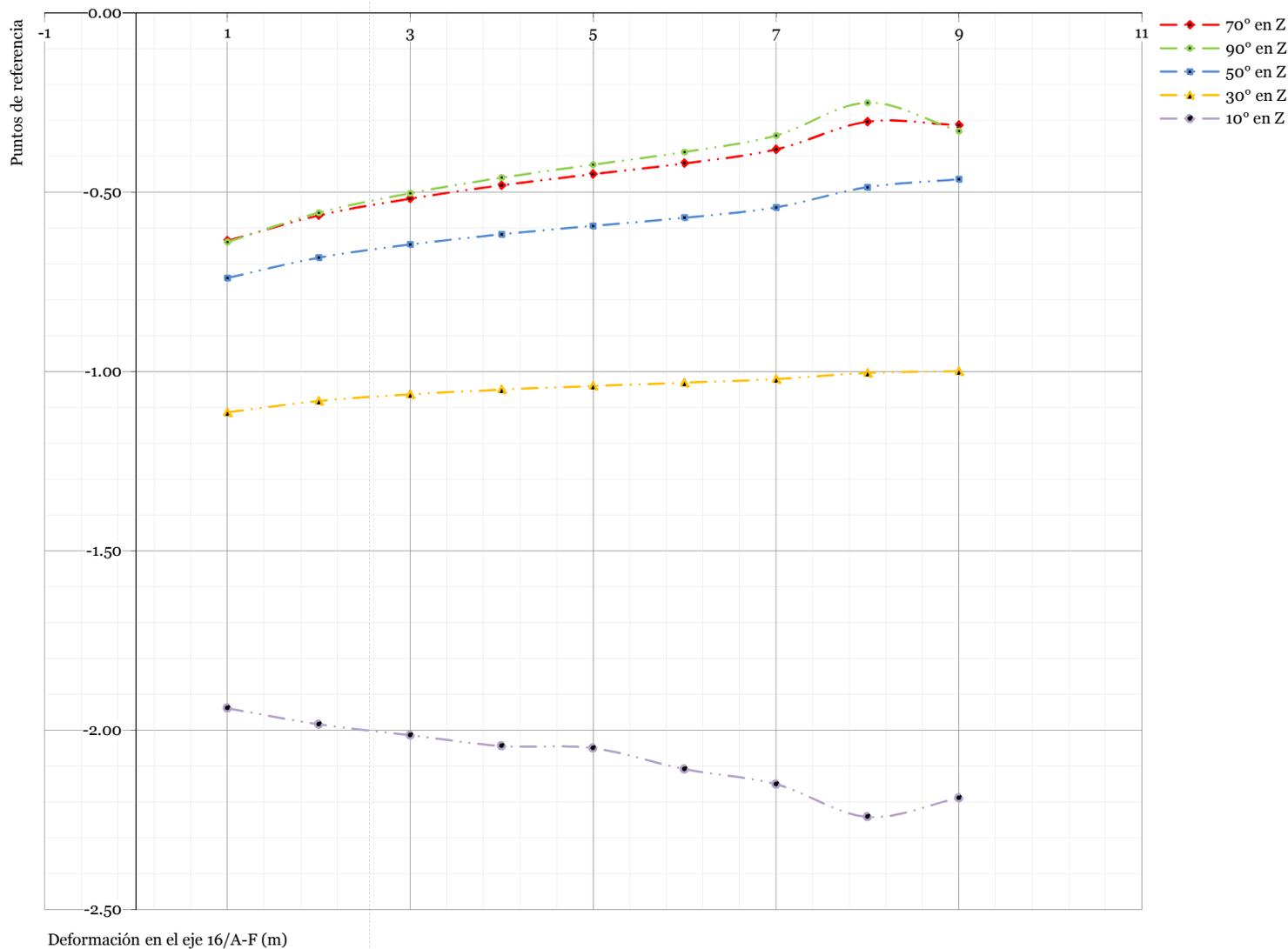
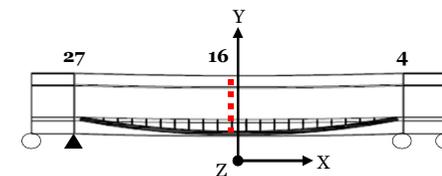
Ref.	70°	90°	50°	30°	10°
	y	y	y	y	y
	m	m	m	m	m
	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.
Sección eje 16					
1	0.01	0.03	-0.02	-0.03	0.02
2	-0.01	0.02	-0.03	-0.04	0.02
3	-0.02	0.00	-0.04	-0.04	0.03
4	-0.02	0.00	-0.04	-0.04	0.04
5	-0.02	-0.01	-0.04	-0.04	0.04
6	-0.02	-0.01	-0.04	-0.04	0.04
7	-0.02	-0.01	-0.04	-0.04	0.05
8	0.00	0.02	-0.02	-0.03	0.02
9	0.16	0.24	0.06	-0.03	0.01



VA.D_7. Deformación en plano cartesiano

Tabla 8: Deformación vertical Z de modelos con variación de inclinación de arco, eje 16

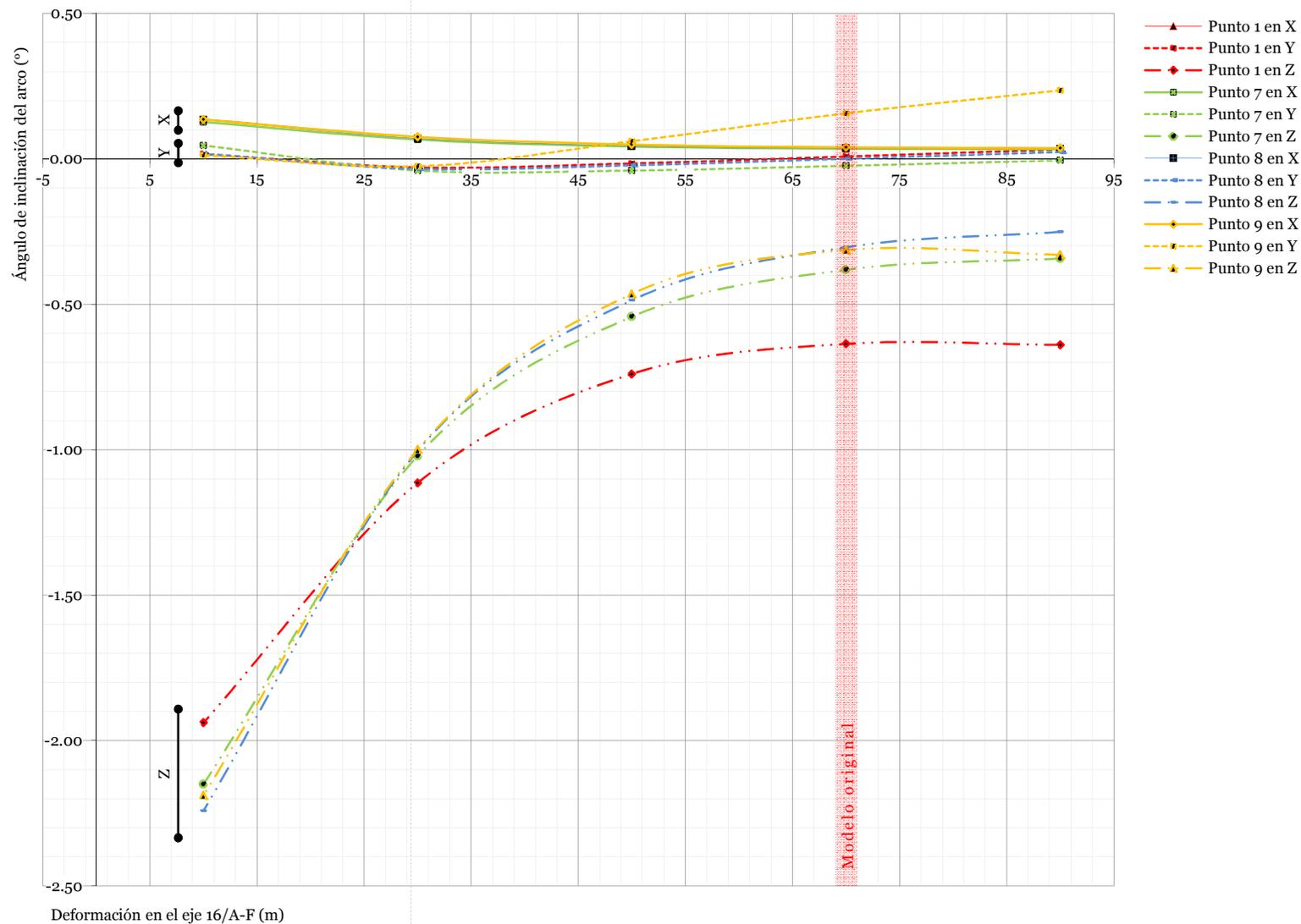
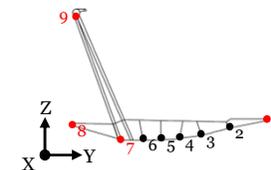
Ref.	70°	90°	50°	30°	10°
	Z	Z	Z	Z	Z
	m	m	m	m	m
	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.
Sección eje 16					
1	-0.64	-0.64	-0.74	-1.11	-1.94
2	-0.57	-0.56	-0.68	-1.08	-1.98
3	-0.52	-0.50	-0.65	-1.06	-2.01
4	-0.48	-0.46	-0.62	-1.05	-2.04
5	-0.45	-0.42	-0.59	-1.04	-2.05
6	-0.42	-0.39	-0.57	-1.03	-2.11
7	-0.38	-0.34	-0.54	-1.02	-2.15
8	-0.30	-0.25	-0.49	-1.00	-2.24
9	-0.31	-0.33	-0.46	-1.00	-2.19



VA.D_8. Línea de tendencia de la deformación

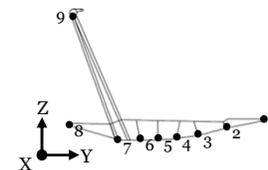
Tabla 9: Deformación de modelos con variación de inclinación de arco, eje 16

Variación	Deformación			
	1	7	8	9
°	m	m	m	m
Eje X				
90	0.036	0.033	0.035	0.037
70	0.039	0.035	0.036	0.040
50	0.048	0.042	0.044	0.049
30	0.075	0.066	0.070	0.076
10	0.137	0.127	0.134	0.135
Eje Y				
90	0.032	-0.005	0.024	0.236
70	0.008	-0.024	0.000	0.157
50	-0.016	-0.040	-0.022	0.060
30	-0.030	-0.040	-0.034	-0.025
10	0.016	0.046	0.017	0.012
Eje: Z				
90	-0.640	-0.343	-0.251	-0.330
70	-0.636	-0.382	-0.304	-0.314
50	-0.740	-0.543	-0.487	-0.464
30	-1.114	-1.021	-1.004	-1.000
10	-1.939	-2.151	-2.242	-2.189

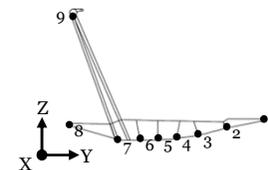


VA.D_9. Cuadro de deformaciones

Tabla 10: Deformación y rotación de modelos con distinto grado de inclinación de arco



Ref.	Arco inclinado a 70°						Arco inclinado a 90°						Arco inclinado a 50°						Arco inclinado a 30°						Arco inclinado a 10°					
	x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z	
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección eje 4: apoyo deslizante																														
1	0.06	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	-0.01	0.02	0.00	0.23	0.01	-0.01	-0.02	0.05	-0.01
2	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.24	0.01	0.00	-0.02	0.02	0.00
3	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00
4	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
5	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	-0.04	0.00	0.00
6	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00
7	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
8	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.13	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.22	0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.01
Sección eje 10																														
1	0.03	-0.01	0.00	-0.01	-0.44	0.00	0.03	-0.01	0.02	-0.01	-0.45	0.00	0.04	-0.01	-0.01	-0.01	-0.51	0.00	0.06	0.00	-0.03	-0.02	-0.75	0.00	0.14	0.01	0.00	-0.04	-1.26	0.00
2	0.04	-0.01	-0.01	-0.01	-0.39	0.00	0.04	-0.01	0.01	-0.01	-0.39	0.00	0.05	-0.01	-0.02	-0.01	-0.46	0.00	0.08	0.00	-0.03	-0.02	-0.73	0.00	0.16	0.01	0.01	-0.04	-1.31	0.00
3	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.35	0.00	0.05	-0.01	0.00	-0.01	-0.35	0.00	0.06	-0.01	-0.03	-0.01	-0.44	0.00	0.10	0.00	-0.03	-0.02	-0.72	0.00	0.19	0.01	0.02	-0.04	-1.36	0.00
4	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.32	0.00	0.05	-0.01	0.00	-0.01	-0.31	0.00	0.07	-0.01	-0.03	-0.01	-0.42	0.00	0.11	0.00	0.00	-0.02	-0.71	0.00	0.20	0.01	0.03	-0.03	-1.39	0.00
5	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.30	0.00	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.28	0.00	0.07	-0.01	-0.03	-0.01	-0.40	0.00	0.11	0.00	-0.03	-0.02	-0.70	0.00	0.20	0.01	0.03	-0.04	-1.42	0.00
6	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.28	0.00	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.26	0.00	0.07	-0.01	-0.03	-0.01	-0.38	0.00	0.12	0.00	-0.03	-0.02	-0.70	0.00	0.20	0.01	0.03	-0.04	-1.44	0.00
7	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.25	0.00	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.22	0.00	0.08	-0.01	-0.03	-0.01	-0.36	0.00	0.12	0.00	-0.03	-0.02	-0.69	0.00	0.20	0.01	0.03	-0.04	-1.49	0.00
8	0.05	-0.01	0.00	-0.01	-0.19	0.00	0.04	-0.01	0.02	-0.01	-0.15	0.00	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.32	0.00	0.08	0.00	-0.03	-0.02	-0.68	0.00	0.13	0.02	0.00	-0.04	-1.58	0.00
9	0.03	-0.01	0.09	-0.01	-0.21	0.00	0.02	-0.01	0.14	-0.01	-0.21	0.00	0.03	-0.01	0.03	-0.01	-0.31	0.00	0.06	0.00	-0.03	-0.02	-0.68	0.00	0.13	0.01	0.00	-0.04	-1.52	0.00



VA.D_9. Cuadro de deformaciones

Ref.	Arco inclinado a 70°						Arco inclinado a 90°						Arco inclinado a 50°						Arco inclinado a 30°						Arco inclinado a 10°					
	x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z	
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección eje 16																														
1	0.04	-0.02	0.01	0.00	-0.64	0.00	0.04	-0.02	0.03	0.00	-0.64	0.00	0.05	-0.01	-0.02	0.00	-0.74	0.00	0.08	-0.01	-0.03	0.00	-1.11	0.00	0.14	0.01	0.02	0.00	-1.94	0.00
2	0.04	-0.01	-0.01	0.00	-0.57	0.00	0.03	-0.02	0.02	0.00	-0.56	0.00	0.05	-0.01	-0.03	0.00	-0.68	0.00	0.07	-0.01	-0.04	0.00	-1.08	0.00	0.13	0.01	0.02	0.00	-1.98	0.00
3	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.52	0.00	0.03	-0.02	0.00	0.00	-0.50	0.00	0.04	-0.01	-0.04	0.00	-0.65	0.00	0.07	-0.01	-0.04	0.00	-1.06	0.00	0.13	0.01	0.03	0.00	-2.01	0.00
4	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.48	0.00	0.03	-0.02	0.00	0.00	-0.46	0.00	0.04	-0.01	-0.04	0.00	-0.62	0.00	0.07	0.00	-0.04	0.00	-1.05	0.00	0.13	0.01	0.04	0.00	-2.04	0.00
5	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.45	0.00	0.03	-0.02	-0.01	0.00	-0.42	0.00	0.04	-0.01	-0.04	0.00	-0.59	0.00	0.07	0.00	-0.04	0.00	-1.04	0.00	0.13	0.01	0.04	0.00	-2.05	0.00
6	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.42	0.00	0.03	-0.02	-0.01	0.00	-0.39	0.00	0.04	-0.01	-0.04	0.00	-0.57	0.00	0.07	0.00	-0.04	0.00	-1.03	0.00	0.13	0.01	0.04	0.00	-2.11	0.00
7	0.03	-0.01	-0.02	0.00	-0.38	0.00	0.03	-0.02	-0.01	0.00	-0.34	0.00	0.04	-0.01	-0.04	0.00	-0.54	0.00	0.07	0.00	-0.04	0.00	-1.02	0.00	0.13	0.01	0.05	0.00	-2.15	0.00
8	0.04	-0.01	0.00	0.00	-0.30	0.00	0.03	-0.02	0.02	0.00	-0.25	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.49	0.00	0.07	0.00	-0.03	0.00	-1.00	0.00	0.13	0.02	0.02	0.00	-2.24	0.00
9	0.04	-0.01	0.16	0.00	-0.31	0.00	0.04	-0.01	0.24	0.00	-0.33	0.00	0.05	-0.01	0.06	0.00	-0.46	0.00	0.08	0.00	-0.03	0.00	-1.00	0.00	0.14	0.02	0.01	0.00	-2.19	0.00
Sección eje 27: apoyo fijo																														
1	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.02	0.04	0.01
2	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00
8	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.05	0.01	0.00	0.02	-0.02	0.01

Esfuerzos resultantes

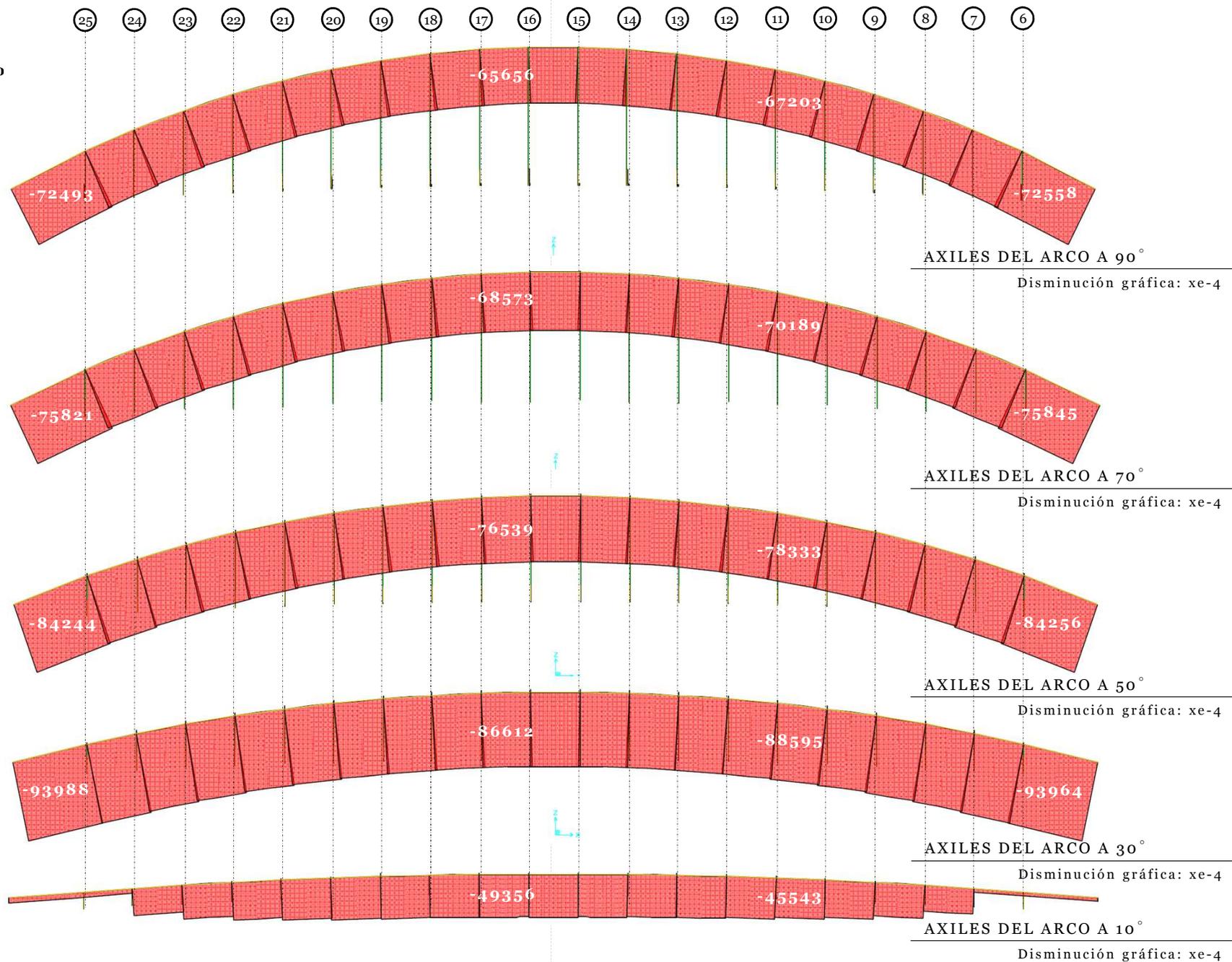
Se analizó la variación de los esfuerzos en el arco, a las diferentes inclinaciones, a fin de entender el comportamiento de la deformación.

