

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD AL ESQUIAJE
Y A LA INCLINACIÓN DE LAS ALMAS EN
PUENTES DE HORMIGÓN CON SECCIÓN EN
CAJÓN**

Autor: Ignacio Rodríguez Martín

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD AL ESVAJAJE
Y A LA INCLINACIÓN DE LAS ALMAS EN
PUENTES DE HORMIGÓN CON SECCIÓN EN
CAJÓN**

Autor:

Ignacio Rodríguez Martín

Tutor:

Antonio Martínez de la Concha

Profesor Asociado

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD AL ESVAJE Y A LA INCLINACIÓN DE LAS
ALMAS EN PUENTES DE HORMIGÓN CON SECCIÓN EN CAJÓN

Autor: Ignacio Rodríguez Martín

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

*A mis padres Francisco y María
de los Angeles.*

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que me han apoyado a lo largo de mi andadura académica hasta el día de hoy. En especial quiero agradecer a mis padres el apoyo incondicional, los consejos y la educación que me han dado desde que tengo memoria. Sin ellos no hubiera sido capaz de poder llegar a ser la persona que soy tanto en el ámbito lo personal como en lo profesional.

Querría agradecer también a aquellos profesores que desde el Colegio han ido dejando su granito de arena para mi crecimiento; su dedicación, esfuerzo y pasión por la enseñanza han sido un pilar fundamental para que el camino hasta aquí haya sido menos arduo y más frutífero.

Para acabar, no puedo olvidarme de mis hermanos, sobrinos y de los amigos que me han acompañado a lo largo de estos años. Aunque en la ingeniería es fundamental el estudio y dedicación, es imprescindible escoger momentos en los que relajarte y desconectar y, ahí han estado ellos para ayudarme a hacerlo.

Ignacio Rodríguez Martín
Estudiante de Ingeniería Civil
Sevilla, 2021

En este documento se ha realizado en primer lugar, el análisis de la influencia del ángulo de esviaje en la respuesta estructural de puentes con sección en cajón de hormigón, ampliando así los resultados que obtuvo J. Manterola en [1] a 5 esviajes: 0° , 15° , 30° , 45° y 60° . En dicho análisis, se ha procedido al estudio pormenorizado de la influencia sobre las tensiones, desplazamientos y distorsión para la carga de peso propio.

Una vez estudiado cómo afecta el esviaje a la respuesta estructural, se amplía el análisis para distintas inclinaciones de las almas de la sección. En este caso, se aplica un esviaje concreto al tablero del puente para observar la influencia de estos cambios sobre la respuesta estructural y, además, poder ampliar el estudio que realizó Sergio Cobo Pérez en su TFG: “Análisis de sensibilidad a la inclinación de las almas en las secciones tipo cajón en puentes”.

En ambos análisis se ha prestado especial atención a la forma de exponer los resultados. Se aportan gráficas y tablas complementarias para facilitar el análisis y la comprensión de estos. Asimismo, se aportan unas conclusiones acerca de los análisis realizados.

Abstract

In this document, firstly, it has performed an analysis to the influence of fleet angle in the structural response of box type section concrete bridges, thus increasing the results that J. Manterola obtained in [1] to 5 fleets angles: 0° , 15° , 30° , 45° and, 60° . In this analysis, it has gone ahead to the profound study of the influence on the stresses, displacements, and distortion for the self-weight load.

Once examined how the fleet angle effects on structural response, it expands the analysis to different inclination of the section's souls. In this case, it applies a specific fleet angle to the bridge deck to observe the weight of that changes in the structural response and, also it could expand the study that Sergio Cobo Pérez performed in his TFG: "Análisis de sensibilidad a la inclinación de las almas en las secciones tipo cajón en puentes".