La principal fuerza que actúa sobre el arco, es el axil a compresión. Dicho axil aumenta proporcionalmente a la inclinación del arco, corroborando lo que se interpretó en el análisis de las deformaciones: a menor altura de celosía, mayores fuerzas axiles.

Sin embargo, partir de los 30° aproximadamente, la celosía presenta una disminución considerable de las fuerzas a compresión, este fenómeno se debe a la pérdida total de inercia por la excesiva disminución de la altura efectiva, de ahí que el elemento deje de trabajar y los axiles disminuyan radicalmente. A 10° los axiles disminuyen un 50% respecto de la variación más cercana, el modelo de 30° de inclinación (tabla 12).

Según el análisis de fuerzas, la mejor posición del arco es la perpendicular al tablero, dado que presenta los menores axiles y por tanto las menores deformaciones (láminas VA.D_8 y VA.E_12).

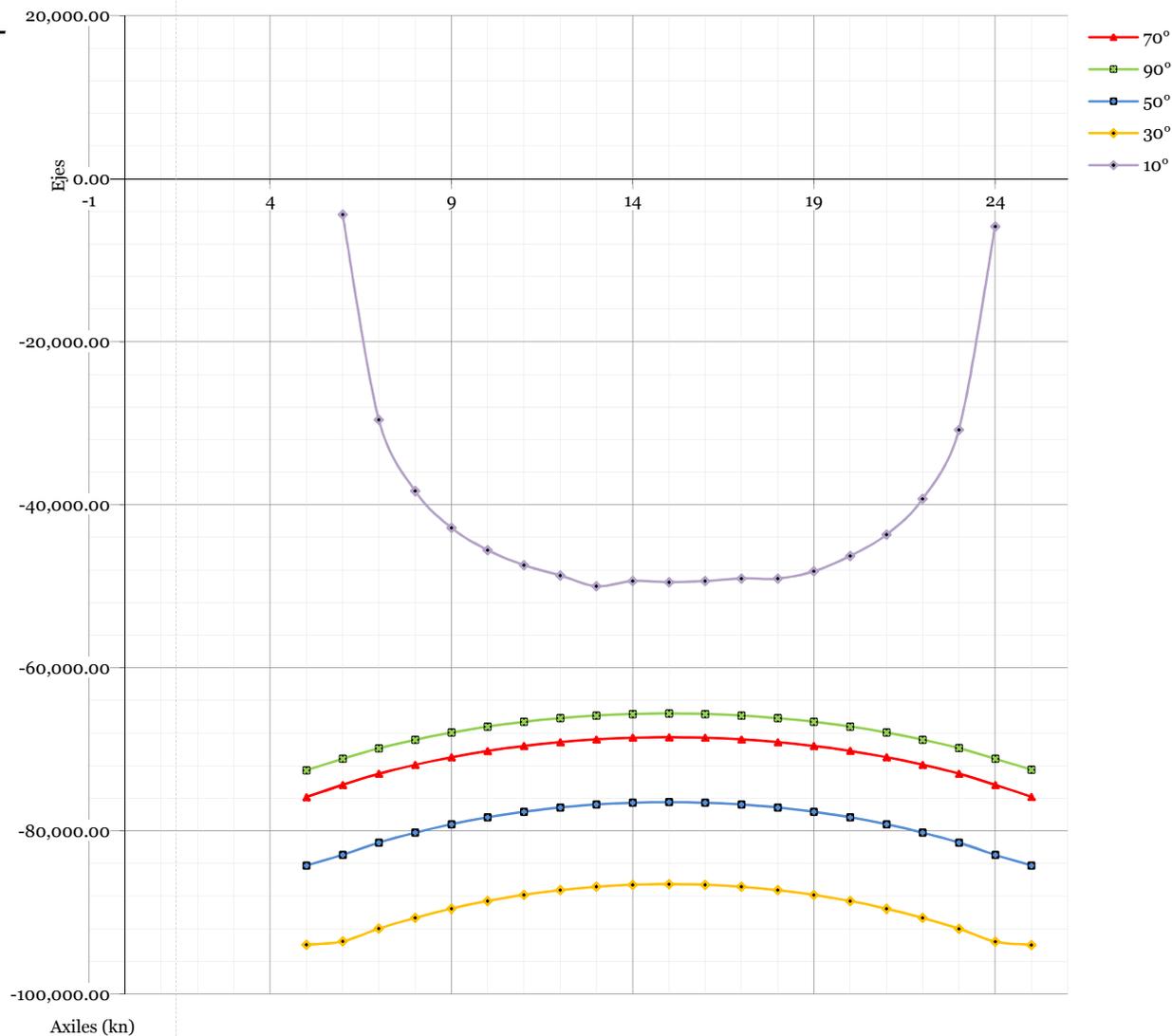
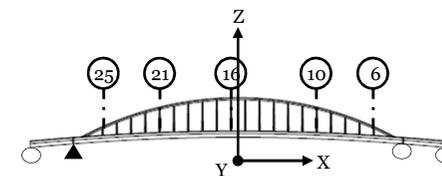
VA.E_10. Gráfico



VA.E_11. Axiles en el plano cartesiano

Tabla 11: Axiles de arcos con distinto grado de inclinación

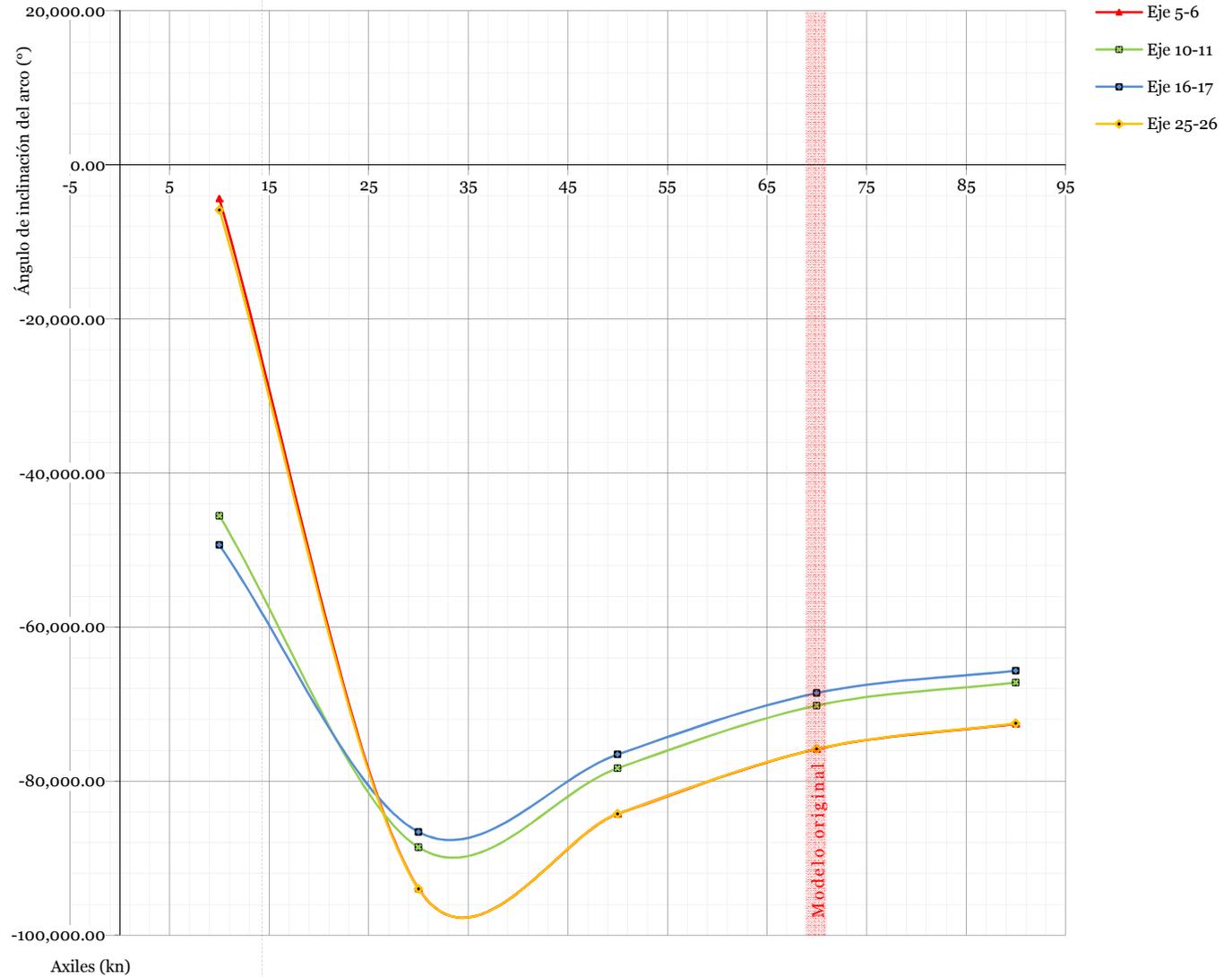
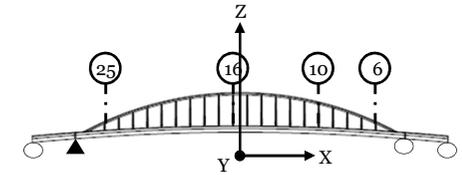
Eje	70°	90°	50°	30°	10°
	kn	kn	kn	kn	kn
5	-75844.89	-72557.70	-84256.27	-93963.76	
6	-74349.74	-71159.53	-82930.14	-93549.38	-4383.37
7	-72987.02	-69870.27	-81437.43	-91988.24	-29579.95
8	-71891.84	-68827.64	-80222.43	-90670.26	-38280.76
9	-70959.37	-67938.03	-79187.01	-89536.17	-42810.83
10	-70189.08	-67203.43	-78332.57	-88594.69	-45543.10
11	-69574.50	-66615.44	-77649.18	-87839.31	-47389.80
12	-69103.87	-66165.81	-77127.21	-87261.51	-48653.40
13	-68772.18	-65848.01	-76758.99	-86853.90	-49982.85
14	-68573.48	-65657.26	-76538.97	-86610.92	-49343.11
15	-68504.75	-65590.77	-76463.86	-86529.18	-49477.19
16	-68572.82	-65655.64	-76538.79	-86611.64	-49356.20
17	-68771.11	-65844.92	-76758.77	-86855.42	-49030.44
18	-69102.57	-66160.87	-77126.70	-87263.71	-49039.78
19	-69571.88	-66608.36	-77648.27	-87842.21	-48150.71
20	-70186.59	-67193.85	-78331.16	-88598.39	-46267.39
21	-70954.52	-67925.45	-79185.00	-89540.92	-43657.08
22	-71885.54	-68811.28	-80219.64	-90676.45	-39263.58
23	-72979.53	-69848.13	-81432.35	-91994.82	-30782.70
24	-74355.43	-71142.09	-82939.11	-93574.76	-5842.68
25	-75821.01	-72493.41	-84244.32	-93987.84	



VA.E_12. Línea de tendencia de axiles

Tabla 12: Comparación transversales de axiles de arco con distinto grado de inclinación

Variación	Axiles			
	5-6	10-11	16-17	25-26
°	kn	kn	kn	kn
90	-72557.70	-67203.43	-65655.64	-72493.41
70	-75844.89	-70189.08	-68572.82	-75821.01
50	-84256.27	-78332.57	-76538.79	-84244.32
30	-93963.76	-88594.69	-86611.64	-93987.84
10	-4383.37	-45543.10	-49356.20	-5842.68



Causas del comportamiento estructural

Como ya se estableció anteriormente, al arco es una *celosía de canto variable adaptada a la ley de esfuerzos*, la cual trabaja a flexión.

Para entender las causas del comportamiento estructural de la celosía, se deben tener presentes las siguientes relaciones de proporcionalidad:

$$M \propto L^2$$

$$M \propto H$$

$$F \propto L^4$$

$$F \propto 1/I$$

Donde:

M: momento

L: luz libre entre apoyos

H: canto de celosía

F: flecha

I: momento de inercia

Como vemos, las magnitudes dominantes del comportamiento estructural de la celosía son, por orden de importancia:

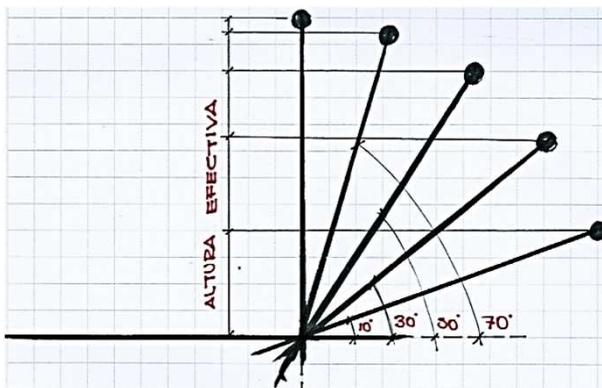
1. Luz libre entre apoyos
2. Inercia de la celosía
3. Canto de la celosía

La más determinante, la luz —134 m— no se toma en cuenta, ya que es una magnitud constante para entender el comportamiento del arco inclinado. Por tanto, la línea de tendencia de deformación y esfuerzos depende del canto de la celosía y del momento de inercia —el cual también es directamente proporcional al canto—.

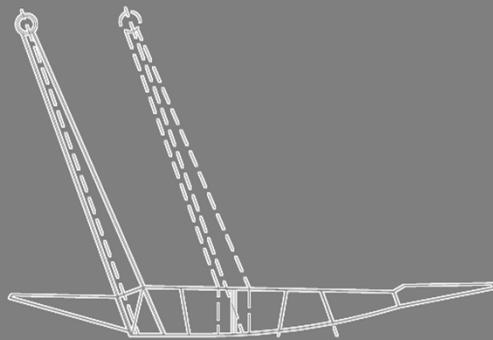
Veamos ahora, a medida que disminuimos el ángulo con la horizontal (fig. 6), también disminuimos la altura efectiva de la celosía, disminuyendo la inercia de la misma, lo cual se evidencia en el aumento de la deformación (lámina VA.D_8).

Por otro lado, la disminución de la altura efectiva incrementa las fuerzas en los cordones superiores e inferiores, esto podemos verificarlo fácilmente con la línea de tendencia de los axiles a compresión del cordón superior (lámina VA.E_12).

Concluimos que los esfuerzos de torsión generados por el arco inclinado no compensan el aumento de los axiles, por disminución de la altura efectiva.



6. Esquema de reducción de altura efectiva por inclinación de la celosía.



Variación posición del arco respecto al eje

Se elaboró un modelo adicional, cuya variante es la posición central del arco:

1. Arco lateral –original–
2. Arco centrado

Cabe destacar que, además de la posición del arco, no se ha modificado ningún otro elemento de la sección transversal del puente.

Deformaciones resultantes

El alejar el arco del eje del puente, no mejora el comportamiento estructural, por el contrario, las deformaciones sufren drásticas variaciones a medida que el arco se aleja del eje. Por tanto, la mejor opción es un arco centrado.

Cabe destacar que las mejoras obtenidas son resultado de solo mover el arco, se presume que el comportamiento mejoraría aún más, si el tablero fuera simétrico y el arco, perpendicular.

Eje X:

No presenta variaciones considerables.

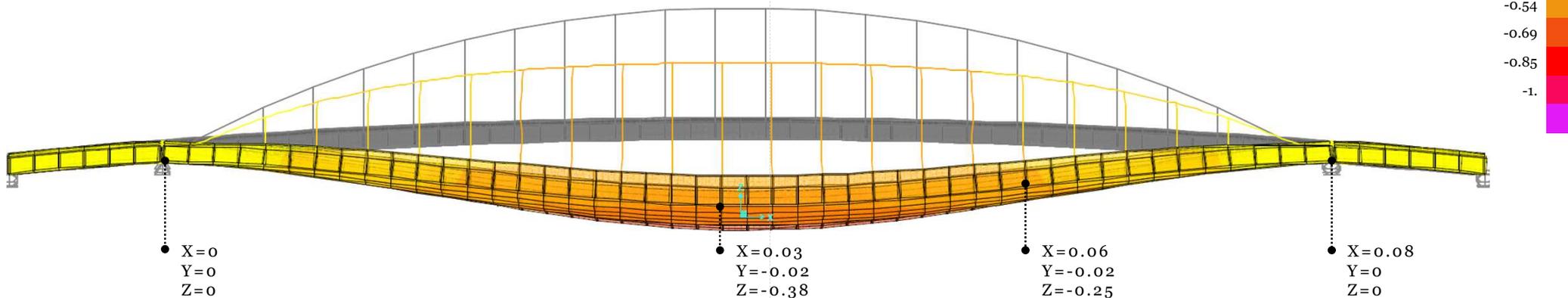
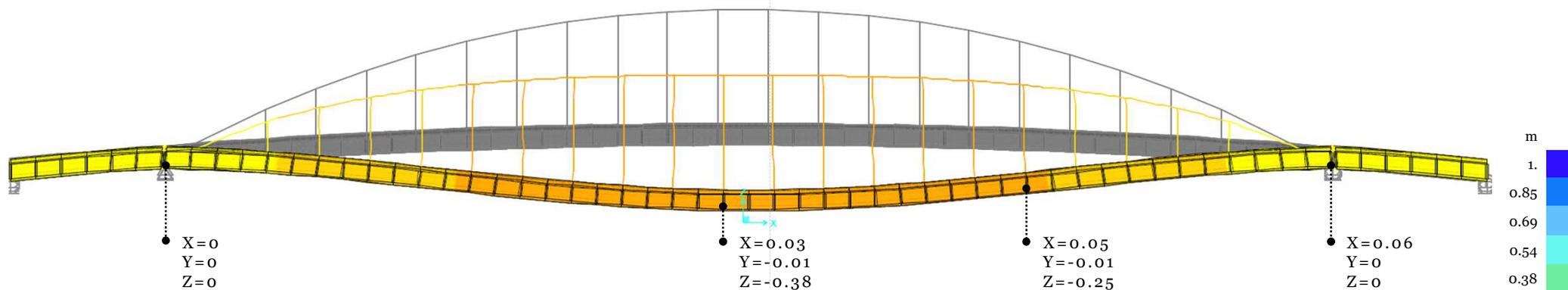
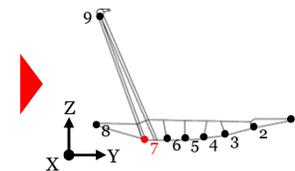
Eje Y:

No presenta variaciones considerables a excepción del arco, cuya deformación se incrementa a medida que este se aleja del eje del puente. En decir, la mejor opción para este eje es un arco centrado.

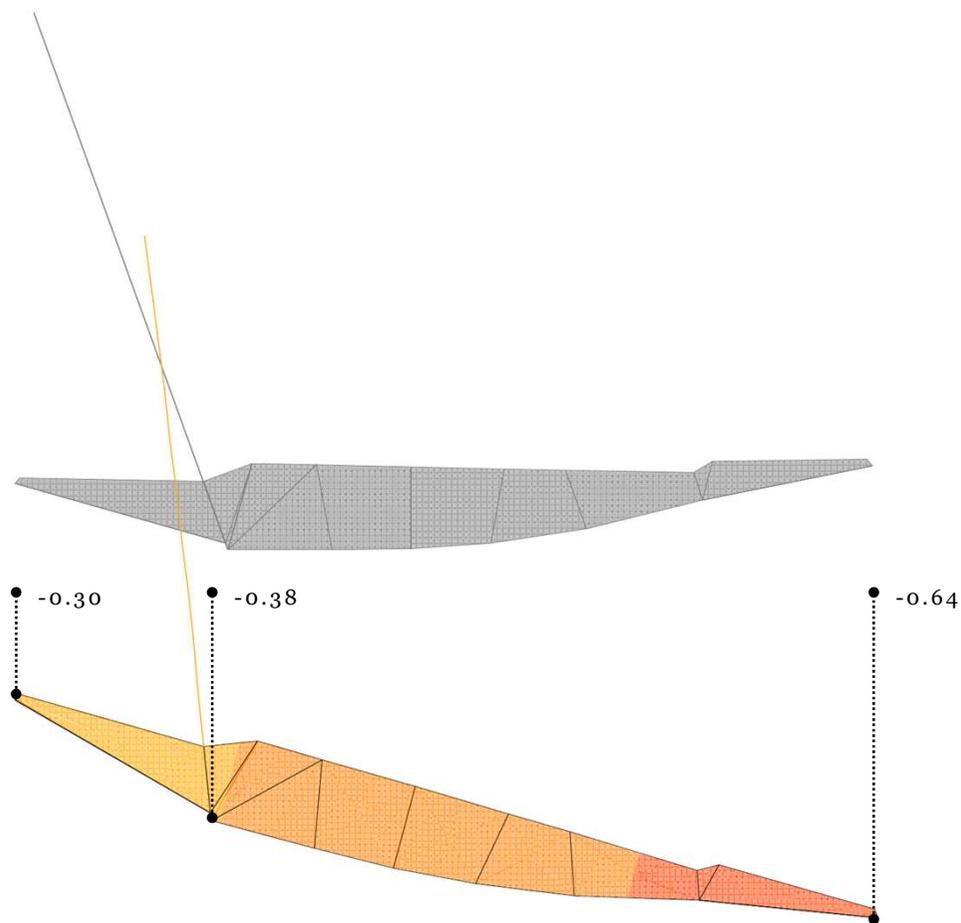
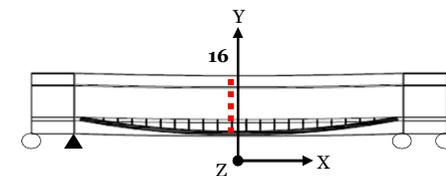
Eje Z:

El incremento de la distancia del arco respecto del eje, genera un amplio rango de deformaciones en una misma sección, por ejemplo en el eje 16 –eje de mayor deformación– va desde -0.30 hasta -0.64 m. Mientras que con el arco centrado las deformaciones se homogenizan y se mantienen entre -0.37 y -0.39 m. Por tanto, la mejor opción para este eje, es un arco centrado.

VP.D_13. Deformación en escala de colores: X, Y, Z; punto 7

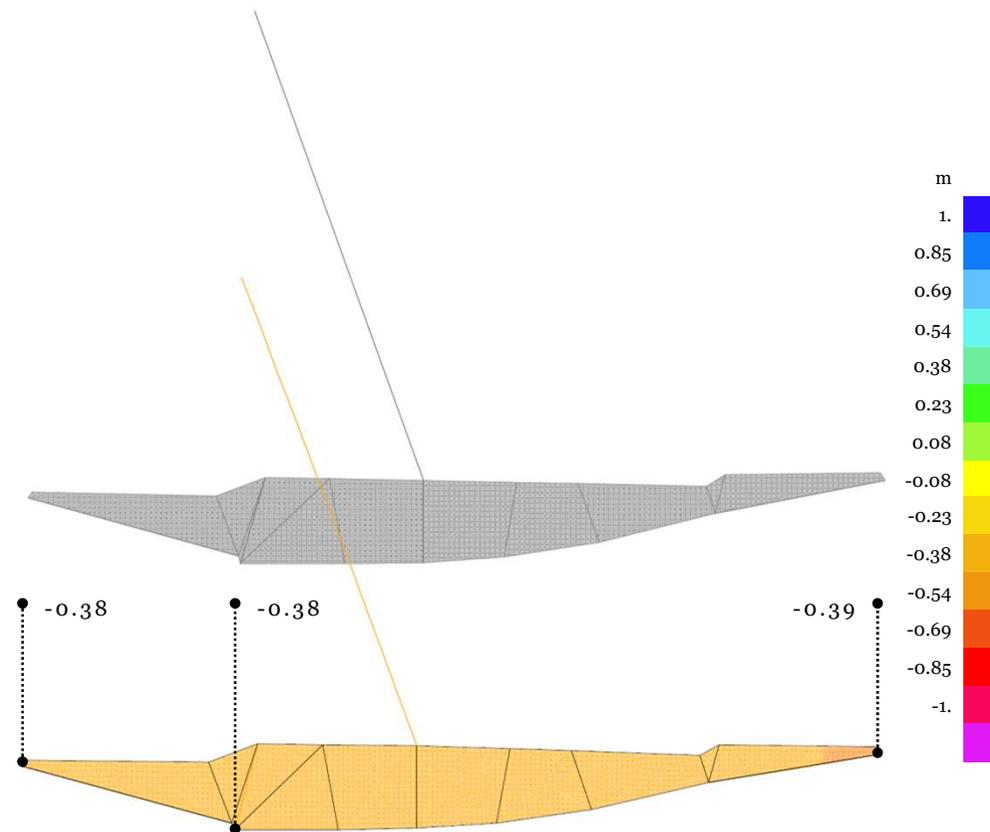


VP.D_13. Deformación en escala de colores: Z; eje 16



DEFORMACIONES CON ARCO LATERAL

Aumento gráfico: x20



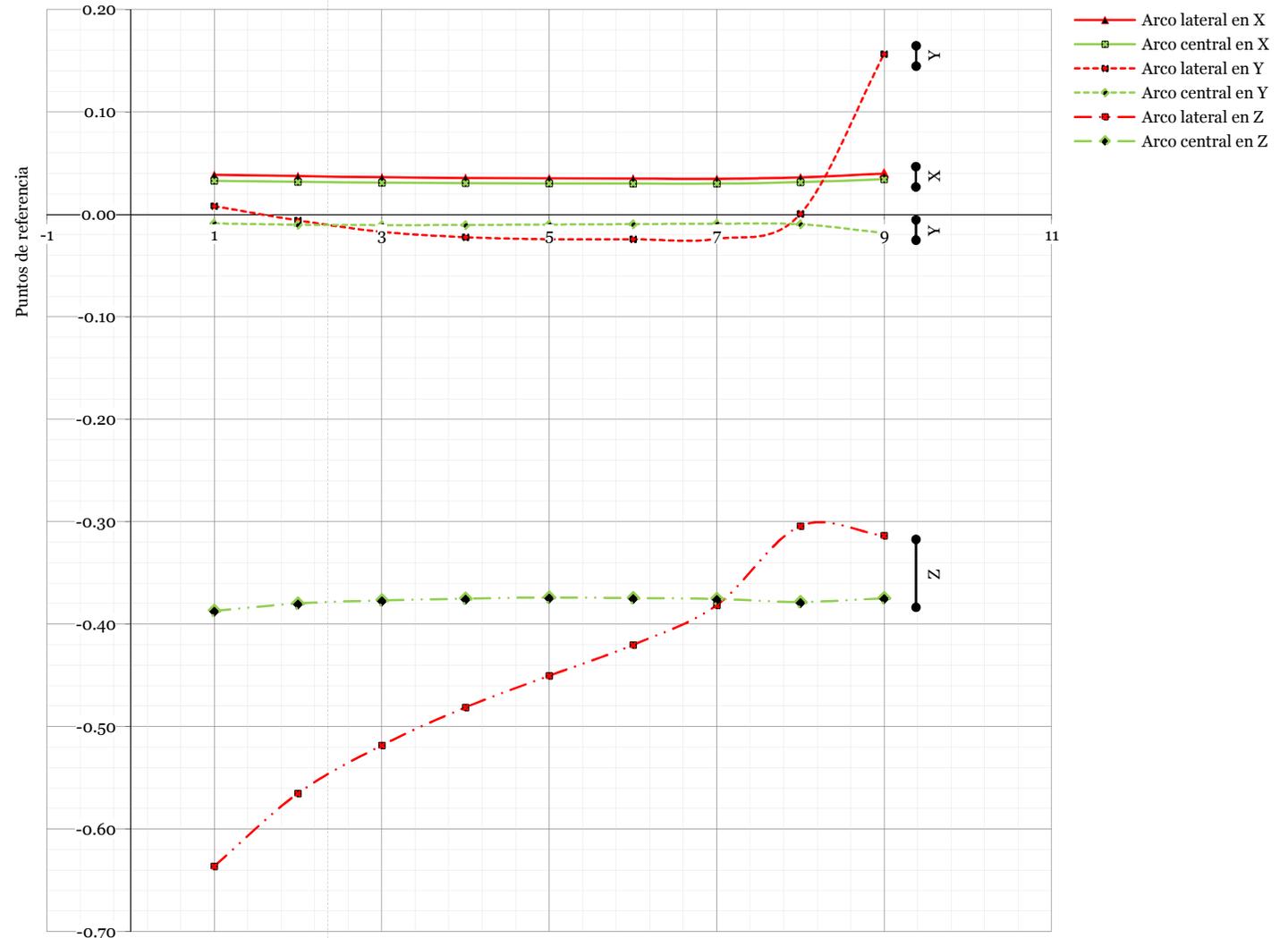
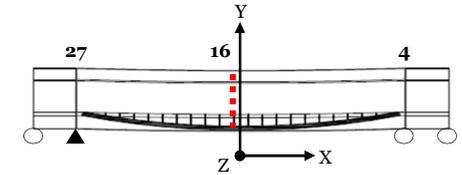
DEFORMACIONES CON ARCO CENTRAL

Aumento gráfico: x20

VP.D_14. Deformación en plano cartesiano

Tabla 13: Deformación transversal de modelos con distinta posición de arco, eje 16

Ref.	Arco lateral			Arco centrado		
	x	y	z	x	y	z
	m	m	m	m	m	m
	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.
Sección eje 16						
1	0.04	0.01	-0.64	0.03	-0.01	-0.39
2	0.04	-0.01	-0.57	0.03	-0.01	-0.38
3	0.04	-0.02	-0.52	0.03	-0.01	-0.38
4	0.04	-0.02	-0.48	0.03	-0.01	-0.38
5	0.04	-0.02	-0.45	0.03	-0.01	-0.37
6	0.04	-0.02	-0.42	0.03	-0.01	-0.37
7	0.03	-0.02	-0.38	0.03	-0.01	-0.38
8	0.04	0.00	-0.30	0.03	-0.01	-0.38
9	0.04	0.16	-0.31	0.03	-0.02	-0.37

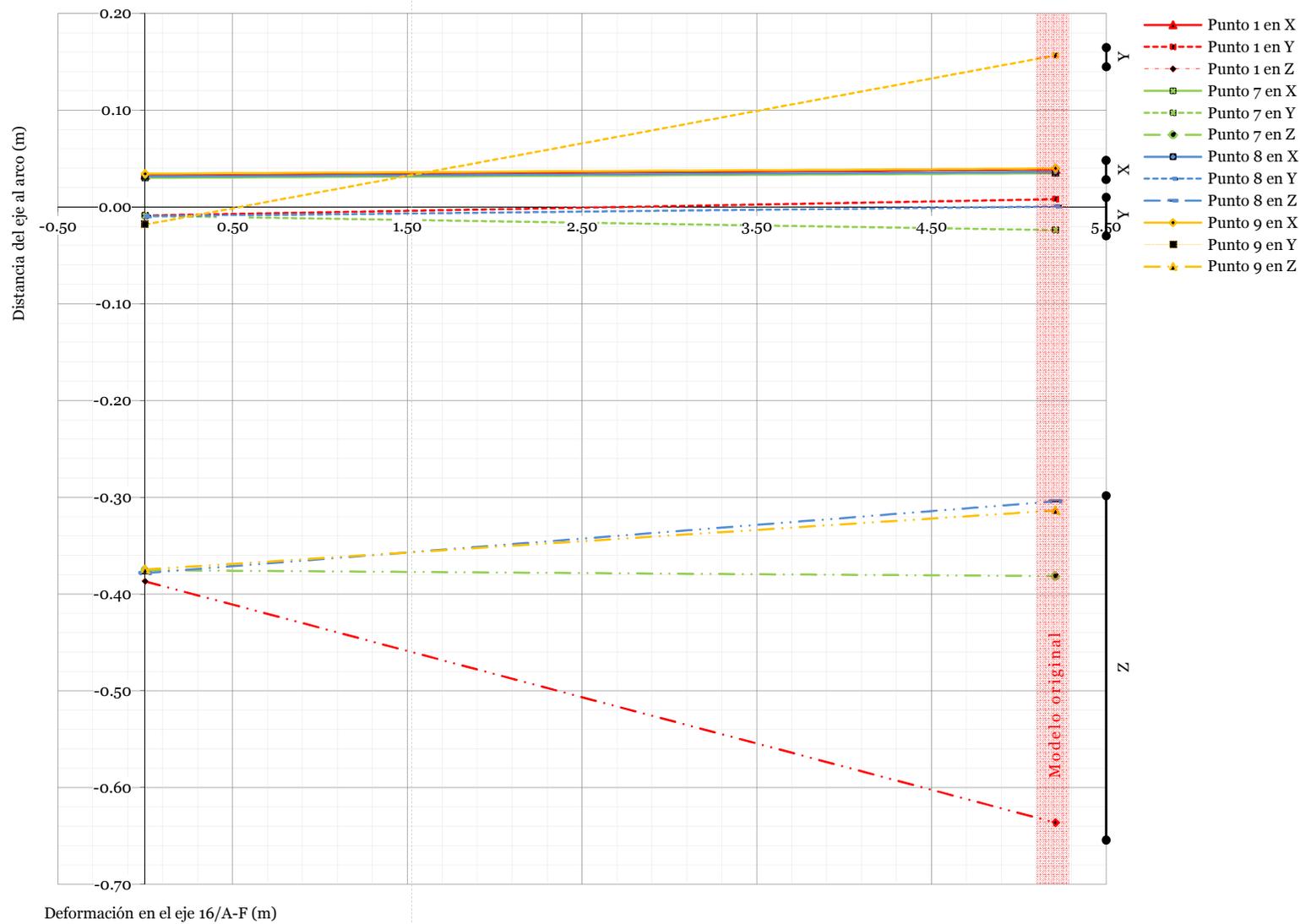
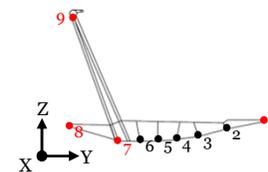


Deformación en el eje 16/A-F (m)

VP.D_15. Línea de tendencia de la deformación

Tabla 14: Comparación transversal de deformaciones de modelos con distinta posición de arco, eje 16

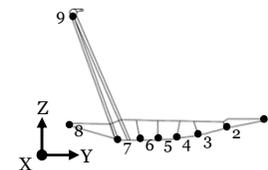
Variación	Deformación			
	1	7	8	9
°	m	m	m	m
Eje X				
0.00	0.033	0.030	0.031	0.034
5.21	0.039	0.035	0.036	0.040
Eje Y				
0.00	-0.009	-0.009	-0.010	-0.018
5.21	0.008	-0.024	0.000	0.157
Eje Z				
0.00	-0.387	-0.375	-0.378	-0.375
5.21	-0.636	-0.382	-0.304	-0.314



VP.D_16. Cuadro de deformaciones

Tabla 15: Deformación y rotación de modelos con distinta posición de arco

Ref.	Arco lateral						Arco centrado					
	x		y		z		x		y		z	
	m		m		m		m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección eje 4: apoyo deslizante												
1	0.06	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
3	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
4	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
6	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
7	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
8	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sección eje 10												
1	0.03	-0.01	0.00	-0.01	-0.44	0.00	0.03	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00
2	0.04	-0.01	-0.01	-0.01	-0.39	0.00	0.04	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00
3	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.35	0.00	0.05	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00
4	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.32	0.00	0.05	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00
5	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.30	0.00	0.05	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00
6	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.28	0.00	0.05	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00
7	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.25	0.00	0.05	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00
8	0.05	-0.01	0.00	-0.01	-0.19	0.00	0.04	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00
9	0.03	-0.01	0.09	-0.01	-0.21	0.00	0.02	0.00	-0.01	-0.01	-0.25	0.00



Ref.	Arco lateral						Arco centrado					
	x		y		z		x		y		z	
	m		m		m		m		m		m	
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección eje 16												
1	0.04	-0.02	0.01	0.00	-0.64	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.39	0.00
2	0.04	-0.01	-0.01	0.00	-0.57	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.38	0.00
3	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.52	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.38	0.00
4	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.48	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.38	0.00
5	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.45	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.37	0.00
6	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.42	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.37	0.00
7	0.03	-0.01	-0.02	0.00	-0.38	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.38	0.00
8	0.04	-0.01	0.00	0.00	-0.30	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.38	0.00
9	0.04	-0.01	0.16	0.00	-0.31	0.00	0.03	0.00	-0.02	0.00	-0.37	0.00
Sección eje 27: apoyo fijo												
1	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
8	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Esfuerzos resultantes

Se hallaron los momentos globales del tablero, tanto el de torsión M_1 como el de flexión M_2 (lámina VP.E_17).

Los resultados confirman lo interpretado del análisis de deformaciones:

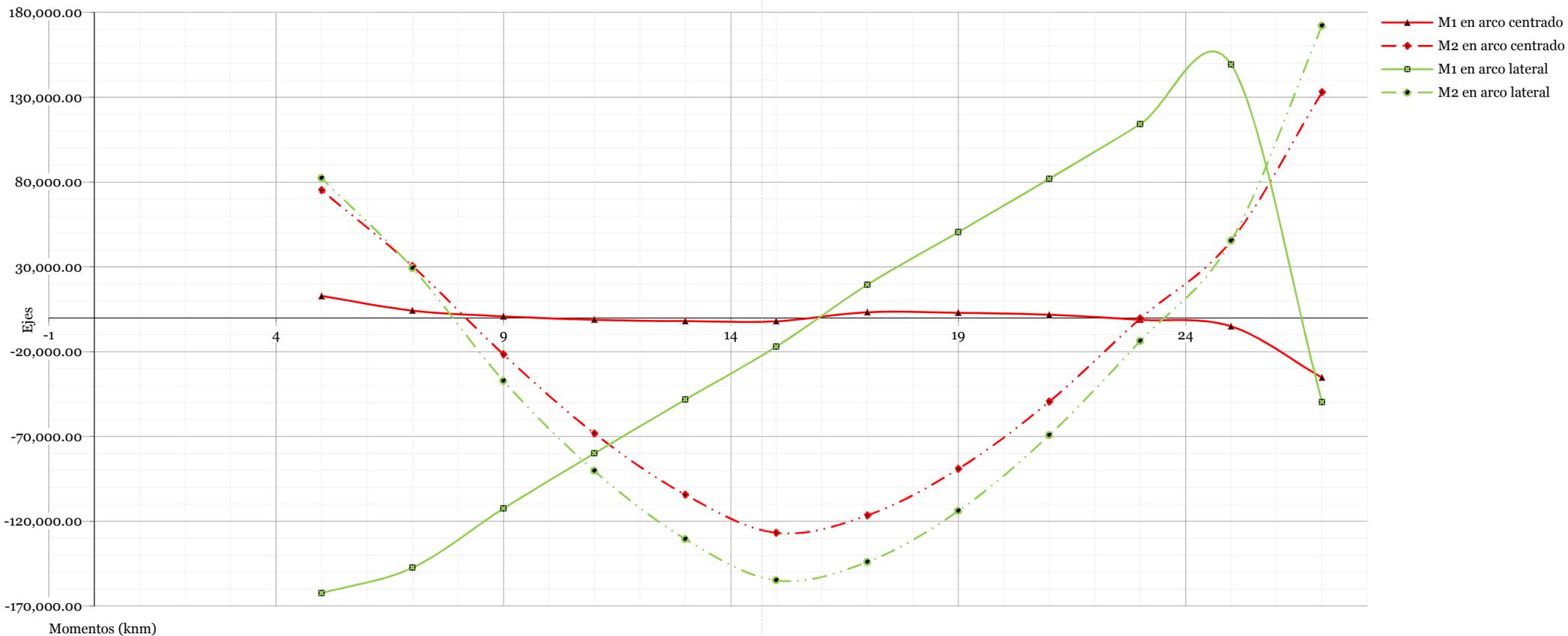
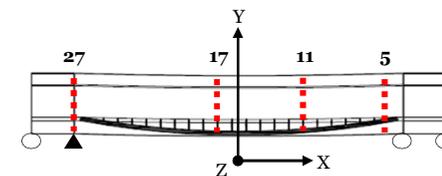
1. Los momentos de torsión M_1 , son uniformes cuando el arco está ubicado en el eje del tablero. Cuando el arco está al costado, los momentos sufren una drástica variación, de extremo a extremo del puente, rompiendo el equilibrio o límite estático deseado por Calatrava. El modelo con arco central presenta valores entre -35 300 a 12 850 kNm, mientras que el de arco lateral varía entre -162 400 y 149 250 kNm.
2. Los momentos flectores son menores con el arco al centro. En el eje 15, el de mayor flexión, la diferencia entre ambos modelos es de 28 000 kNm.