In both analysis, special attention has been paid to the way of illustrated the results. Complementary graphs and tables are provided to facilitate the analysis and understanding of these. Likewise, some conclusions are provided about the performed analysis.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xii
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
2 Definición del modelo básico	3
2.1. <i>Modelo de Javier Manterola</i>	3
2.2. <i>Modelo básico de Midas Civil</i>	4
2.2.1 Tipo de modelización empleada	5
2.2.2 Caracterización de los materiales	6
2.2.3 Condiciones de contorno y cargas	6
3 Análisis de los resultados	11
3.1 <i>Comparativa con los resultados de J. Manterola</i>	11
3.1.1 Tensiones longitudinales	12
3.1.2 Desplazamientos	16
3.1.3 Distorsión	17
3.1.4 Conclusiones de la comparativa	19
3.2 <i>Influencia del esviaje en la respuesta estructural</i>	20
3.2.1 Tensiones longitudinales	20
3.2.2 Desplazamientos	29
3.2.3 Distorsión	34
3.3 <i>Influencia de la inclinación de las almas en la respuesta estructural</i>	38
3.3.1 Características de los nuevos modelos	38
3.3.2 Tensiones longitudinales	42
3.3.3 Desplazamientos	57
3.3.4 Distorsión	61
4 Conclusiones	66
5 Análisis futuros	69
Referencias	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1 Características del hormigón empleado en el modelo de Midas Civil	6
Tabla 2–2 Condiciones de contorno aplicadas al modelo básico	7
Tabla 3–1 Comparativa de los Fxx obtenidos por Manterola y, el modelo de Midas Civil en la <u>losa superior</u>	15
Tabla 3–2 Comparativa de los Fxx obtenidos por Manterola y, el modelo de Midas Civil en la <u>losa inferior</u>	15
Tabla 3–3 Resultados tras el análisis de la distorsión en la sección 1-1	19
Tabla 3–4 Resultados de FXX en la sección 2 inferior	26
Tabla 3–5 Resultados de FXX en la sección 2 superior	26
Tabla 3–6 Evolución de la distorsión de la sección 1-1 en función del esviaje del tablero	36
Tabla 3–7 Características mecánicas principales de las secciones empleadas	40
Tabla 3–8 Evolución de la distorsión de la sección 1-1 en función de la inclinación de las almas	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Geometría longitudinal del modelo empleado por J. Manterola para su análisis.	4
Figura 2-2. Geometría de la sección transversal básica que emplea J. Manterola en su análisis	4
Figura 2-3. Desglose de espesores en la sección transversal tipo	6
Figura 2-4. Condiciones de contorno en los apoyos. Vista en planta del modelo de Midas civil	7
Figura 2-5. Situación de las vigas riostras en la estructura (se trata de una distribución simétrica) [Vista isométrica de uno de los modelos]	8
Figura 2-6. Geometría en plana del modelo de Midas Civil	8
Figura 2-7. Geometría de la sección transversal extrema del modelo de Midas Civil	8
Figura 2-8. Vista isométrica del modelo de Midas Civil	9
Figura 3-1. Distribución de las secciones de interés sobre el tablero [Vista en planta]	12
Figura 3-2. Estado tensional σ_{XX} a lo largo de las secciones longitudinales 2 y 3 por J. Manterola en [1]	12
Figura 3-3. Distribución del esfuerzo F_{xx} en las secciones 2 y 3 extraída del modelo	13
Figura 3-4. Distribución de F_{xx} en la sección 2 obtenidas en Midas Civil	13
Figura 3-5. : Distribución de F_{xx} en la sección 3 obtenidas por Midas Civil	14
Figura 3-6. : Comparativa entre las distribuciones del esfuerzo F_{XX} en las secciones 2 y 3 obtenidas por J. Manterola vs nuestro modelo	14
Figura 3-7. : Corrimientos verticales obtenidos por J. Manterola	16
Figura 3-8. : Desplazamientos verticales obtenidos del modelo de Midas Civil en la sección AB.	16
Figura 3-9. : Deformada del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 45°	17
Figura 3-10. : Deformada de la sección 1-1 obtenida por J. Manterola en [1].	17
Figura 3-11. : Determinación de la distorsión de la sección 1.1 obtenida por J. Manterola junto a sus resultados.	18
Figura 3-12. : Croquis aclarativo del criterio seguido para la determinación de la distorsión del cajón	18
Figura 3-13. : Deformada de la sección 1-1 extraída del modelo de Midas Civil	19
Figura 3-14. : Situación de las secciones longitudinales de estudio	20
Figura 3-15. : Distribución de F_{XX} (tonm) en modelo 1: Esviaje del tablero 0°	21
Figura 3-16. : Distribución de F_{XX} (tonm) en modelo 2: Esviaje del tablero 15°	21
Figura 3-17. Distribución de F_{XX} (tonm) en modelo 3: Esviaje del tablero 30°	22
Figura 3-18. Distribución de F_{XX} (tonm) en modelo 4: Esviaje del tablero 45°	22
Figura 3-19. Distribución de F_{XX} (tonm) en modelo 5: Esviaje del tablero 60°	22
Figura 3-20. Distribución longitudinal del esfuerzo F_{xx} en función del esviaje (Sección 2-2 Losa <u>inferior</u>)	23
Figura 3-21. Evolución de los valores que toma el esfuerzo F_{XX} en los puntos característicos de la sección 2-2 <u>inferior</u> con el esviaje del tablero	23
Figura 3-22. Distribución longitudinal del esfuerzo F_{xx} en función del esviaje (Sección 2-2 Losa <u>superior</u>)	24

Figura 3-23. Evolución de los valores que toma el esfuerzo FXX en los puntos característicos de la sección 2-2 <u>superior</u> con el esviaje del tablero	24
Figura 3-24. Distribución de momentos flectores en viga bi-apoyada sometida a carga uniformemente repartida	25
Figura 3-25. Distribución de momentos flectores en viga bi-apoyada sometida a carga uniformemente repartida y con rigidez a giro en uno de sus extremos.	26
Figura 3-26. Distribución longitudinal del esfuerzo Fxx en función del esviaje (Sección 3-3 Losa <u>inferior</u>)	27
Figura 3-27. Evolución de los valores que toma el esfuerzo FXX en los puntos característicos de la sección 3-3 <u>inferior</u> con el esviaje del tablero	27
Figura 3-28. Distribución longitudinal del esfuerzo Fxx en función del esviaje (Sección 3-3 Losa <u>superior</u>)	28
Figura 3-29. Evolución de los valores que toma el esfuerzo FXX en los puntos característicos de la sección 3-3 <u>superior</u> con el esviaje del tablero	29
Figura 3-30. Situación de la sección AB a lo largo del tablero [Vista en planta]	30
Figura 3-31. Desplazamiento uz de la sección AB en función del esviaje del tablero	30
Figura 3-32. Evolución de los desplazamientos verticales máximos de la sección AB en función del esviaje del tablero	31
Figura 3-33. Comparativa entre desplazamientos verticales en el lado agudo y obtuso para los distintos modelos esviados analizados.	32
Figura 3-34. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 0° (desplazamientos en metros)	32
Figura 3-35. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 15° (desplazamientos en metros)	33
Figura 3-36. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 30° (desplazamientos en metros)	33
Figura 3-37. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 45° (desplazamientos en metros)	34
Figura 3-38. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 60° (desplazamientos en metros)	34
Figura 3-39. Situación de la sección 1-1 en el tablero [Vista en PLANTA]	35
Figura 3-40. Croquis aclarativo del criterio seguido para la determinación de la distorsión del cajón	35
Figura 3-41. Evolución de la distorsión de la sección 1-1 con el esviaje del tablero	36
Figura 3-42. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 0°	37
Figura 3-43. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 15°	37
Figura 3-44. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 30°	37
Figura 3-45. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 45°	37
Figura 3-46. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 60°	37
Figura 3-47. Geometría de las secciones de los modelos de estudio.	39
Figura 3-48. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas verticales.	40
Figura 3-49. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas inclinadas 75.96°.	41
Figura 3-50. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas inclinadas 63.43°.	41
Figura 3-51. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas inclinadas 53.13°.	41