VP.E_17. Momentos en el plano cartesiano

Tabla 16: Momentos globales del tablero: torsor M1 y flector M2

M2

Eje		27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5
Arco centr.	M1	-35294.20	-5087.88	-1184.22	1732.15	2953.48	3229.50	-2072.20	-2001.75	-1205.34	831.30	4197.52	12843.03
	M2	132881.80	45406.55	-511.25	-49529.74	-89184.99	-116546.85	-126826.95	-104382.23	-68272.41	-21650.68	30374.67	75187.02
Arco lateral	M1	-49715.39	149246.61	114101.65	81859.98	50423.81	19396.54	-17020.38	-48263.41	-79973.42	-112499.47	-147364.24	-162413.56
	M2	172131.65	45290.68	-13769.13	-69256.53	-113953.92	-144016.58	-154840.23	-130491.15	-90318.12	-37201.49	29249.74	82300.88



Causas del comportamiento estructural

Transversalmente el puente trabaja como un *forjado en volado*, cuyo único apoyo está descentrado.

En este contexto, tomemos en cuenta las siguientes proporcionalidades:

$$M \propto L^2$$

$$F \propto L^4$$

Donde:

M: momento

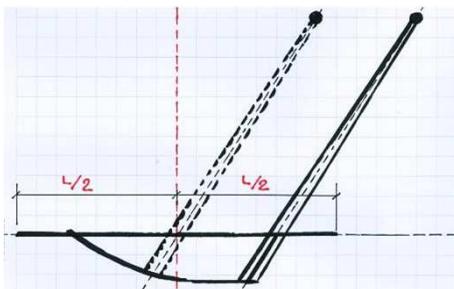
L: luz libre entre apoyos

F: flecha

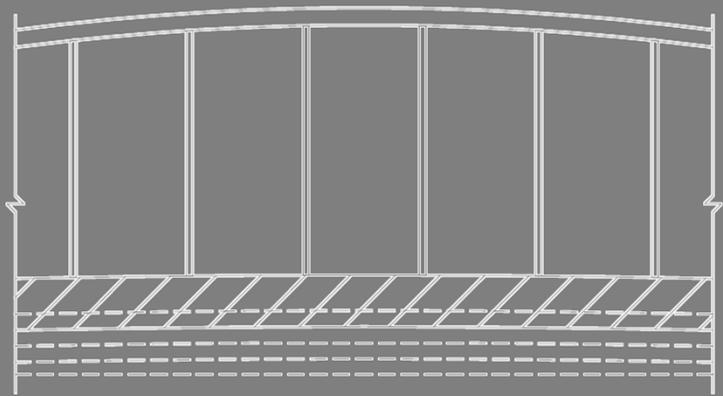
La magnitud dominante de esta forma estructural es la luz libre entre apoyos, en este caso, la longitud del volado.

Con el arco descentrado el tablero vuela 18 m aproximadamente, mientras que con el arco en el eje, el vuelo de la plataforma se reduciría alcanzado unos 13 m (fig. 7). La reducción del volado reduce proporcionalmente las fuerzas de torsión y por tanto, también las deformaciones, tal como se pudo verificar en el modelo de cálculo (láminas VP.D_13, 14, 15 y 16).

Se puede concluir que la forma óptima de diseño transversal de un puente es la simétrica.



7. Esquema de reducción de volado por desplazamiento del apoyo.



Variación curvatura del tablero

Para estudiar esta forma estructural, se desarrollaron cuatro modelos adicionales, variando la curvatura del tablero. Dicha variación esta clasificada por la distancia entre la horizontal y el punto más alto de la curva, distancia a la que llamamos contraflecha:

1. Modelo con 3.20 m de contraflecha
2. Modelo con 2.40 m de contraflecha –original–
3. Modelo con 1.60 m de contraflecha
4. Modelo con 0.80 m de contraflecha
5. Modelo con 0.00 m de contraflecha

Deformaciones resultantes

La curvatura de la plataforma no mejora el comportamiento estructural del puente, con excepción del arco en el eje Y, todas las demás deformaciones se incrementan a medida que se incrementa la curvatura. La mejor opción es la plataforma plana.

Eje X:

El incremento de la curvatura de la plataforma es directamente proporcional al incremento de las deformaciones en todos los puntos. En decir, la mejor opción para este eje es una plataforma sin curvatura.

Eje Y:

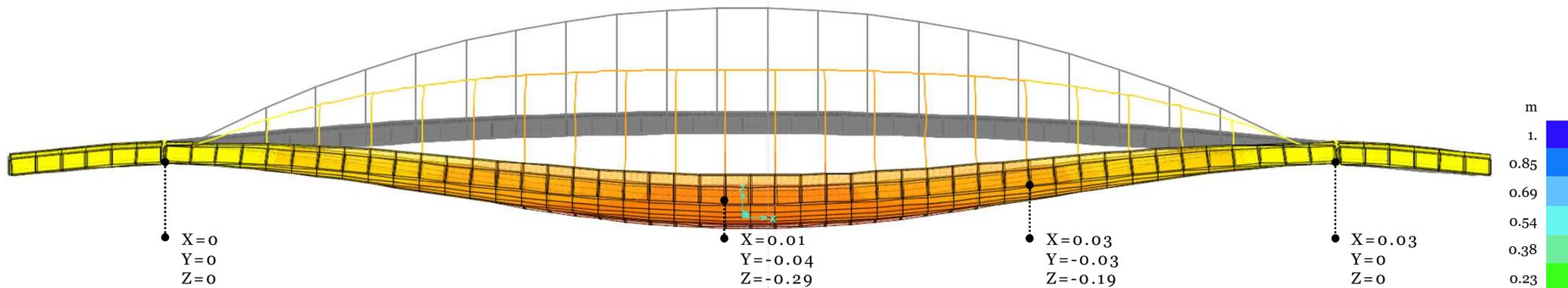
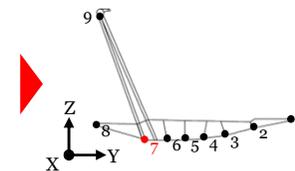
Este eje experimenta mejora en el comportamiento estructural a medida que se incrementa la curvatura. Sin embargo, el punto óptimo está alrededor de 1.60 m de contraflecha, a partir de este punto las deformaciones aumentan proporcionalmente.

La contraflecha del modelo original es de 2.40 m, lejos de la posición óptima.

Eje Z:

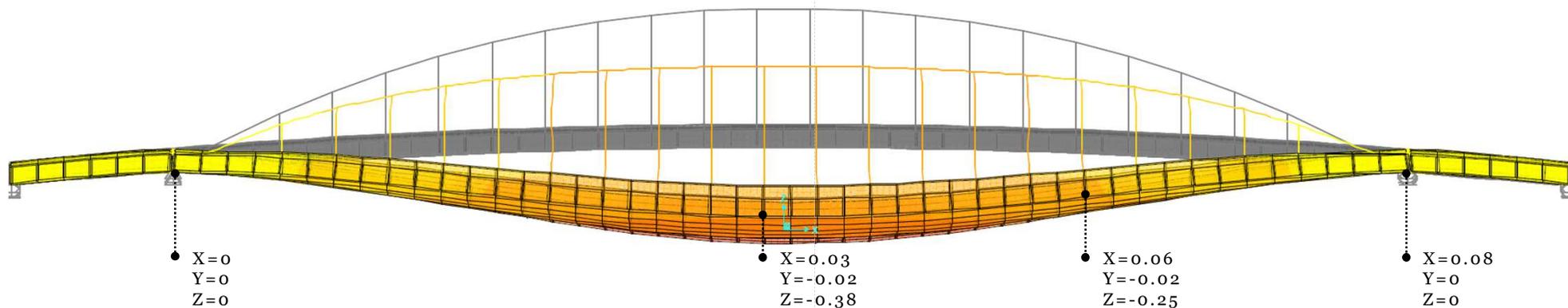
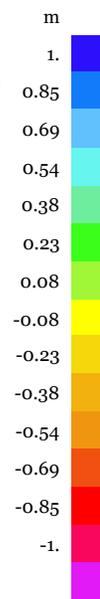
El incremento de la curvatura de la plataforma es directamente proporcional al incremento de las deformaciones en todos los puntos. En decir, la mejor opción para este eje es una plataforma sin curvatura.

VC.D_18. Deformación en escala de colores: X, Y, Z; punto 7



DEFORMACIONES A 3.20 M

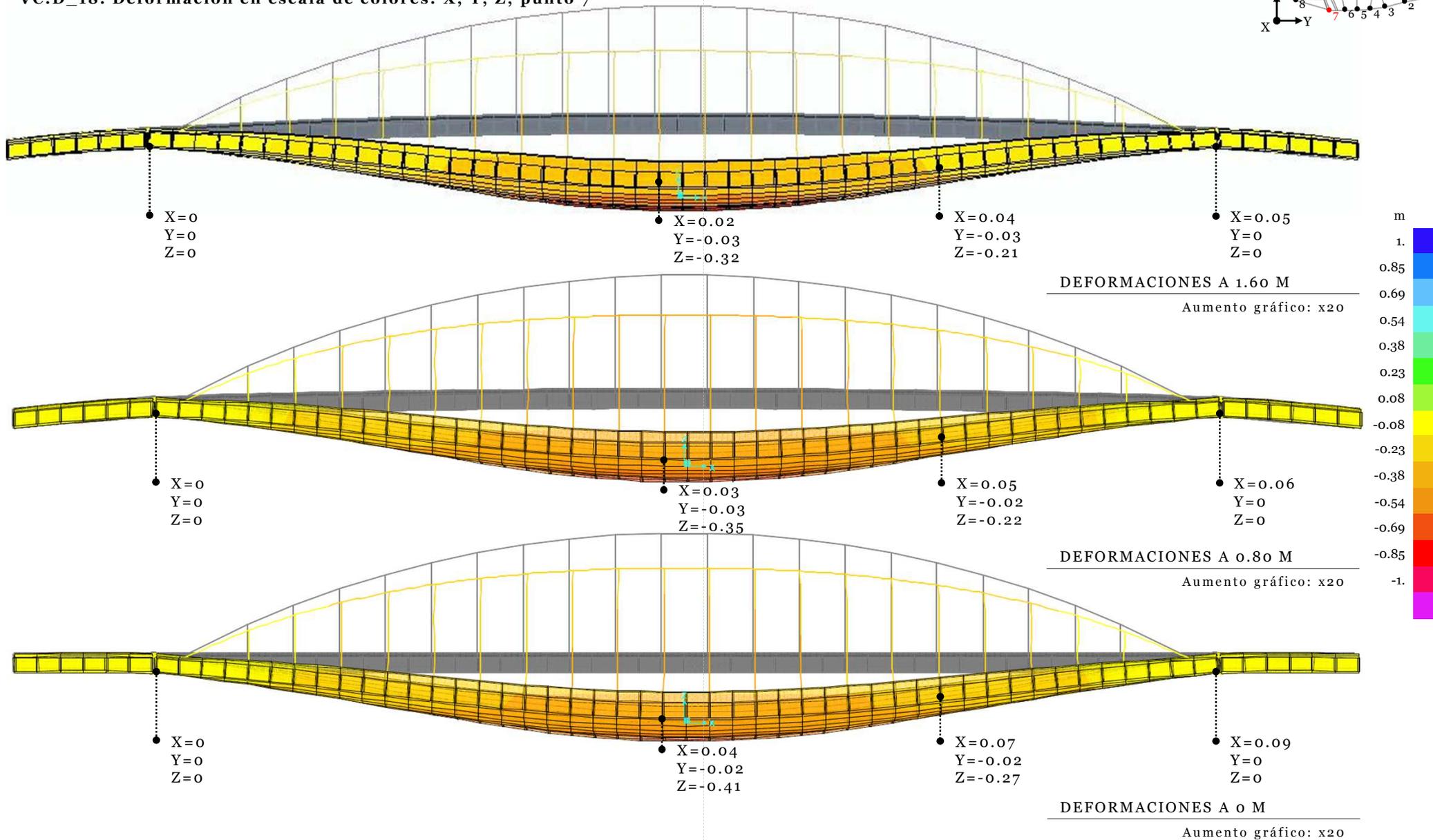
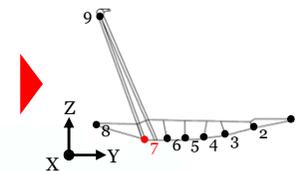
Aumento gráfico: x20



DEFORMACIONES A 2.40 M

Aumento gráfico: x20

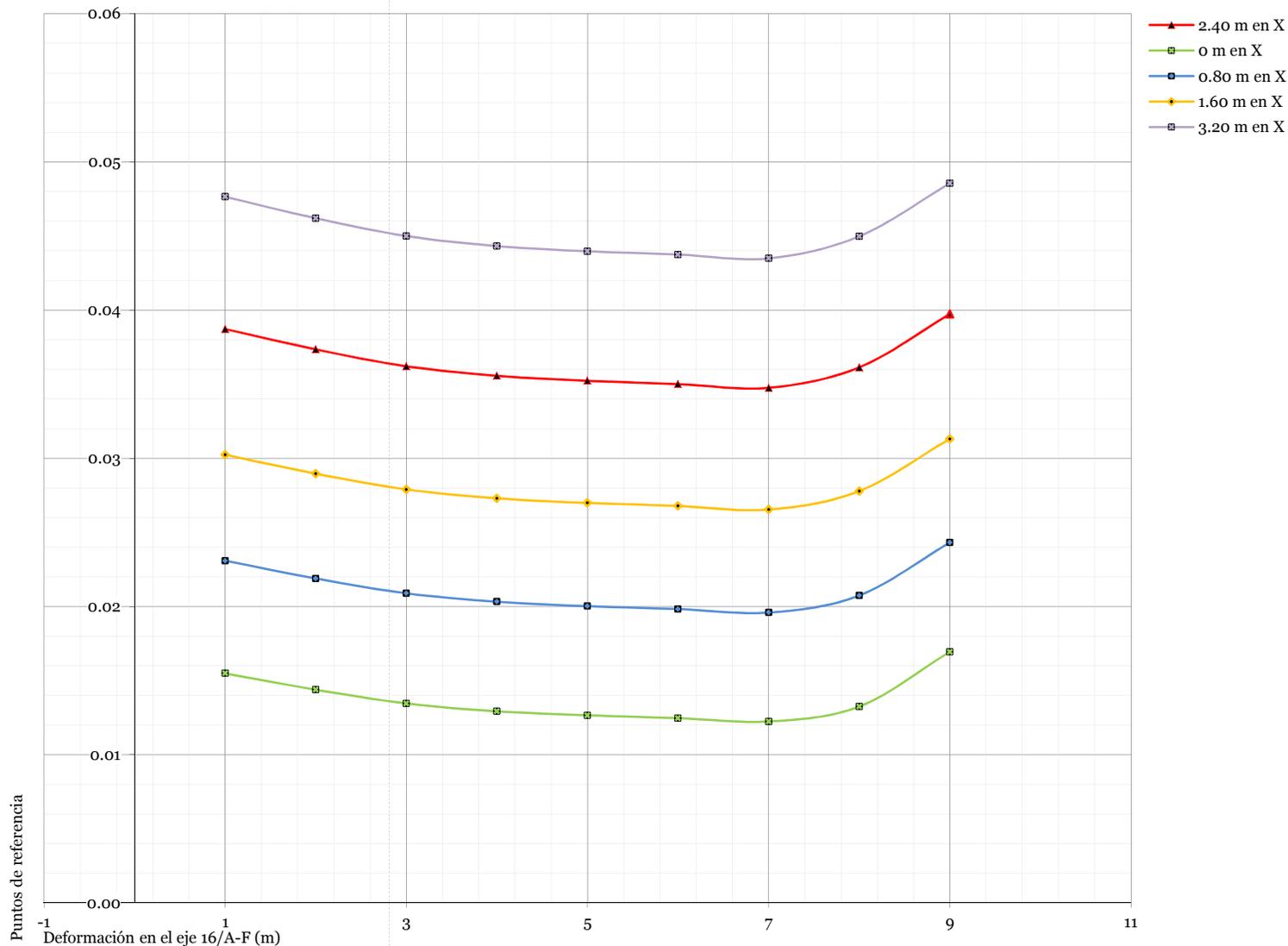
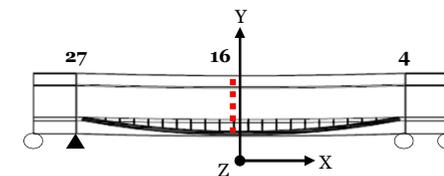
VC.D_18. Deformación en escala de colores: X, Y, Z; punto 7



VC.D_19. Deformación en plano cartesiano

Tabla 17: Deformación horizontal X de modelos con distinta curvatura de plataforma, eje 16

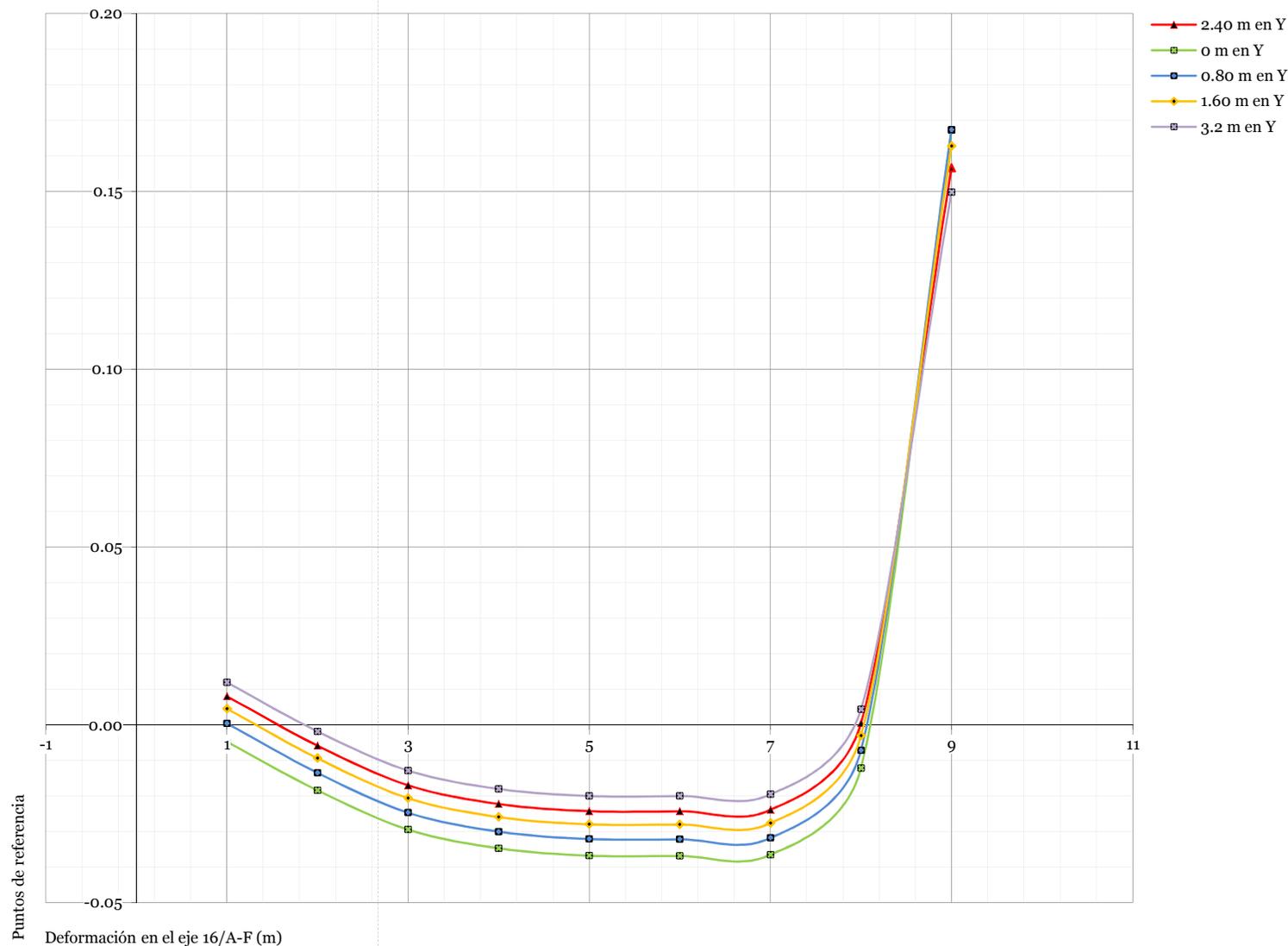
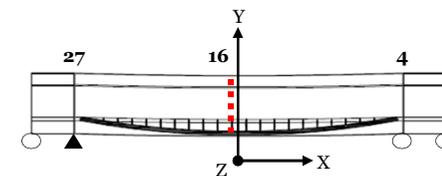
Ref.	2.40	0.00	0.80	1.60	3.20
	x	x	x	x	x
	m	m	m	m	m
	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.
Sección eje 16					
1	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05
2	0.04	0.01	0.02	0.03	0.05
3	0.04	0.01	0.02	0.03	0.05
4	0.04	0.01	0.02	0.03	0.04
5	0.04	0.01	0.02	0.03	0.04
6	0.04	0.01	0.02	0.03	0.04
7	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04
8	0.04	0.01	0.02	0.03	0.04
9	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05



VC.D_19. Deformación en plano cartesiano

Tabla 18: Deformación horizontal Y de modelos con distinta curvatura de plataforma, eje 16

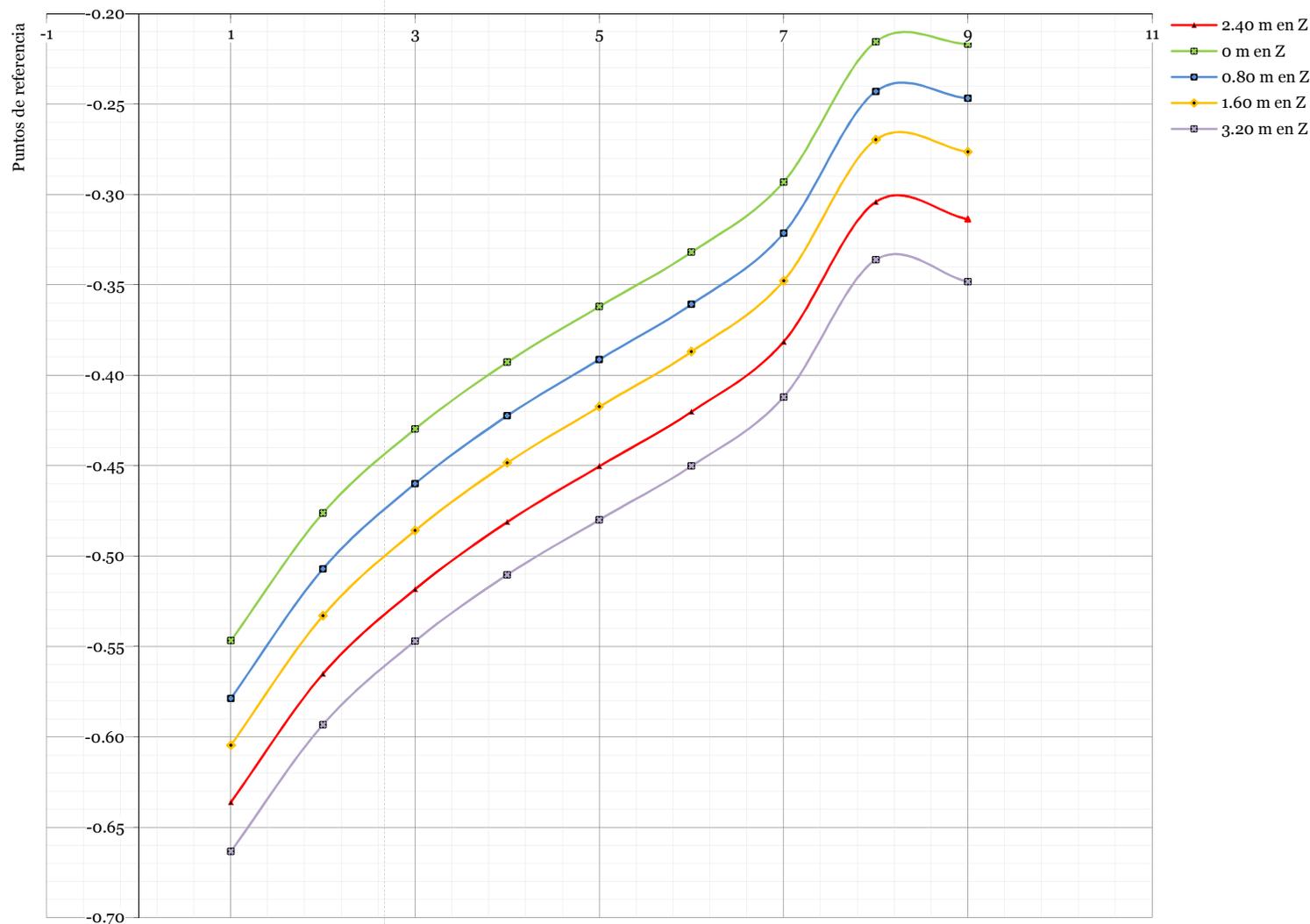
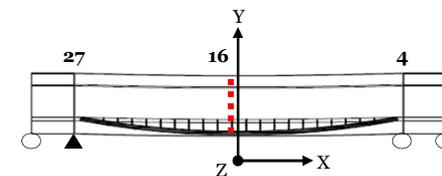
Ref.	2.40	0.00	0.80	1.60	3.20
	y	y	y	y	y
	m	m	m	m	m
	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.
Sección eje 16					
1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
2	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0.00
3	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02	-0.01
4	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02
5	-0.02	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02
6	-0.02	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02
7	-0.02	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02
8	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00
9	0.16	0.17	0.17	0.16	0.15



VC.D_19. Deformación en plano cartesiano

Tabla 19: Deformación vertical Z de modelos con distinta curvatura de plataforma, eje 16

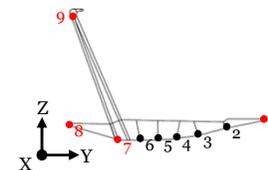
Ref.	2.40	0.00	0.80	1.60	3.20
	Z	Z	Z	Z	Z
	m	m	m	m	m
	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.	Tras.
Sección eje 16					
1	-0.64	-0.55	-0.58	-0.60	-0.66
2	-0.57	-0.48	-0.51	-0.53	-0.59
3	-0.52	-0.43	-0.46	-0.49	-0.55
4	-0.48	-0.39	-0.42	-0.45	-0.51
5	-0.45	-0.36	-0.39	-0.42	-0.48
6	-0.42	-0.33	-0.36	-0.39	-0.45
7	-0.38	-0.29	-0.32	-0.35	-0.41
8	-0.30	-0.22	-0.24	-0.27	-0.34
9	-0.31	-0.22	-0.25	-0.28	-0.35



Deformación en el eje 16/A-F (m)

VC.D_20. Línea de tendencia de la deformación

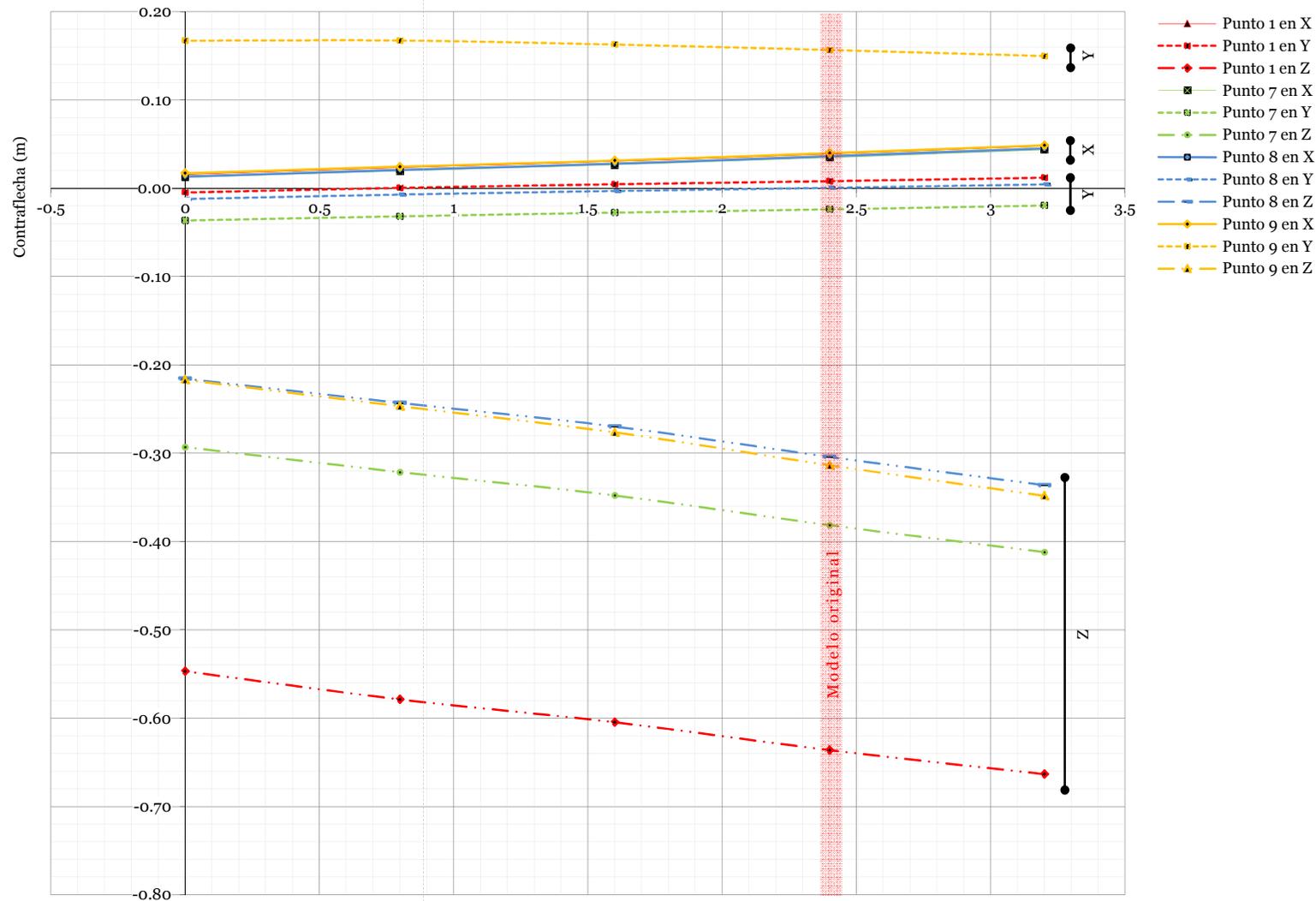
Tabla 20: Comparación transversal de modelos con distinta curvatura de plataforma, eje 16



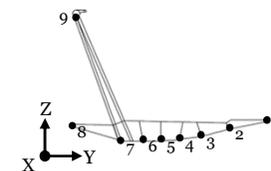
Variación	Deformación			
	1	7	8	9
°	m	m	m	m
Eje X				
3.20	0.048	0.043	0.045	0.049
2.40	0.039	0.035	0.036	0.040
1.60	0.030	0.027	0.028	0.031
0.80	0.023	0.020	0.021	0.024
0.00	0.015	0.012	0.013	0.017

Eje Y				
3.20	0.012	-0.020	0.004	0.150
2.40	0.008	-0.024	0.000	0.157
1.60	0.005	-0.028	-0.003	0.163
0.80	0.000	-0.032	-0.007	0.167
0.00	-0.005	-0.037	-0.012	0.167

Eje Z				
3.20	-0.663	-0.412	-0.336	-0.348
2.40	-0.636	-0.382	-0.304	-0.314
1.60	-0.605	-0.348	-0.270	-0.276
0.80	-0.579	-0.321	-0.243	-0.247
0.00	-0.547	-0.293	-0.216	-0.217



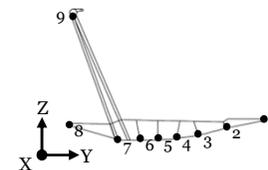
Deformación en el eje 16/A-F (m)



VC.D_21. Cuadro de deformaciones

Tabla 21: Deformación y rotación de modelos con distinta curvatura de plataforma

Ref.	Contraflecha 2.40 m						Contraflecha 0 m						Contraflecha 0.80 m						Contraflecha 1.60 m						Contraflecha 3.20 m											
	x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z							
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.
Sección eje 4: apoyo deslizante																																				
1	0.06	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
2	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
3	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
4	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
6	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
7	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
8	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01
Sección eje 10																																				
1	0.03	-0.01	0.00	-0.01	-0.44	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.38	0.00	0.02	-0.01	0.00	-0.01	-0.40	0.00	0.02	-0.01	0.00	-0.01	-0.42	0.00	0.04	-0.01	0.01	-0.01	-0.46	0.00	0.04	-0.01	0.01	-0.01	-0.46	0.00
2	0.04	-0.01	-0.01	-0.01	-0.39	0.00	0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.33	0.00	0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.35	0.00	0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.37	0.00	0.05	-0.01	0.00	-0.01	-0.41	0.00	0.05	-0.01	0.00	-0.01	-0.41	0.00
3	0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.35	0.00	0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.29	0.00	0.03	-0.01	-0.02	-0.01	-0.31	0.00	0.04	-0.01	-0.02	-0.01	-0.33	0.00	0.06	-0.01	-0.01	-0.01	-0.37	0.00	0.06	-0.01	-0.01	-0.01	-0.37	0.00
4	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.32	0.00	0.03	-0.01	-0.03	-0.01	-0.26	0.00	0.04	-0.01	-0.02	-0.01	-0.28	0.00	0.05	-0.01	-0.02	-0.01	-0.30	0.00	0.07	-0.01	-0.02	-0.01	-0.35	0.00	0.07	-0.01	-0.02	-0.01	-0.35	0.00
5	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.30	0.00	0.03	-0.01	-0.03	-0.01	-0.24	0.00	0.04	-0.01	-0.03	-0.01	-0.26	0.00	0.05	-0.01	-0.02	-0.01	-0.28	0.00	0.07	-0.01	-0.02	-0.01	-0.32	0.00	0.07	-0.01	-0.02	-0.01	-0.32	0.00
6	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.28	0.00	0.03	-0.01	-0.03	-0.01	-0.22	0.00	0.04	-0.01	-0.03	-0.01	-0.24	0.00	0.05	-0.01	-0.02	-0.01	-0.25	0.00	0.07	-0.01	-0.02	-0.01	-0.30	0.00	0.07	-0.01	-0.02	-0.01	-0.30	0.00
7	0.06	-0.01	-0.02	-0.01	-0.25	0.00	0.03	-0.01	-0.03	-0.01	-0.19	0.00	0.04	-0.01	-0.03	-0.01	-0.21	0.00	0.05	-0.01	-0.02	-0.01	-0.22	0.00	0.07	-0.01	-0.02	-0.01	-0.27	0.00	0.07	-0.01	-0.02	-0.01	-0.27	0.00
8	0.05	-0.01	0.00	-0.01	-0.19	0.00	0.02	-0.01	-0.01	0.00	-0.13	0.00	0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.14	0.00	0.04	-0.01	0.00	-0.01	-0.16	0.00	0.06	-0.01	0.00	-0.01	-0.21	0.00	0.06	-0.01	0.00	-0.01	-0.21	0.00
9	0.03	-0.01	0.09	-0.01	-0.21	0.00	0.00	-0.01	0.10	0.00	-0.14	0.00	0.01	-0.01	0.10	-0.01	-0.16	0.00	0.02	-0.01	0.10	-0.01	-0.18	0.00	0.04	-0.01	0.09	-0.01	-0.23	0.00	0.04	-0.01	0.09	-0.01	-0.23	0.00



VC.D_21. Cuadro de deformaciones

Ref.	Contraflecha 2.40 m						Contraflecha 0 m						Contraflecha 0.80 m						Contraflecha 1.60 m						Contraflecha 3.20 m						
	x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z		
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
Sección eje 16																															
	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	Tras.	Rot.	
1	0.04	-0.02	0.01	0.00	-0.64	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.00	-0.55	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.00	-0.58	0.00	0.03	-0.02	0.00	0.00	-0.60	0.00	0.05	-0.02	0.01	0.00	-0.66	0.00	
2	0.04	-0.01	-0.01	0.00	-0.57	0.00	0.01	-0.01	-0.02	0.00	-0.48	0.00	0.02	-0.01	-0.01	0.00	-0.51	0.00	0.03	-0.01	-0.01	0.00	-0.53	0.00	0.05	-0.01	0.00	0.00	-0.59	0.00	
3	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.52	0.00	0.01	-0.01	-0.03	0.00	-0.43	0.00	0.02	-0.01	-0.02	0.00	-0.46	0.00	0.03	-0.01	-0.02	0.00	-0.49	0.00	0.05	-0.01	-0.01	0.00	-0.55	0.00	
4	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.48	0.00	0.01	-0.01	-0.03	0.00	-0.39	0.00	0.02	-0.01	-0.03	0.00	-0.42	0.00	0.03	-0.01	-0.03	0.00	-0.45	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.51	0.00	
5	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.45	0.00	0.01	-0.01	-0.04	0.00	-0.36	0.00	0.02	-0.01	-0.03	0.00	-0.39	0.00	0.03	-0.01	-0.03	0.00	-0.42	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.48	0.00	
6	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.42	0.00	0.01	-0.01	-0.04	0.00	-0.33	0.00	0.02	-0.01	-0.03	0.00	-0.36	0.00	0.03	-0.01	-0.03	0.00	-0.39	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.45	0.00	
7	0.03	-0.01	-0.02	0.00	-0.38	0.00	0.01	-0.01	-0.04	0.00	-0.29	0.00	0.02	-0.01	-0.03	0.00	-0.32	0.00	0.03	-0.01	-0.03	0.00	-0.35	0.00	0.04	-0.01	-0.02	0.00	-0.41	0.00	
8	0.04	-0.01	0.00	0.00	-0.30	0.00	0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.22	0.00	0.02	-0.01	-0.01	0.00	-0.24	0.00	0.03	-0.01	0.00	0.00	-0.27	0.00	0.04	-0.01	0.00	0.00	-0.34	0.00	
9	0.04	-0.01	0.16	0.00	-0.31	0.00	0.02	-0.01	0.17	0.00	-0.22	0.00	0.02	-0.01	0.17	0.00	-0.25	0.00	0.03	-0.01	0.16	0.00	-0.28	0.00	0.05	-0.01	0.15	0.00	-0.35	0.00	
Sección eje 27: apoyo fijo																															
1	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	
2	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	
5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
7	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	
8	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