Figura 3-52. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas inclinadas 45°.	41
Figura 3-53. Situación de las secciones 2-2 y 3-3 [Vista en planta]	43
Figura 3-54. Situación de la sección 2-2 y 3-3 en modelo con almas inclinadas 90° (modelo 1).	43
Figura 3-55. Situación de la sección 2-2 y 3-3 en modelo con almas inclinadas 75.96° (modelo 2).	43
Figura 3-56. Situación de la sección 2-2 y 3-3 en modelo con almas inclinadas 63.43° (modelo 3).	44
Figura 3-57. Situación de la sección 2-2 y 3-3 en modelo con almas inclinadas 53.13° (modelo 4)	44
Figura 3-58. Situación de la sección 2-2 y 3-3 en modelo con almas inclinadas 45° (modelo 5).	45
Figura 3-59. Distribución de σ_{XX} (tonm ²) en modelo 1 (inclinación de almas 90°)	46
Figura 3-60. Distribución de σ_{XX} (tonm ²) en modelo 2 (inclinación de almas 75.96°)	46
Figura 3-61. Distribución de σ_{XX} (tonm ²) en modelo 3 (inclinación de almas 63.43°)	47
Figura 3-62. Distribución de σ_{XX} (tonm ²) en modelo 4 (inclinación de almas 53.13°)	47
Figura 3-63. Distribución de σ_{XX} (tonm ²) en modelo 5 (inclinación de almas 45°)	48
Figura 3-64. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 2-2 <u>inferior</u> en función de la inclinación de las almas	48
Figura 3-65. Evolución de la tensión σ_{XX} a lo largo de la sección 2-2 <u>inferior</u> en función de la inclinación de las almas	49
Figura 3-66. Evolución del esfuerzo F_{xx} en puntos característicos de la sección 2-2 <u>inferior</u> en función de la inclinación de las almas	50
Figura 3-67. Evolución de la tensión σ_{xx} en puntos característicos de la sección 2-2 <u>inferior</u> en función de la inclinación de las almas	50
Figura 3-68. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 2-2 <u>superior</u> en función de la inclinación de las almas	51
Figura 3-69. Evolución de la tensión σ_{XX} a lo largo de la sección 2-2 <u>superior</u> en función de la inclinación de las almas	51
Figura 3-70. Evolución del esfuerzo F_{xx} en puntos característicos de la sección 2-2 <u>superior</u> en función de la inclinación de las almas	52
Figura 3-71. Evolución de la tensión σ_{xx} en puntos característicos de la sección 2-2 <u>superior</u> en función de la inclinación de las almas	52
Figura 3-72. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 3-3 <u>inferior</u> en función de la inclinación de las almas	53
Figura 3-73. Evolución del esfuerzo σ_{xx} a lo largo de la sección 3-3 <u>inferior</u> en función de la inclinación de las almas	53
Figura 3-74. Evolución del esfuerzo F_{xx} en puntos característicos de la sección 3-3 <u>inferior</u> en función de la inclinación de las almas	54
Figura 3-75. Evolución de la tensión σ_{xx} en puntos característicos de la sección 3-3 <u>inferior</u> en función de la inclinación de las almas	54
Figura 3-76. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 3-3 <u>superior</u> en función de la inclinación de las almas	55
Figura 3-77. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 3-3 <u>superior</u> en función de la inclinación de las almas	55
Figura 3-78. Evolución del esfuerzo F_{xx} en puntos característicos de la sección 3-3 <u>superior</u> en función de la inclinación de las almas	56
Figura 3-79. Evolución de la tensión σ_{xx} en puntos característicos de la sección 3-3 <u>superior</u> en función de la inclinación de las almas	56

Figura 3-80. Situación de la sección AB en el tablero [Vista en PLANTA]	57
Figura 3-81. Descensos de la sección AB en función de la inclinación de las almas	58
Figura 3-82. Evolución del descenso máximo en función de la inclinación de las almas	58
Figura 3-83. Desplazamientos globales del modelo 1 en Midas Civil: Almas verticales (desplazamientos en metros)	59
Figura 3-84. Desplazamientos globales del modelo 2 en Midas Civil: Almas inclinadas 75.96° (desplazamientos en metros)	59
Figura 3-85. Desplazamientos globales del modelo 3 en Midas Civil: Almas inclinadas 63.43° (desplazamientos en metros)	60
Figura 3-86. Desplazamientos globales del modelo 4 en Midas Civil: Almas inclinadas 53.13° (desplazamientos en metros)	60
Figura 3-87. Desplazamientos globales del modelo 5 en Midas Civil: Almas inclinadas 45° (desplazamientos en metros)	61
Figura 3-88. Situación de la sección 1-1 en el tablero [Vista en PLANTA]	61
Figura 3-89. Croquis de referencia para determinar la distorsión de la sección 1-1	62
Figura 3-90. Evolución de la distorsión de la sección 1-1 con la inclinación de las almas	63
Figura 3-91. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 1: Almas inclinadas 90° (desplazamientos en metros)	64
Figura 3-92. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 2: Almas inclinadas 75.96° (desplazamientos en metros)	64
Figura 3-93. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 3: Almas inclinadas 63.43° (desplazamientos en metros)	64
Figura 3-94. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 4: Almas inclinadas 53.13° (desplazamientos en metros)	64
Figura 3-95. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 5: Almas inclinadas 45° (desplazamientos en metros)	65

1 INTRODUCCIÓN

El nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fusión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración.

- Eduardo Torroja Miret -

De todas las estructuras encontramos en el mundo de la Ingeniería Civil o de Caminos, podemos destacar a los puentes como uno de los elementos que gran parte del imaginario popular considera como representativos de estas doctrinas. Esto no es una mera casualidad pues estas estructuras están en continuo contacto con el ciudadano: cada vez que transita por puntos icónicos de su ciudad, cada vez que necesita desplazarse,

Desde el punto de vista ingenieril, los puentes han sido elementos clave en la construcción de infraestructuras lineales para superar los accidentes geográficos del terreno, como ocurre con los ríos y valles u, otras infraestructuras como pueden ser carreteras o vías de ferrocarril.