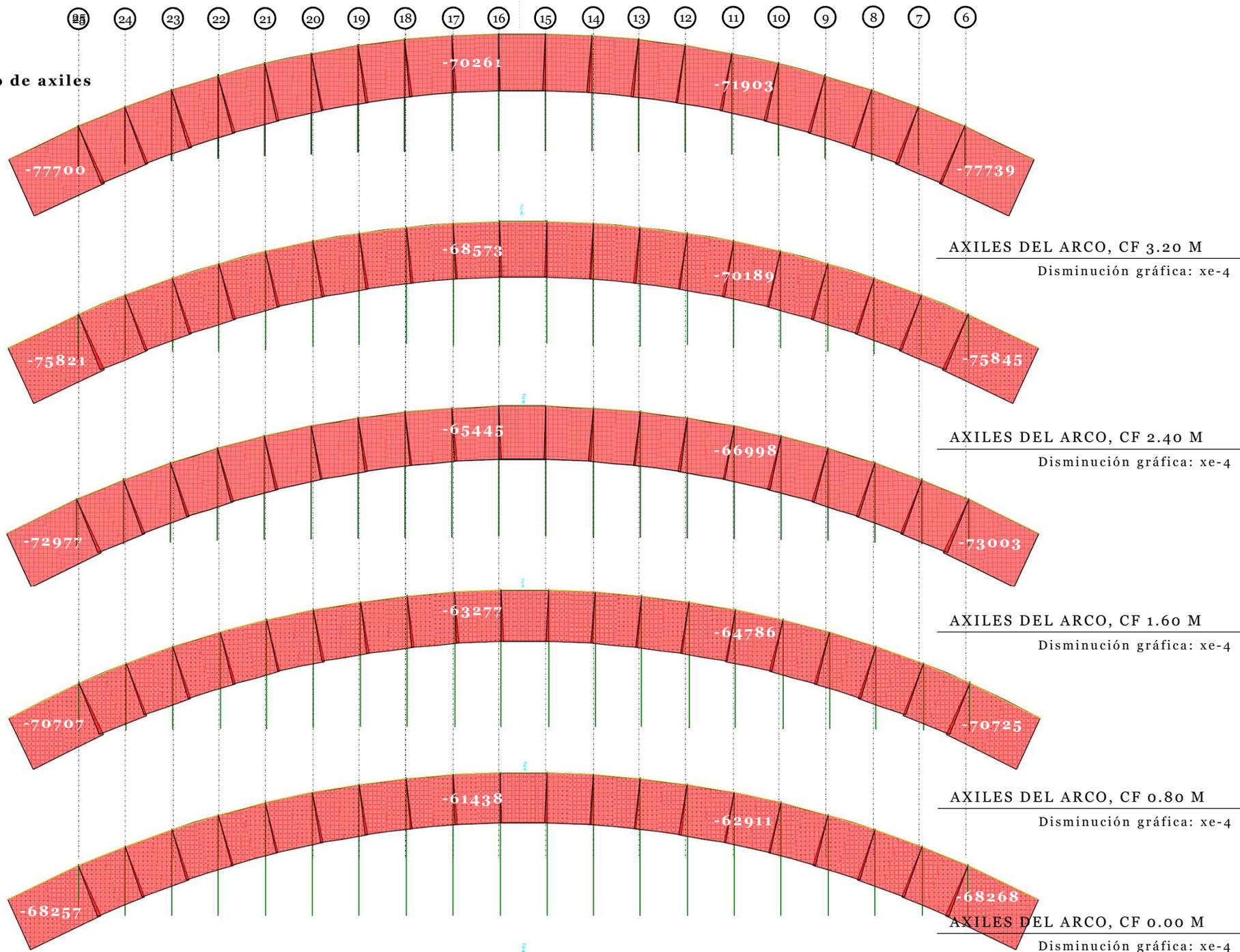
Esfuerzos resultantes

Se analizó la variación de los esfuerzos en el arco a las diferentes curvaturas del tablero, a fin de entender el comportamiento de la deformación.

La principal fuerza que actúa sobre el arco, es el axil a compresión. Dicho axil aumenta proporcionalmente al aumento de la curvatura del tablero, corroborando lo que se interpretó en el análisis de las deformaciones: a menor altura de celosía, mayores fuerzas axiles (lámina VC.D_20).

Según el análisis de fuerzas la mejor forma del tablero es sin curvatura, dado que presenta los menores axiles y por tanto las menores deformaciones (lámina VC.E_24).

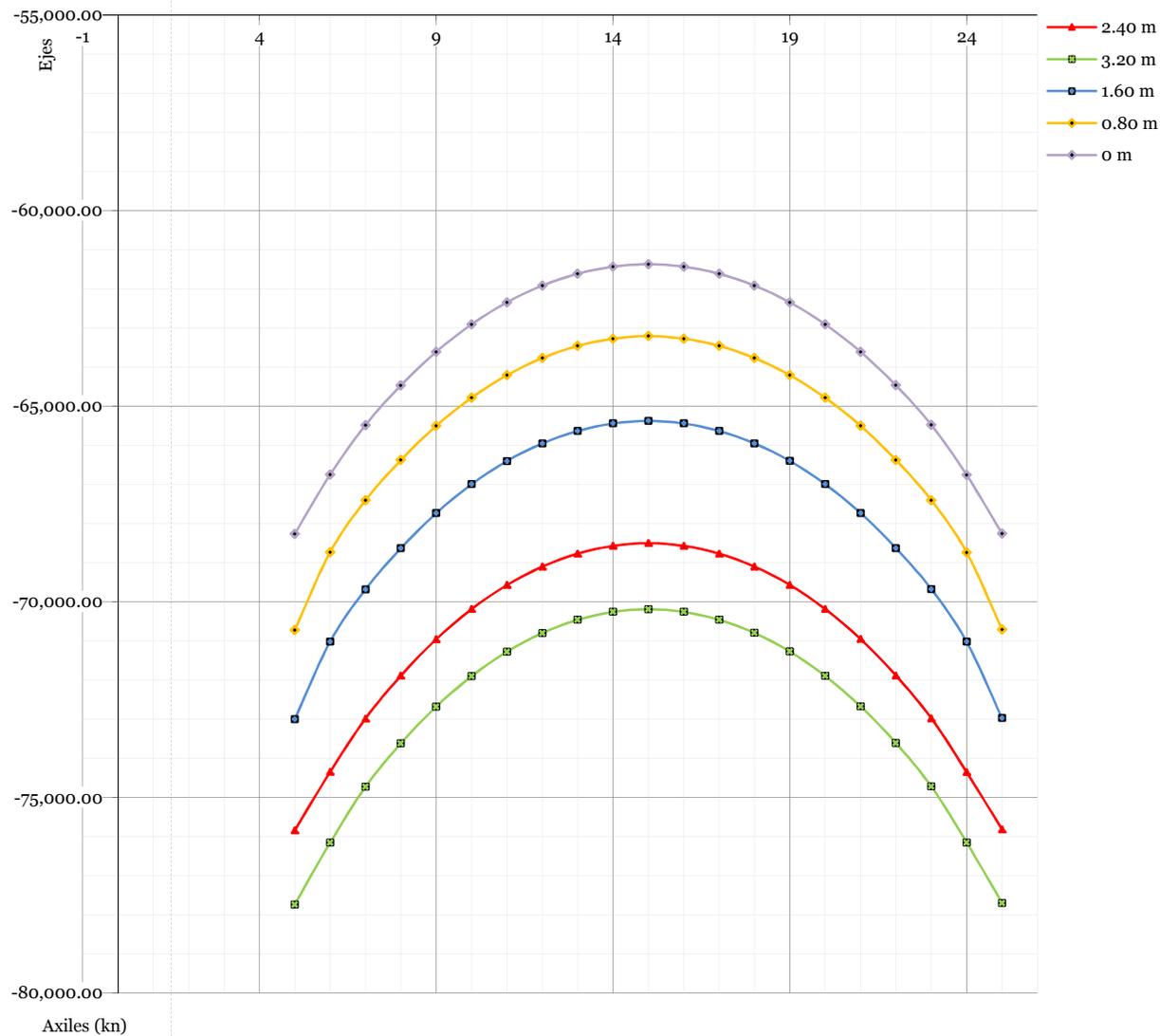
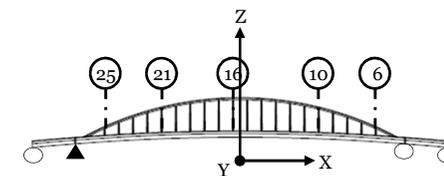
VC.E_22. Gráfico de axiles



VC.E_23. Axiles en el plano cartesiano

Tabla 22: Axiles de arcos con distinta curvatura de plataforma

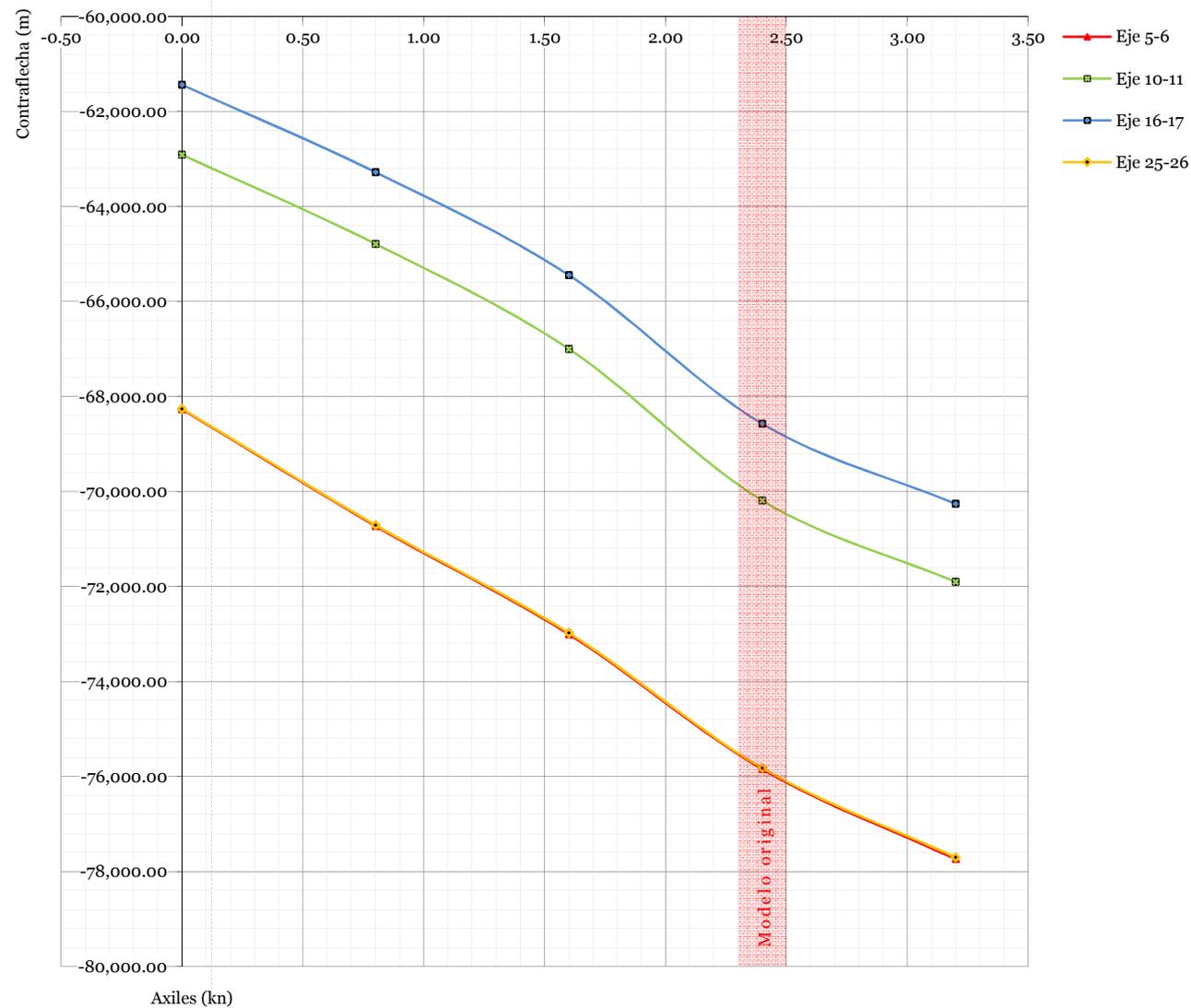
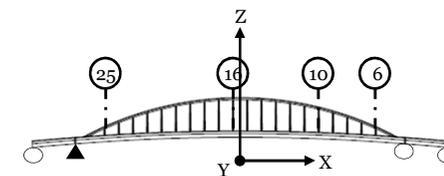
Eje	2.40	3.20	1.60	0.80	0.00
	kn	kn	kn	kn	kn
5	-75844.89	-77738.86	-73003.26	-70724.82	-68268.36
6	-74349.74	-76158.71	-71023.50	-68734.42	-66754.15
7	-72987.02	-74732.27	-69684.04	-67409.89	-65485.52
8	-71891.84	-73620.60	-68636.17	-66381.78	-64471.20
9	-70959.37	-72682.79	-67737.61	-65506.48	-63614.89
10	-70189.08	-71902.91	-66997.74	-64786.41	-62911.24
11	-69574.50	-71278.39	-66406.67	-64211.58	-62349.83
12	-69103.87	-70800.86	-65955.28	-63772.79	-61921.48
13	-68772.18	-70463.53	-65636.65	-63463.15	-61619.28
14	-68573.48	-70261.40	-65445.79	-63277.68	-61438.27
15	-68504.75	-70191.54	-65379.84	-63213.57	-61375.69
16	-68572.82	-70260.53	-65445.40	-63277.48	-61438.21
17	-68771.11	-70461.92	-65636.05	-63462.95	-61619.37
18	-69102.57	-70798.19	-65954.19	-63772.35	-61921.51
19	-69571.88	-71274.42	-66404.93	-64210.74	-62349.66
20	-70186.59	-71897.39	-66995.21	-64785.07	-62910.80
21	-70954.52	-72675.41	-67734.08	-65504.51	-63614.08
22	-71885.54	-73610.92	-68631.21	-66378.88	-64469.76
23	-72979.53	-74718.44	-69677.45	-67405.16	-65482.70
24	-74355.43	-76155.12	-71025.91	-68740.14	-66762.22
25	-75821.01	-77700.45	-72976.92	-70706.59	-68257.40



VC.E_24. Línea de tendencia de axiles

Tabla 23: Comparación transversal de axiles de arcos con distinta curvatura de plataforma

Variación	Axiles			
	5-6	10-11	16-17	25-26
m	kn	kn	kn	kn
3.20	-77738.86	-71902.91	-70260.53	-77700.45
2.40	-75844.89	-70189.08	-68572.82	-75821.01
1.60	-73003.26	-66997.74	-65445.40	-72976.92
0.80	-70724.82	-64786.41	-63277.48	-70706.59
0.00	-68268.36	-62911.24	-61438.21	-68257.40



Causas del comportamiento estructural

Como ya se estableció anteriormente, al arco es una *celosía de canto variable adaptada a la ley de esfuerzos*, la cual trabaja a flexión.

Para entender las causas del comportamiento estructural de la celosía, se deben tener presentes las siguientes relaciones de proporcionalidad:

$$M \propto L^2$$

$$M \propto H$$

$$F \propto L^4$$

$$F \propto 1/I$$

Donde:

M: momento

L: luz libre entre apoyos

H: canto de celosía

F: flecha

I: momento de inercia

Como vemos, las magnitudes dominantes del comportamiento estructural de la celosía son, por orden de importancia:

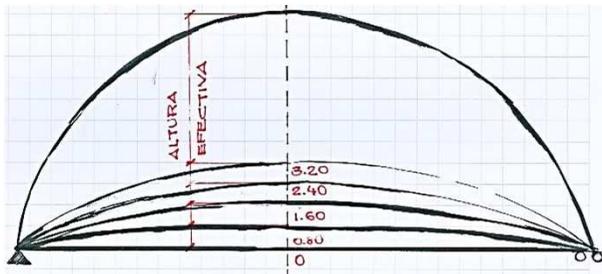
1. Luz libre entre apoyos
2. Inercia de la celosía
3. Canto de la celosía

La más determinante, la luz —134 m— no se toma en cuenta ya que es una magnitud constante para entender el comportamiento del arco inclinado. Por tanto, la línea de tendencia de deformación y esfuerzos depende del canto de la celosía y del momento de inercia —el cual también es directamente proporcional al canto—.

Veamos ahora, a medida que incrementamos la contraflecha del tablero (fig. 8), también disminuimos la altura efectiva de la celosía, disminuyendo la inercia de la misma, lo cual se evidencia en el aumento de la deformación (lámina VC.D_20).

Por otro lado, la disminución de la altura efectiva incrementa las fuerzas en los cordones superiores e inferiores, esto podemos verificarlo fácilmente con la línea de tendencia de los axiles a compresión del cordón superior (lámina VC.E_24).

Concluimos que la forma curvada del tablero no colabora con los esfuerzos de tracción que soporta, por el contrario, disminuye la altura efectiva de la celosía, incrementando los axiles a compresión del cordón y a tracción del mismo tablero.



8. Esquema de reducción de altura efectiva por curvatura de la plataforma.

IX

CONCLUSIONES

Contra la injusticia del juicio no está la renuncia a juzgar, sino la renuncia de llegar a veredicto. Hay que saber preferir un juzgar interminable, que nunca acabe de ir considerando nuevos aspectos de la obra, de ir añadiendo referencias. 1

QUETGLAS

Para lograr una garantía de acierto en el enjuiciamiento de una obra, ha de ser necesario integrar estas cuatro premisas: finalidad utilitaria, función estructural, exigencias estéticas y limitaciones económicas.

Estas cuatro facetas de la obra está tan ligadas entre sí, que a pesar de ser este, un trabajo acotado en la función estructural, fue necesario dar pinceladas de los otros tres aspectos. Sin embargo, al ser solo pinceladas, las conclusiones a las que se llegaron, se limitan al ámbito estructural, mas no así, a la totalidad de la obra.

Dentro de los dominios de la función estructural, se ha intentado determinar si la forma del Puente de la Exposición es o no, la respuesta adecuada al problema. Para llegar a la respuesta, nos remontamos a los orígenes de la Técnica Calatrava hasta llegar a la morfología estructural del Puente de la Exposición.

Del camino recorrido, se han agrupado las conclusiones en dos grupos, según los objetivos alcanzados en cada paso:

1. Santiago Calatrava
2. Morfología estructural del Puente de la Exposición

SANTIAGO CALATRAVA

La sensibilidad y talento de Calatrava son indudables, le permitieron extraer técnica del conocimiento heredado — Naturaleza, Da Vinci, Maillart, Gaudi, Torroja, NASA, por nombrar algunos—, transformarla y hacerla suya.

Muestra de este talento es la producción de sus primeros años: el Almacén de la fábrica de Jaken, la remodelación de la Fábrica Ernsting's, la Estación de Stadelhofen y la cubierta del centro postal de Lucerna. Obras en las que convergen y se materializan, lo aprendido y lo propio. En estas, demuestra tener la aptitud para imaginar el trazo adecuado que cierra el sistema con el mínimo error.

Allá, por 1989 Pier Luigi Nicoli⁴ elogiaba —como muchos otros críticos— al arquitecto, calificándolo como «creador precoz», y exponía su deseo de ver la futura producción, capaz de incluir el fenómeno arquitectónico en toda su extensión⁵.

Como es sabido, los siguientes proyectos no alcanzaron lo esperado por Nicoli, y uno se pregunta qué pasó. Al éxito de las primeras obras, Calatrava ganó notoriedad y, ya sea por ego, ambición u otros, forjó la Marca Calatrava. Inaugura estudios en Zúrich, París, Nueva York y Valencia; acepta innumerables encargos —en los años de mayor bonanza podía tener 15 o quizá más proyectos al mismo tiempo³— que claramente sobrepasaron su capacidad. Empezaron a ser frecuentes los retrasos en entrega de información para las obras, soluciones técnicamente deficientes, etc. —el libro *Queríamos un Calatrava* de Moix, recoge muchos datos que evidencian esta desmesura—.