Para conseguir estos objetivos los ingenieros de cada época han utilizado los medios tecnológicos, materiales y técnicas de construcción más punteros a su alcance. De esta manera, se ha podido llegar a construir estructuras lo suficientemente resistentes capaces de superar las condiciones geométricas que el entorno natural o metropolitano y, soportar las cargas para las que han sido diseñadas.

Por estas razones, tenemos hoy en día multitud de posibilidades a la hora de elegir tanto el material del que principalmente va a estar compuesta la estructura (usualmente, hormigón pretensado, acero o una combinación de ambas); La tipología estructural: Puentes rectos o puentes de vigas, puentes arco, puentes colgantes,

De entre todas las posibilidades, hoy en día la gran mayoría de tableros de puentes que salvan una luz pequeña o grande, y/o se encuentran localizados en las cercanías de las ciudades, se construyen predominantemente con un tipo de sección transversal: la sección en cajón.

La confección de la sección en cajón supuso un paso tecnológico natural al tablero tipo losa (maciza o aligerada) ya que, la geometría de este elemento confiere a la estructura unas características resistentes similares, pero, con una considerable reducción del volumen de materiales y, por tanto, un menor coste económico. Además, este tipo de secciones permite la ejecución de estructuras de hormigón mediante dovelas prefabricadas lo cual, ha conseguido disminuir drásticamente los tiempos de construcción de grandes viaductos.

Tal y como se cita en [1], las secciones en cajón tienen las siguientes ventajas:

- El espesor y anchura de las losas superior e inferior puede variarse para conseguir mayores cabezas de compresión donde sea necesario. Por tanto, son elementos que permiten resistir mayores momentos flectores sin aumentar en demasía el peso de la estructura.
- Al tener la sección cerrada, su comportamiento a torsión es superior a los tableros de vigas puesto que, este tipo de secciones tienen menores distorsiones y alabeos. Esto los hace aptos para soportar cargas centradas o cargas descentradas que aumenten la torsión del puente (muy importante en tableros de vías de ferrocarril).

- Al tener una rigidez transversal importante, podemos reducir el espesor de las paredes de la sección al mínimo, ahorrando así en material y cargas extras.
- Por su gran radio de giro y, relación área/inercia, son secciones muy favorables para admitir el uso de armadura de pretensado.
- Además de las propiedades resistentes, destaca su estética ya que pueden adoptar cantos variables e incluso ser curvos en planta. Por otro lado, al tener el cajón hueco, pueden alojar conducciones en su interior y, permiten la visita para las tareas de conservación de la estructura (tesado de los cables de pretensado, inspección de fisuras, revisión de coqueras, ...).

Teniendo en cuenta que este tipo de elementos deben insertarse en el territorio y que, debido a su morfología, en multitud de casos se hace necesario que el tablero de los puentes presente algún grado de esviaje: en este documento se quiere analizar la influencia del esviaje y de la inclinación de las almas de la sección, en el comportamiento estructural de los tableros oblicuos con sección en cajón de hormigón armado.

En concreto, el análisis va a sustentarse en los resultados que J. Manterola obtuvo en [1] con la intención de poder construir un primer modelo que refleje fielmente el comportamiento de este tipo de tablero. En el apartado 2 “Definición del modelo básico”, se muestran las distintas decisiones que se han ido adoptando para conformar ese primer modelo de cálculo.

A posteriori, en el apartado 3 “Análisis de los resultados”, se presentan los resultados de los distintos modelos. En este apartado encontramos: Una primera parte donde se exponen los resultados de los modelos en los que, se va variando el esviaje del tablero cuya sección tiene en todo momento las almas verticales. Esto permite la comparativa con los resultados que obtuvo J. Manterola. En una segunda parte, se exponen los resultados de los modelos en los que se ha ido variando la inclinación de las almas, manteniendo un esviaje concreto. De esta manera podemos comparar los resultados con los obtenidos por Sergio Cobo en [3]. En todo momento, se aportan los resultados más relevantes apoyados en forma de tablas y gráficas para facilitar su seguimiento, así como, unas reflexiones de lo que se observa en cada una de ellas.

En el apartado 4 “Conclusiones”, se recopilan las ideas más significativas que se extraen de los resultados obtenidos.

El documento concluye con un apartado 5 destinado a los futuros análisis que pueden completar este trabajo de fin de grado y, un apartado 6 donde se recogen a modo de referencia los documentos que se han consultado para enriquecer este TFG.