Por otro lado, el deseo desmedido por innovar y así ganar notoriedad, lo llevó a explorar innecesariamente nuevas soluciones, las cuales aun inmaduras, terminaron en obras polémicas, dada la desproporción y/o deficiente respuesta a los

problemas que plantean la finalidad utilitaria, función estructural, exigencias estéticas y limitaciones económicas.

Candela definía la innovación como el resultado de la labor de un subconsciente bien repleto de información relativa al problema que ella resuelve. Esta idea se debe complementar con lo dicho por Torroja: «Nunca debe darse de lado una solución, sin tener la seguridad de que no ha de llevar ventaja sobre otras»⁶. No obstante, esta premisa no parece limitar la creatividad de Calatrava. A falta de nuevos problemas que ameritaran nuevas soluciones, Calatrava se inventó problemas que los resolvió con pseudosoluciones, pero innovadoras a fin de cuentas.

Una muestra de esta búsqueda de innovación es el Puente de la Exposición, camino que vuela 134 m innecesariamente, cuyo tipo estructural de arco fue modificado, a pesar de que el problema no lo solicitaba, y sin tener la certeza de que las variaciones representaban una mejora. En consecuencia, la pseudosolución de arco inclinado descentrado fue en detrimento de la función estructural, que se suponía mejoraría, sin mencionar los efectos negativos en la función utilitaria y económica⁷.

MORFOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL PUENTE DE LA EXPOSICIÓN

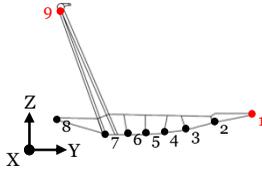
La forma del puente exige un diseño por límite de deformación y no por límite de esfuerzos, dada la luz de 134 m —magnitud fija en este trabajo—. Dicha afirmación es corroborada con los resultados de la Tensión Von Mises, los cuales indican que la estructura trabaja al 45% de su capacidad resistente. Entre tanto, las deformaciones máximas son en Z, alcanzando los 0.66 m en el eje central.

En consecuencia, es de vital importancia elegir la forma que presente menores deformaciones, puesto que permitiría disminuir la sección y/o resistencia de los materiales, que a su vez se traducirían en la reducción de costos.

A lo largo del trabajo pudimos verificar que las variaciones que realizó Calatrava en la forma tradicional de *puente de arco* resultaron en el incremento de las deformaciones:

1. El alejar el arco del eje del puente generó grandes momentos de torsión en el tablero que no fueron compensados por la torsión fruto de los 70° de inclinación del arco, dando como resultado deformaciones dispares transversalmente, tanto en el eje Y como en el Z.
2. La inclinación de 70° del arco respecto a la horizontal, por un lado, no genera un momento torsor suficiente para alcanzar el equilibrio —el momento torsor del tablero es superior al del arco—, y por otro, disminuye la altura efectiva del arco, en consecuencia las deformaciones se incrementan a medida que este se inclina.
3. El curvar el tablero tampoco supuso una mejora. Las deformaciones aumentaron proporcionalmente al incremento de curvatura de la plataforma, pues esto significó restar altura al arco, disminuyendo la inercia.

Dada la importancia de la deformación en la forma estructural de un puente, se elaboró un cuadro resumen, ordenando los modelos en base a la máxima deformación en Z:



		Al eje del tablero 15-16			
		Máx. deformación		Momento global	
		Y	Z	Torsión	Flexión
Ubicación		9	1	-	
Unidades		m	m	kNm	kNm
1	Arco central	-0.02	-0.39	-3641	129232
2	Tablero con contraflecha de 0 m	0.17	-0.55	-3909	124874
3	Tablero con contraflecha de 0.80 m	0.17	-0.58	-4010	137281
4	Tablero con contraflecha de 1.60 m	0.16	-0.60	-4102	146238
5	Arco a 90° respecto a la horizontal	0.24	-0.64	-3202	142632
6	Tablero con contraflecha de 3.20 m	0.15	-0.66	-4255	166630
7	Original: arc. lateral a 70°, cf. 2.4 m	0.16	-0.66	-4182	157223
8	Arco a 50° respecto a la horizontal	0.06	-0.74	-5623	204506
9	Arco a 30° respecto a la horizontal	-0.03	-1.11	-7171	332297
10	Arco a 10° respecto a la horizontal	0.01	-2.19	-5839	546445

Del cuadro podemos extraer algunas premisas que podrían orientar la elección formal para un puente:

Equilibrio

Calatrava acertó al considerar que el equilibrio es el corazón de la estructura resistente de un puente, ya que de las diez

variantes ensayadas, la que presenta una forma más cercana al lenguaje de las fuerzas, es el modelo con arco central. En otras palabras, la manifestación formal del lenguaje de las fuerzas que actúan en un puente es de sección simétrica.

Inercia

Para la forma estructural *arco*, la inercia es la magnitud más importante, por consiguiente es prioritario cuidar que los demás componentes del puente no resten altura efectiva al arco, dadas las siguientes reglas de proporcionalidad:

$$F \propto 1/I$$

$$I \propto H^3$$

Donde:

F: flecha

I: momento de inercia

H: altura efectiva

En el cuadro podemos ver como la deformación va aumentando a medida que se resta altura efectiva al arco, ya sea por curvatura de la plataforma o por la inclinación del arco.

CAVILACIONES

Podría seguir extendiéndome, exponiendo lo aprendido en el ejercicio de modificar intencionalmente un modelo de puente construido, ya que, abre un sinfín de posibilidades investigativas en el campo de la forma resistente. Sin embargo, el tiempo apremia y el Trabajo de Fin de Master reclama un contenido coherentemente acotado.

Del trabajo realizado, considero que la experimentación, el sumergirnos en el misterio que permite a las construcciones mantenerse en pie, es un ejercicio indispensable en la profesión, es el camino para formar la intuición, recordemos: la resolución de un problema es el fruto de una cabeza repleta de información.

En estos tiempos de superficialidad, el verdadero cambio no consiste en ir muy lejos por la superficie, pues una se parece mucho a otra; sino en ir lejos en profundidad, esas son las únicas travesías valiosas.

PALABRAS CLAVE

MORFOLOGÍA ESTRUCTURAL

«La morfología —de los elementos compositivos morfo y logía, y estos del griego μορφο- [morfo-] ‘forma’, y -λογία [-loguía] ‘tratado’, ‘estudio’, ‘ciencia’— es la disciplina que estudia la generación y las propiedades de la forma.»¹

Entendemos como morfología estructural, a la ciencia que estudia la generación y propiedades estructurales de la forma. En otras palabras, estudia la relación causal entre la forma de un tipo y su comportamiento estructural: deformaciones y esfuerzos resultantes. Pudiendo ser ambos, causa y efecto: lenguaje de fuerzas como generador de formas; y la forma, determinante del lenguaje de las fuerzas.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En el presente trabajo, análisis estructural se entiende como el proceso de obtención dimensional de las acciones de carga y agentes exteriores, a los que ha de estar sometido el tipo estructural.

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Son las fuerzas y deformaciones resultantes del modelo, una vez obtenido y aplicado el análisis estructural.

EQUILIBRIO ESTÁTICO

Tipo estructural compuesto de tal manera que produzca automáticamente unas fuerzas pasivas –reacciones de los apoyos– capaces de equilibrar las fuerzas causales –sobrecarga de uso, carga muerta, etc.–.

NOTAS

INTRODUCCIÓN

1. La introducción del nuevo lenguaje de formas de Calatrava ha planteado gran cantidad de dificultades en las distintas etapas de las obras. Dificultades de carácter técnico, económico y funcional.
2. Proviene del griego clásico *thēsaurós*, que significa almacén o tesorería. Recopilación ordenada de las soluciones técnicas y formales elaboradas y posteriormente aplicadas –más de una vez– por Calatrava. Para mayor comprensión del término véase, Alexander Tzonis, *Santiago Calatrava. Obra completa* (Barcelona: Polígrafa, 2016), 53.

CAPÍTULO I

1. Para mayor entendimiento véase, Leonardo Fernández Troyano, *Tierra sobre el agua, visión histórica universal de los puentes* (Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Calanes y Puertos, 1999).
2. Poema titulado *Al puente curvo de la barra*. Así describía Pablo Neruda al puente del arroyo Maldonado cuando siendo huésped del entonces presidente Eduardo Víctor Haedo visitaba Punta del Este en Uruguay. Fernández, op. cit., 7.

CAPÍTULO II

1. Cecilia Lewis Kausel y Ann Pendleton-Jullian, eds., *Santiago Calatrava, conversaciones con estudiantes, conferencias en el MIT* (Barcelona: Gustavo Gili, 2003), 60.
2. Datos recogidos del informe generado por la exposición del estudio Calatrava Valls S.A. en Madrid. Dirección General para la Vivienda, el Urbanismo y la Arquitectura, «Santiago Calatrava» (exposición, Sala de Exposiciones del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, del 21 de septiembre al 6 de noviembre de 1994), 27.
3. El estudio en Zúrich permanece operativo, los estudios en París, Valencia y Nueva York, cerraron. Llätzer Moix, *Queríamos un Calatrava, viajes arquitectónicos por la seducción y el repudio* (Barcelona: Anagrama, 2016), 308.
4. *Sagrada Biblia* (Barcelona: Herber, 1991), del libro de Génesis, capítulo 11, versículos del 3 al 9, 29.
5. Gabriel Davioud, uno de los arquitectos que proyectaron el Palacio del Trocadéro, en el distrito XVI, París, Francia, para la Exposición Universal de 1937. «Gabriel Davioud», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 12 de junio de 2019, https://es.wikipedia.org/wiki/Gabriel_Davioud.
6. Sigfried Giedeon, *Space, time and architecture* (Cambridge: Harvard University Press, 1976).

7. Para un mejor entendimiento sobre la influencia de la ingeniería en la obra de Calatrava, cfr. 18-24 y 28-37.
8. Para un mejor entendimiento sobre la influencia del arte en la obra de Calatrava, cfr. 24-27.
9. Philip Jodidio, nacido en Nueva Jersey en 1954. Estudió historia del arte y economía en la Universidad de Harvard. Editor y escritor de numerosos libros sobre arquitectura contemporánea. «Philip Jodidio», United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, acceso el 12 de junio de 2019, <http://whc.unesco.org/archive/websites/valencia/us/conference/participants/pgs.part/jodidio.htm>.
10. Philip Jodidio, *Santiago Calatrava 1951: arquitecto, ingeniero, artista* (Colonia: Taschen, 2007), 7.
11. Eduardo Torroja Miret, *Razón y ser de los tipos estructurales* (Madrid: EBCOMP, 2000), 2.
12. Jodidio, op. cit.
13. El prefijo *pseudo* proviene del griego ψευδο y significa falso. En este trabajo es usado para indicar que es engañoso, que parece pero no es. «Pseudo», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 12 de junio de 2019, <https://es.wikipedia.org/wiki/Pseudo>.
14. Robert Maillart, 1872 a 1940. Estudió ingeniería en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Para un mejor entendimiento sobre el trabajo de Maillart, cfr. 29-30.
15. Puente Schwandbach, se encuentra en Berna, Suiza. Construido entre 1932 y 1933. «Ficha 89. Puente Schwandbach», Construcción civil, acceso el 04 de abril de 2019, <https://historiacivil.wordpress.com/2012/12/05/ficha-89-puente-de-schwandbach/>.
16. «Pittsburgh Civic Arena», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 09 de abril de 2019, https://es.wikipedia.org/wiki/Pittsburgh_Civic_Arena.
17. «Archigram», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 09 de abril de 2019, <https://es.wikipedia.org/wiki/Archigram>.
18. «William Zuk», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 09 de abril de 2019, https://en.wikipedia.org/wiki/William_Zuk.
19. Alexander Tzonis, introducción a *Santiago Calatrava's creative process, part I: fundamentals* (Basel, Suiza: Birkhäuser, 2001), 13.
20. Félix Candela, introducción a *Arquitectura transformable* (Sevilla: Escandón, 1993), 7-8.
21. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, «Emilio Pérez Piñero, arquitectura desplegable» (exposición, Universidad Politécnica de Valencia, del 23 de abril al 23 de mayo de 2015).
22. Para mayor entendimiento véase, Ídem.
23. «Leonardo Da Vinci», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 09 de abril de 2019, https://es.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci.
24. ETSA, op. cit.

25. Richard Dawkins, Nairobi 1941. Etólogo, zoólogo, biólogo evolutivo y divulgador científico británico. «Richard Dawkins», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 12 de junio de 2019, https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Dawkins.
26. Pier Luigi Nervi, 1891 a 1979, Italia. Estudió en la Escuela de Ingeniería civil de la Universidad de Bolonia. «Pier Luigi Nervi», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 12 de junio de 2019, https://es.wikipedia.org/wiki/Pier_Luigi_Nervi.
27. Philip Jodidio, *Santiago Calatrava* (Colonia: Taschen, 2003), 26.
28. En marzo del 2012, la diputada Mónica Oltra declaraba para el programa Salvados, la preocupación del Gobierno Valenciano porque, si bien, hay una gran afluencia de turistas en la Ciudades de las Artes y las Ciencias, estos no entran a los edificios. Considera que son cascarones llamativos con desarrollos anteriores pobremente trabajados.
29. Información extraída del documental sobre las interioridades de la construcción de la Turning Torso, estructura 190 metros de altura que se tuerce sobre sí misma. Fredrik Gertten, *The socialist, the architect and the twisted tower* (Videogravación-DVD), (Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2008).

CAPÍTULO III

1. Torroja, op. cit., 1.
2. Philip Jodidio, *Santiago Calatrava 1951: arquitecto, ingeniero, artista*, op. cit., 7.
3. El componente estético había desaparecido como consecuencia de la Segunda Guerra Mundial “ya que debían reconstruirse cientos de puentes en toda Europa con mucha rapidez. De esa necesidad surgió una escuela que abogaba por crear puentes puramente funcionales. Un buen puente, era un puente simple y, sobre todo, barato”. Philip Jodidio, *Complete work 1979-2009* (Colonia: Taschen, 2009), 10.
4. Para más detalle véase, David P. Billington, “The role of science in engineering: force follows form”, en *Robert Maillart's bridges, the art of engineering* (Princeton: Princeton University Press, 1979), 91-106.
5. Para mejor comprensión véase, Eduardo Torroja Miret, *Las estructuras de Eduardo Torroja* (España: Secretaría general técnica, centro de publicaciones, Ministerio de Fomento, 1958), 3-22.
6. Véase, José Ramón Navarro Vera, “Eduardo Torroja, la arquitectura y los arquitectos”, en *La vigencia de un legado*, ed. por Carmen Jordá (Valencia: SPUPV, 2002), 183-206.
7. Colín Faber, escritor de la obra que ilustró por primera vez, toda la fecunda obra de Félix Candela en el libro titulado “Las estructuras de Candela”.
8. Colín Faber, *Las estructuras de Candela* (México D. F.: Continental, 1970), 26.
9. Por ejemplo, un cascarón de huevo que, al no necesitar resistencia a flexión, el espesor se reduce al mínimo.
10. Faber, op. cit., 21.
11. María E. Moreyra Garlock y David P. Billington, *Félix Candela, engineer, builder, structural artist* (Princeton: Yale University Press, 2009), 128.

12. Inicialmente se ejecutó de 24 m de altura, se desplomó al momento de desencofrar. Rediseñaron con 18 m, para ejecutarlo finalmente con los 21 m. Posteriormente, el primer diseño fue verificado en computadora, determinado que el fallo no fue de cálculo. Moreyra, op. cit., 138.

CAPÍTULO IV

1. Lewis, op. cit., 79.
2. Todos los datos fueron obtenidos del expediente técnico de la obra. Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte, *Proyecto de construcción de la infraestructura del tramo Alameda - Avinguda del metro de Valencia*, anejo N° 10.
3. «Desviación (%) del presupuesto en las obras de Calatrava en Valencia», *Levante, el mercantil valenciano*, 06 de marzo de 2012, acceso el 02 de mayo de 2019, <https://www.levante-emv.com/comunitat-valenciana/2012/05/08/desviacion--presupuesto-obras-calatrava-valencia/887324.html>.
4. Lewis, op. cit., 53.
5. Lewis, op. cit., 69.
6. Jodidio, op. cit., 263.
7. Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte, op. cit.
8. Para mayor información sobre las críticas a la obra de Calatrava véase, Moix, op. cit.

CAPÍTULO V

1. «El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas». «Método de elementos finitos», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 01 de julio de 2019, https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos.

CAPÍTULO VI

1. Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte, op. cit.
2. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera* (IAP) aprobada el 12 de febrero de 1998 por la Dirección General de Carreteras. Determina las clases de acciones, los coeficientes de ponderación y las combinaciones de acciones que deberán tenerse en cuenta para el proyecto de puentes de carretera cuyas luces sean inferiores a doscientos metros. La notación coincide fundamentalmente con la utilizada en la normativa europea, y las unidades corresponden al Sistema Internacional (SI). Ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras (BOE núm. 54 de 4 de marzo de 1998).

CAPÍTULO VIII

1. Las formas estructurales tradicionalmente usadas en puentes son la de arco, viga, pórtico y sustentados por cables. El Puente de la Exposición estaría dentro de la subcategoría de puente de arco superior, donde el tablero está a la altura de los arranques del arco. Para mayor entendimiento sobre las formas estructurales de los puentes véase, Fernandez, op. cit.
2. En el modelo cálculo se eliminaron los tramos laterales del puente, obteniendo mayores deformaciones por flexión: al eje del puente, la deformación en Z se incrementa entre 8 y 3 cm. En otras palabras, el apoyar los laterales en el tramo central colabora con el comportamiento estructural del puente.
3. Fernandez, op. cit., 291.
4. Curvar la plataforma incrementó las deformaciones, para mayor entendimiento, cfr. 198 – 226
5. Se compararon los resultados del modelo original con los del modelo con péndolas sin revestimiento hexagonal. La variación es despreciable en la mayoría de puntos a excepción del arco, este presenta una disminución de 4 cm en la deformada Z al eje. Concluimos que el revestimiento hexagonal es motivado únicamente por la estética, y además incrementa el peso y por tanto, la deformación del arco.
6. La tensión de Von Mises debe su nombre a Richard Edler von Mises (1913) propuso que un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasaba cierto valor. Sin embargo, el criterio fue formulado por Maxwell en 1865 y más tarde por también Huber (1904). De ahí que también se llama a la teoría de fallo elástico basada en la tensión de Von Mises como teoría de Maxwell-Huber-Hencky-von Mises y también teoría de fallo. «Tensión de Von Mises», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 14 de junio de 2019, https://es.wikipedia.org/wiki/Tensi%C3%B3n_de_Von_Mises.

CAPÍTULO IX

1. Josep Quetglas, *Artículos de ocasión* (Barcelona: Gustavo Gili, 2004), 226.
2. Antes de la Estación de Stadelhofen ya había realizando otros proyectos: fachada de la Estación de Lucerna, remodelación de colegio Wohlen, entre otros. Sin embargo, estos fueron intervenciones de menor escala y generalmente sobre edificios ya construidos.
3. «Proyectos», Santiago Calatrava, architects & engineers, acceso el 21 de junio de 2019, <https://calatrava.com/projects.html?all=yes>.
4. Pier Luigi Nicoli, crítico de arquitectura.
5. Pier Luigi Nicoli, «Cuestiones sobre Calatrava», en *Santiago Calatrava ingeniero – arquitecto*, ed. Por Werner Blaser (Barcelona: Gustavo Gili, 1989), 23.
6. Torroja, op. cit. 357.
7. Para mayor entendimiento de los efectos negativos en la función utilitaria y económica cfr. 43-44.

PALABRAS CLAVE

1. «Morfología (diseño)», Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso el 01 de julio de 2019, [https://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_\(dise%C3%B1o\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_(dise%C3%B1o)).