2 DEFINICIÓN DEL MODELO BÁSICO

El análisis de la influencia del esviaje en el comportamiento de un viaducto con sección en cajón de hormigón tiene como intención ampliar los resultados que D. Javier Manterola Armisen expone en el capítulo 7 de los apuntes de puentes [1]. En concreto, nos apoyamos en los resultados que el autor dispone en el apartado 7.4.1 *La viga cajón bi-apoyada*.

El autor muestra en el apartado indicado anteriormente ciertos resultados de interés en un puente con un esviaje concreto (de 45°). Nuestro primer objetivo ha sido la construcción de un modelo equivalente al que usa Javier Manterola para ampliar el estudio que recoge en [1]. De esta manera se pretende analizar la influencia del esviaje en el comportamiento estructural de viaductos con sección en cajón de almas verticales, focalizando el estudio en tres aspectos concretos:

- La influencia del esviaje en la distribución de las tensiones normales a lo largo de unas secciones concretas en la losa superior e inferior del cajón.
- La influencia del esviaje en los corrimientos/desplazamientos verticales a lo largo de la cara inferior de las almas.
- La influencia del esviaje en la distorsión del cajón que conforma el tablero del viaducto.

Una vez se ha realizado este análisis, se profundiza en el estudio del comportamiento estructural de este tipo de puentes analizando la respuesta que estos exhiben cuando para un tablero con un esviaje concreto (45° en esta ampliación), se varía las inclinaciones de las almas que componen el cajón. Se estudia el comportamiento analizando los mismos parámetros que se mencionaron anteriormente.

Para poder ampliar el estudio que hace J. Manterola en [1] sobre la influencia del esviaje en la respuesta estructural de puentes de viga cajón, el primer escollo es elaborar un modelo que replique de la mejor manera posible los resultados que el autor ilustra en sus apuntes.

Se ha empleado el programa Midas Civil [2] para la definición del modelo básico. En primera aproximación, este modelo tiene por objetivo obtener unos resultados parecidos a los de J. Manterola para así asegurar la validez de las distintas hipótesis realizadas para la construcción de este.

Una vez se validado, se pretende ampliar el estudio de la influencia del esviaje en la respuesta estructural de viaductos con sección en cajón con tablero esviado. En concreto, se analiza el efecto del esviaje de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°.

2.1. Modelo de Javier Manterola

A continuación, se ilustra la geometría en planta de la estructura (figura 2.1) y, la sección transversal básica (figura 2.2) del modelo de viaducto esviado con sección en cajón del que J. Manterola obtiene los resultados. Como se observa, el modelo consta de un tablero esviado de 32 metros de luz, 12.4 metros de anchura y, 2.025 m de canto.

En todo momento la sección transversal del viaducto es una sección en cajón de almas verticales. La losa superior está dividida en tres elementos, dos voladizos de 2.90 m de longitud transversal y 0.20 m de espesor y, un tramo central 5.80 m y 0.23 m de espesor. La losa inferior mide 6.60 m de extremo a extremo con un espesor de 0.25 m. La sección se cierra con un par de almas verticales de 0.40 m de espesor.

Tal y como recoge J.Manterola en [1], la estructura se encuentra bi-apoyada en sus extremos actuando sobre ella el peso propio de los elementos estructurales, es decir, el peso propio del tablero. Además, el autor menciona en sus apuntes la existencia de unas vigas riostras extremas que hacen las veces de diafragma del tablero, aunque, en ningún momento detalla la posición exacta de las mismas ni su espesor por lo que se ha debido de estudiar en profundidad la caracterización de este elemento para conseguir unos resultados válidos. Esto se desarrolla más adelante en este documento.

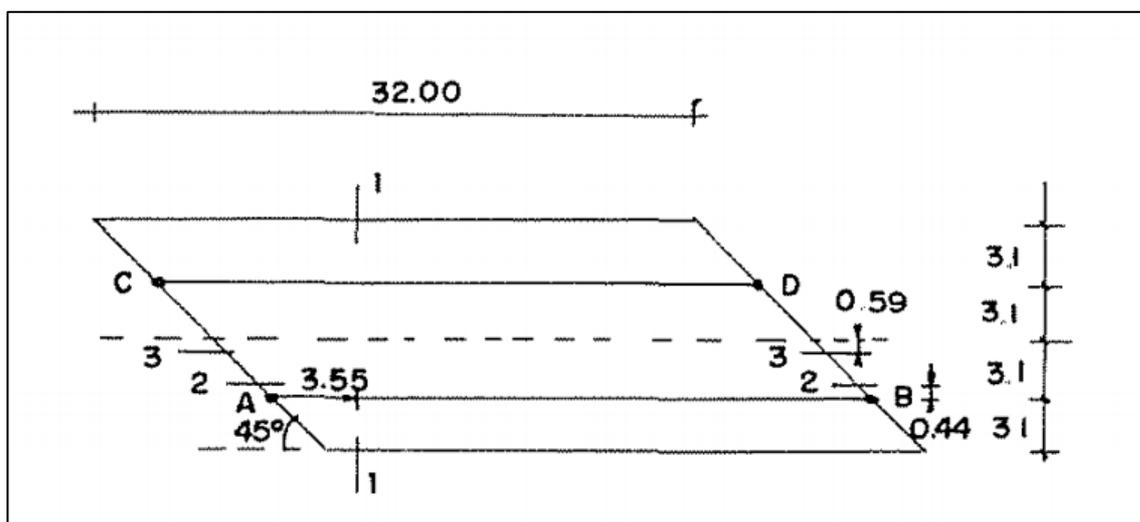


Figura 2-1. Geometría longitudinal del modelo empleado por J. Manterola para su análisis.

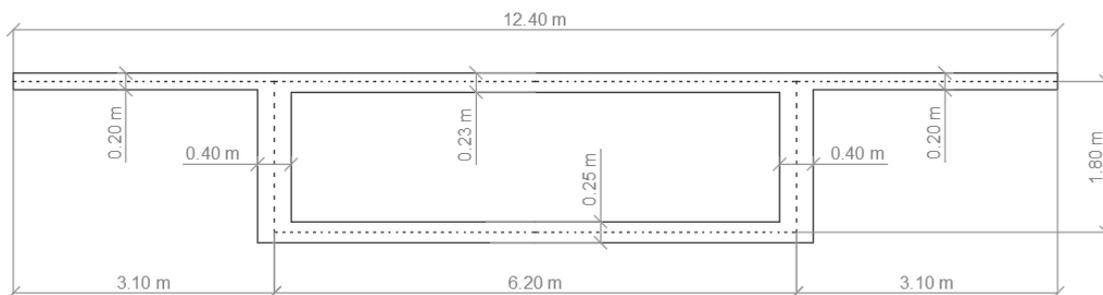


Figura 2-2. Geometría de la sección transversal básica que emplea J. Manterola en su análisis

2.2. Modelo básico de Midas Civil

2.2.1 Tipo de modelización empleada

La primera decisión de interés que se toma para la elaboración del modelo dentro del software Midas Civil [2] es la elección de un determinado tipo de elemento finito con la principal intención de que podamos obtener resultados en distintos puntos de la sección transversal con el elemento que se elija y, así poder comparar los resultados con los que obtuvo J. Manterola.

Dentro del conjunto de tipos de elementos finitos podemos encontrar, elementos tipo barra unidimensional o tridimensional (emparrillado tridimensional), elementos tipo placa, elementos sólidos, De entre todos, se ha optado por emplear elementos tipo placa (“SHELL”) ya que, es necesario conocer cómo son las tensiones en distintos puntos de las secciones del puente y, la distorsión del modelo (como se recoge en [1]). Por tanto, el modelo de elementos finito debe poder tener en cuenta la deformabilidad de la sección. Este escollo lo salvan los elementos tipo placa debido a que incorporan tanto el comportamiento a flexión como el comportamiento de membrana, es decir, este elemento tiene grados de libertad tanto en su propio plano como fuera de él.

En contraposición, los elementos barra (“BEAM”) aunque son más rápidos de modelar, resultan los más inapropiados para poder obtener los resultados deseados ya que, en este tipo de modelos la sección se resume en un punto resultando imposible conocer la variabilidad de las tensiones a lo largo de la sección.

Otros tipos de elementos finitos como los elementos sólidos tridimensionales o los emparrillados son modelizaciones válidas pues nos darían los resultados deseados. No obstante, la ejecución del modelo mediante estos elementos es mucho más compleja que con elementos tipo “shell” por lo que, comparando la velocidad de realización del modelo con los datos que son necesarios para el análisis que nos atañe, la mejor elección es la construcción de este mediante elementos tipo placa.