TABLAS

CAPÍTULO VII

Tabla 1: Carga muerta permanente, acera eje A-B y E-F	86
Tabla 2: Carga muerta permanente, calzada eje C-D	89
Tabla 3: Carga muerta permanente, parachoque eje B-C y D-E	89
Tabla 4: Carga muerta permanente, baranda eje A-B y E-F	89
Tabla 5: Espectro elástico de respuesta	92

CAPÍTULO VIII

Tabla 1: Deformación y rotación del modelo original detallado	117
Tabla 2: Tensiones Von Mises por porcentaje de puntos del modelo tridimensional	131
Tabla 3: Variación de los materiales del modelo simplificado.....	142
Tabla 4: Comparación de la deformación del modelo detallado y el simplificado	145
Tabla 5: Comparación entre los dos modelos con menor deformación: arco perpendicular a tablero y arco inclinado a 70°	152
Tabla 6: Deformación horizontal X de modelos con variación de inclinación de arco, eje 16.....	157
Tabla 7: Deformación horizontal Y de modelos con variación de inclinación de arco, eje 16	159
Tabla 8: Deformación vertical Z de modelos con variación de inclinación de arco, eje 16	161
Tabla 9: Deformación de modelos con variación de inclinación de arco, eje 16	163
Tabla 10: Deformación y rotación de modelos con distinto grado de inclinación de arco	165
Tabla 11: Axiles de arcos con distinto grado de inclinación	173
Tabla 12: Comparación transversales de axiles de arco con distinto grado de inclinación	175
Tabla 13: Deformación transversal de modelos con distinta posición de arco, eje 16	187
Tabla 14: Comparación transversal de deformaciones de modelos con distinta posición de arco, eje 16	189
Tabla 15: Deformación y rotación de modelos con distinta posición de arco	191

Tabla 16: Momentos globales del tablero: torsor M_1 y flector M_2	195
Tabla 17: Deformación horizontal X de modelos con distinta curvatura de plataforma, eje 16	205
Tabla 18: Deformación horizontal Y de modelos con distinta curvatura de plataforma, eje 16	207
Tabla 19: Deformación vertical Z de modelos con distinta curvatura de plataforma, eje 16	209
Tabla 20: Comparación transversal de modelos con distinta curvatura de plataforma, eje 16	211
Tabla 21: Deformación y rotación de modelos con distinta curvatura de plataforma	213
Tabla 22: Axiles de arcos con distinta curvatura de plataforma	221
Tabla 23: Comparación transversal de axiles de arcos con distinta curvatura de plataforma	223

LÁMINAS

CAPÍTULO VIII

Modelo original (O): detallado

Deformaciones resultantes (D)

O.D_1. Deformación en escala de colores	107
O.D_2. Cuadro de deformaciones	117

Esfuerzos resultantes (E)

O.E_3. Stresses Von Mises en escala de colores	121
O.E_4. Cuadro de Tensiones Von Mises	131
O.E_5. Axiles en flechas	133

Modelos alternativos: simplificado

Variación ángulo de inclinación del arco (VA)

Deformaciones resultantes (D)

VA.D_6. Deformación en escala de colores	153
VA.D_7. Deformación en plano cartesiano	157
VA.D_8. Línea de tendencia de la deformación	163
VA.D_9. Cuadro de deformaciones	165

Esfuerzos resultantes (E)

VA.E_10. Gráfico de axiles	171
VA.E_11. Axiles en el plano cartesiano	173
VA.E_12. Línea de tendencia de axiles	175

Variación posición del arco respecto al eje (VP)

Deformaciones resultantes (D)

VP.D_13. Deformación en escala de colores.....	183
VP.D_14. Deformación en plano cartesiano	187
VP.D_15. Línea de tendencia de la deformación	189
VP.D_16. Cuadro de deformaciones	191

Esfuerzos resultantes (E)

VP.E_17. Momentos en el plano cartesiano	195
--	-----

Variación curvatura de la plataforma (VC)

Deformaciones resultantes (D)

VC.D_18. Deformación en escala de colores	201
VC.D_19. Deformación en plano cartesiano	205
VC.D_20. Línea de tendencia de la deformación.....	211
VC.D_21. Cuadro de deformaciones	213

Esfuerzos resultantes (E)

VC.E_22. Gráfico de axiles	219
VC.E_23. Axiles en el plano cartesiano	221
VC.E_24. Línea de tendencia de axiles	223

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

1. BILLINGTON, David P. *Robert Maillart's bridges, the art of engineering*. Princeton: Princeton University Press, 1979.
2. BLASER, Werner, ed. *Santiago Calatrava ingeniero – arquitecto*. Barcelona: Gustavo Gili, 1989
3. CALATRAVA, Santiago. *Santiago Calatrava: 1990-1992*. Madrid: El Croquis, 1992.
4. CALATRAVA, Santiago y KLEIN, Bernhard. *Santiago Calatrava bahnhof Stadelhofen, Zürich*. Berlín: Ernst Wasmuth, 1993.
5. CALATRAVA, Santiago y TRAME, Umberto. *Santiago Calatrava: Quadracci Pavilion Milwaukee Art Museum*. Bologna: Compositori, 2001.
6. CANDELA, Félix; PÉREZ, Emilio; CALATRAVA, Santiago; ESCRIG, Félix y PÉREZ, Juan. *Arquitectura transformable*. Sevilla: Escandón, 1993.
7. CHARIOT, Constantin. *Santiago Calatrava: sculptures*. Bruselas: Fons Mercator, 2010.
8. COLOMBO, Monica. *Santiago Calatrava*. Barcelona: Salvat, 2010.
9. Conselleria de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte de la Comunidad Valenciana. *Santiago Calatrava: Exposición Valencia, 2-20 junio*. Valencia: Conselleria de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte, 1986.
10. FABER, Colín. *Las estructuras de Candela*. México D. F.: Continental, 1970.
11. FERNÁNDEZ TROYANO, Leonardo. *Tierra sobre el agua, visión histórica universal de los puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Calanes y Puertos, 1999.
12. FRAMPTON, Kenneth; WEBSTER, Anthony y TISCHHAUSER, Anthony. *Calatrava bridges*. Zürich: Artemis Press, 1993.
13. FRAMPTON, Kenneth; WEBSTER, Anthony y TISCHHAUSER, Anthony. *Calatrava bridges*. Basel: Birkhäuser, 1996.
14. GIEDEON, Sigfried. *Space, time and architecture*. Cambridge: Harvard University Press, 1976.
15. JODIDIO, Philip. *Complete work 1979-2007*. Colonia: Taschen, 2007.
16. JODIDIO, Philip. *Complete work 1979-2009*. Colonia: Taschen, 2009.
17. JODIDIO, Philip. *Santiago Calatrava*. Colonia: Taschen, 2003.
18. JODIDIO, Philip. *Santiago Calatrava: arquitecto, ingeniero, artista*. Colonia: Taschen, 2016.
19. JODIDIO, Philip. *Santiago Calatrava 1951: arquitecto, ingeniero, artista*. Colonia: Taschen, 2007.
20. JORDÁ, Carmen, ed. *La vigencia de un legado*. Valencia: SPUPV, 2002.
21. KISER, Kirsten. *Santiago Calatrava: the architect's studio*. Estocolmo: Arvinius, 2004.
22. LEFAIVRE, Liane; CALATRAVA, Santiago y TZONIS, Alexander. *Santiago Calatrava*. Milan: Motta, 2009.

23. LEVIN, Michael. *Santiago Calatrava, the artworks: a laboratory of ideas, forms and structures*. Basel: Birkhäuser, 2003.
24. LEWIS KAUSEL, Cecilia y PENDLETON-JULLIAN, Ann, eds. *Santiago Calatrava, conversaciones con estudiantes, conferencias en el MIT*. Barcelona: Gustavo Gili, 2003.
25. MARTÍNEZ CALZÓN, Julio. *Puentes, estructuras, actitudes*. Madrid: Turner, 2006.
26. MOIX, Llàtzer. *Queríamos un Calatrava, viajes arquitectónicos por la seducción y el repudio*. Barcelona: Anagrama, 2016.
27. MOLINARI, Luca; SAMSA, Erika y ROSELLI, Paolo. *Santiago Calatrava*. Milano: Skira, 1999.
28. MOREYRA GARLOCK, María E. y BILLINGTON, David P. *Félix Candela, engineer, builder, structural artist*. Princeton: Yale University Press, 2009.
29. POLANO, Sergio. *Santiago Calatrava: obra completa*. Madrid: Electa, 1996.
30. QUETGLAS, Josep. «Artículos de ocasión». Barcelona: Gustavo Gili, 2004.
31. *Sagrada Biblia*. Barcelona: Herber, 1991.
32. SHARP, Dennis. *Santiago Calatrava*. Londres: E&FN Spon, 1994.
33. TORROJA MIRET, Eduardo. *Las estructuras de Eduardo Torroja*. España: Secretaría general técnica, centro de publicaciones, Ministerio de Fomento, 1958.
34. TORROJA MIRET, Eduardo. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: EBCOMP, 2000.
35. TZONIS, Alexander. *Santiago Calatrava. Obra completa*. Barcelona: Polígrafa, 2016.
36. TZONIS, Alexander. *Santiago Calatrava: the Athens olympics*. Nueva York: Rizzoli, 2006.
37. TZONIS, Alexander y DONADEI, Rebeca. *Santiago Calatrava: the bridges*. Nueva York: Universe, 2005.
38. TZONIS, Alexander. *Santiago Calatrava's creative process, part I: fundamentals*. Basel, Suiza: Birkhäuser, 2001.
39. TZONIS, Alexander. *Santiago Calatrava's creative process, part II: sketchbooks*. Basel, Suiza: Birkhäuser, 2001.
40. Valencia Ciencia y Comunicación. *Santiago Calatrava: catálogo de la Exposición antológica en la Lonja de Valencia, del 31 de mayo al 30 de junio de 1993*. Madrid: El Croquis, 1993.

INFORME DE EXPOSICIÓN

1. Dirección General para la Vivienda, el Urbanismo y la Arquitectura. «Santiago Calatrava». Exposición realizada en la Sala de Exposiciones del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, del 21 de septiembre al 6 de noviembre de 1994.
2. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. «Emilio Pérez Piñero, arquitectura desplegable». Exposición realizada en la Universidad Politécnica de Valencia, del 23 de abril al 23 de mayo de 2015.

DOCUMENTO LEGAL

1. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP) Ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras (BOE núm. 54 de 4 de marzo de 1998).*

EXPEDIENTE TÉCNICO

1. Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte. *Proyecto de construcción de la infraestructura del tramo Alameda – Avinguda del metro de Valencia*, anejo N° 10.

AUDIOVISUALES

1. GERTTEN, Fredrik. *The socialist, the architect and the twisted tower* (Videogravación-DVD). Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos, 2008.

ARTÍCULO EN PERIÓDICO

1. «Desviación (%) del presupuesto en las obras de Calatrava en Valencia». *Levante, el mercantil valenciano*, 06 de marzo de 2012. Acceso el 02 de mayo de 2019. <https://www.levante-emv.com/comunitat-valenciana/2012/05/08/desviacion--presupuesto-obras-calatrava-valencia/887324.html>.

SITIO WEB

1. Construcción civil. «Ficha 89. Puente Schwandbach». Acceso el 04 de abril de 2019. <https://historiacivil.wordpress.com/2012/12/05/ficha-89-puente-de-schwandbach/>.
2. Santiago Calatrava, architects & engineers. «Proyectos». Acceso el 21 de junio de 2019. <https://calatrava.com/projects.html?all=yes>.
3. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Archigram». Acceso el 09 de abril de 2019. <https://es.wikipedia.org/wiki/Archigram>.
4. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Gabriel Davioud». Acceso el 12 de junio de 2019. https://es.wikipedia.org/wiki/Gabriel_Davioud.
5. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Leonardo Da Vinci». Acceso el 09 de abril de 2019. https://es.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci.
6. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Método de elementos finitos». Acceso el 01 de julio de 2019. https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos.
7. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Morfología (diseño)». Acceso el 01 de julio de 2019, [https://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_\(dise%C3%B1o\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_(dise%C3%B1o)).
8. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Pier Luigi Nervi». Acceso el 12 de junio de 2019. https://es.wikipedia.org/wiki/Pier_Luigi_Nervi.

9. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Pittsburgh Civic Arena». Acceso el 09 de abril de 2019. https://es.wikipedia.org/wiki/Pittsburgh_Civic_Arena.
10. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Pseudo». Acceso el 12 de junio de 2019. <https://es.wikipedia.org/wiki/Pseudo>.
11. Wikipedia, la enciclopedia libre. «Richard Dawkins». Acceso el 12 de junio de 2019. https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Dawkins.
12. Wikipedia, la enciclopedia libre. «William Zuk». Acceso el 09 de abril de 2019. https://en.wikipedia.org/wiki/William_Zuk.
13. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. «Philip Jodidio». Acceso el 12 de junio de 2019. <http://whc.unesco.org/archive/websites/valencia/us/conference/participants/pgs.part/jodidio.htm>.

CRÉDITOS FOTOGRAFÍAS Y DIBUJOS

FOTOGRAFÍAS

CAPÍTULO I

CAPÍTULO II

1. Moreyra Garlock, María E. y David P. Billington. *Félix Candela, engineer, builder, structural artist*. Princeton: Yale University Press, 2009.
2. En línea: <https://i.pinimg.com/236x/7b/21/af/7b21af9aafb55b38d638ce9efc07a681--concrete-architecture-civil-engineering.jpg>.
4. En línea: <https://i.pinimg.com/originals/f9/65/9a/f9659adb42510f00508408cbe5540bab.jpg>.
5. En línea: https://farm4.static.flickr.com/3442/3824739713_2cob322fe9.jpg.
7. En línea: https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2F4.bp.blogspot.com%2F-VGtdBt-pEOI%2FVdx8t-tARxI%2FAAAAAAABxk%2Fm6-hWze4SFM%2Fs1600%2F150807IMA-CALATRAVA-%252BEscultura%252Bturning%252BTorso.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fjjpe rezmonzon.blogspot.com%2F2015%2F08%2Fdiez-anos-del-turning-torso.html&docid=g6nN8Shx1tex_M&tbnid=vQ__kkY12WDcyM%3A&vet=10ahUKEwiYyN7nrNLhAhVd5eAKHYyvCIAQMwheKBgwGA..i&w=883&h=1447&bih=625&biw=1366&q=turning%20torso%20malmo%20escultura&ved=oahUKEwiYyN7nrNLhAhVd5eAKHYyvCIAQMwheKBgwGA&iact=mrc&uact=8.
8. En línea: http://2.bp.blogspot.com/-lO8rHs521-o/UHu2KorqFDI/AAAAAAAAASsA/1CH__A71KP0/s1600/130270101_c491636319_z.jpg.
10. En línea: <https://aamiblogdotcom.files.wordpress.com/2012/08/scan00031wsdsd.jpg>.

CAPÍTULO III

3. En línea: https://historiacivil.files.wordpress.com/2012/12/clip_image0123.jpg?w=637.
6. En línea: https://tekNahi.files.wordpress.com/2015/08/vista-tres-tribunas_v2-tif-001.jpg.
7. En línea: https://www.google.com/search?q=Paraboloide+hiperb%C3%B3lico&source=lnms&tbnm=isch&sa=X&ved=oahUKEwi8gu-yxuTiAhWQHRQKHQ6bBSMQ_AUIECgB&cshid=1560363447327624&biw=1821&bih=833&dpr=0.75#imgrc=GW_eFm-kARioxM:

9. En línea:
<https://i.pinimg.com/originals/od/e8/89/ode8893bac2935979bcf78b57bdcaf84.jpg>.

CAPÍTULO IV

1. De la autora, usando mapas base de Google.
4. En línea:
https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Ffiles1.structurae.de%2Ffiles%2Fphotos%2F5256%2F2016-07-28%2Fdsc08686.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fstructurae.net%2Fstructures%2Fla-devesa-footbridge&docid=F3fJVxIuq5VmmM&tbnid=e0IqMMjohgteXM%3A&vet=10ahUKEwj54eK62_jhAhUT5uAKHchoBTQQMwhIKAowCg..i&w=600&h=400&bih=625&biw=1366&q=puente%20devensa%20oripoll%20calatrava&ved=oahUKEwj54eK62_jhAhUT5uAKHchoBTQQMwhIKAowCg&iact=mrc&uact=8.
5. En línea:
https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2F2.bp.blogspot.com%2F-97ZCsIq6558%2FVpqboW7K_hI%2FAAAAAAAAAACAU%2F6NLrzHPN_qo%2Fs1600%2FPuente%252BItxas%252BAurre%252Bsobre%252Br%2525C3%2525ADo%252BArtibai.%252BONdarroa-VIZ%252B%2525281%252529.JPG&imgrefurl=http%3A%2F%2Fflobquirce.blogspot.com%2F2016%2F01%2Fpuente-itxas-aurre-de-ondarroa.html&docid=CUI31dpsfrWbTM&tbnid=3U6tixpQ2LyzKM%3A&vet=10ahUKEwiGyIyE3PjhAhWr6uAKHam-CFoQMwhFKAewAQ..i&w=1024&h=681&bih=625&biw=1366&q=puente%20ondarroa%20calatrava&ved=oahUKEwiGyIyE3PjhAhWr6uAKHam-CFoQMwhFKAewAQ&iact=mrc&uact=8.
6. En línea:
https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fblogs.ua.es%2Fsantiagocalatrava%2Ffiles%2F2012%2F12%2F2493309598_326d404e7d1.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fblogs.ua.es%2Fsantiagocalatrava%2F2012%2F12%2F28%2Felpuente-de-la-alameda-y-la-estacion-de-metro%2F&docid=g4vpyN2aAJS2TM&tbnid=uw-DwUhniKP5CM%3A&vet=10ahUKEwin5MHV2_jhAhUcA2MBHXk-CCsQMwhJKAowCg..i&w=500&h=375&bih=625&biw=1366&q=puente%20de%20la%20alameda%20valencia&ved=oahUKEwin5MHV2_jhAhUcA2MBHXk-CCsQMwhJKAowCg&iact=mrc&uact=8.
7. En línea: <https://chova.com/documentac/obras-de-referencia/chova-calatrava/>.
8. JODIDIO, Philip. *Santiago Calatrava*. Colonia: Taschen, 2003.

DIBUJOS

CAPÍTULO I

CAPÍTULO II

3. De la autora.
6. En línea:
<https://i.pinimg.com/originals/1e/c3/11/1ec31166d460bf5e54026292896772cf.jpg>.
9. En línea: <https://lomejordevalencia.com/images/guia/hemisferic-valencia.jpg>.

CAPÍTULO III

Todos los gráficos son de la autora.

CAPÍTULO IV

2. De la autora.
3. Bocetos de Calatrava. Liene Lefaiivre, ed., *Santiago Calatrava s creative process, part II: Sketchbooks* (Basel: Birkhäuser, 2001), 290 y 291.

CAPÍTULO V, VI, VII, VIII y IX

Todos los gráficos son de la autora.

Quiero aprovechar esta última página para agradecer a todos con los que coincidí en este poco más de un año, en el que escribí este trabajo.

«Maestro no es el que enseña, sino es el que te despierta» por eso, a David y Paco, maestros que tuve la dicha de conocer. David, no hay otra persona que sepa más de este trabajo que tú, gracias por la paciencia. Paco, gracias por las largas conversaciones que me iluminaron.

Gracias Tere, Jaclyn, Victor, Jorge y Ángela por haberse tomado el tiempo de revisar y enriquecer el trabajo con vuestras apreciaciones.

Querida Ma, querido Ro, querido Enton, querido Pa: gracias por vuestro apoyo incondicional.

Quiero aprovechar esta última página para agradecer a todos con los que coincidí en este poco más de un año, en el que escribí este trabajo.

«Maestro no es el que enseña, sino es el que te despierta» por eso, a David y Paco, maestros que tuve la dicha de conocer. David, no hay otra persona que sepa más de este trabajo que tu, gracias por la paciencia. Paco, gracias por las largas conversaciones que me iluminaron.

Gracias Tere, Jaclyn, Victor, Jorge y Ángela por haberse tomado el tiempo de revisar y enriquecer el trabajo con vuestras apreciaciones.

Querida Ma, querido Ro, querido Enton, querido Pa: gracias por vuestro apoyo incondicional.