En conclusión, la geometría longitudinal y transversal de la estructura se ha modelizado con elementos tipo placa, cada una de las cuales está definida por tres dimensiones principales:

$a \equiv$ Anchura de la placa en dirección transversal

$b \equiv$ Dimensión de la placa en dirección longitudinal

$t \equiv$ Espesor de la placa

En este primer modelo, se decide que las placas rectangulares tengan unas dimensiones $a \cong b$ para que así los elementos finitos con los cual se va a discretizar la estructura sean capaces de arrojar resultados suficientemente precisos. Se recoge en la siguiente imagen un croquis de una sección transversal tipo en el que se desglosan los distintos espesores que se tienen en la sección transversal, así como las dimensiones “a” de las placas que la componen. En todo caso, se decide que la dimensión longitudinal de las placas (b) sea de 50 cm.

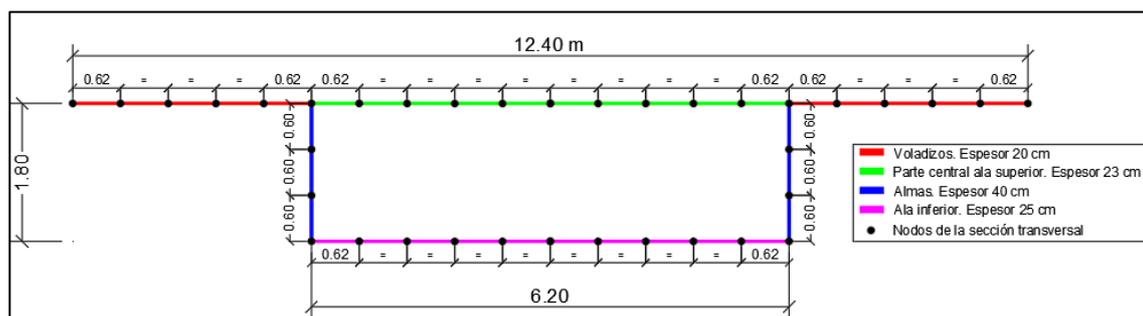


Figura 2-3. Desglose de espesores en la sección transversal tipo

2.2.2 Caracterización de los materiales

J. Manterola no indica dentro en el capítulo anteriormente citado de [1] las propiedades de los materiales que emplea en el cálculo, simplemente se cita que el material del que se constituye el puente es hormigón.

Para la obtención de estos valores se parte de la idea de realizar un proceso iterativo en el cual se variase el valor de E hasta conseguir que el nivel deformacional de la estructura coincidiera con el que J. Manterola obtuvo, en concreto, se ajusta atendiendo a las deformaciones verticales de la parte inferior del alma (sección AB en [1]).

Tras obtener los resultados y compararlos con los que obtuvo J. Manterola, las características del hormigón que hacen encajar los resultados son las que se recogen en la tabla 2.1: Se trata de un hormigón con módulo elástico de 29601.8 MPa, un módulo de Poisson de 0.2 y, un peso específico de 25 kN/m^3 .

Tabla 2-1 Características del hormigón empleado en el modelo de Midas Civil

Módulo de elasticidad (E_c)	29610.8 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0.2
Peso específico	25 kN/m^3

2.2.3 Condiciones de contorno y cargas

J. Manterola impone en su modelo que la estructura esté bi-apoyada en sus extremos. Al trasladar esta condición al modelo básico, esta se traduce en que en los apoyos de las vigas se restrinja el desplazamiento vertical.

No obstante, si solo restringimos ese desplazamiento, la estructura podría desplazarse como un sólido rígido en el plano horizontal. Apoyándonos en la ilustración siguiente (figura 2.4), además de impedir el desplazamiento vertical en los nodos correspondientes a los apoyos (1, 2, 3 y, 4) se debe impedir también el desplazamiento en “x” e “y” en uno de los extremos (1) y, en los apoyos que pertenezcan a la misma longitudinal que el anterior, hay que impedir conjuntamente el desplazamiento en dirección “y” (en 3).

En la siguiente ilustración se puede intuir en qué nodos se imponen las condiciones de contorno. En la tabla 2.2 se recogen los desplazamientos que se han restringido en cada nodo destacado.



Figura 2-4. Condiciones de contorno en los apoyos. Vista en planta del modelo de Midas civil

Tabla 2-2 Condiciones de contorno aplicadas al modelo básico

Nudos	u_x	u_y	u_z
1	Impedido	Impedido	Impedido
2	Permitido	Impedido	Permitido
3	Permitido	Impedido	Impedido
4	Permitido	Impedido	Permitido

Por último, J. Manterola recoge en [1] que la carga a la que somete al modelo en estudio es únicamente el peso propio de los elementos estructurales. En este sentido, en nuestro análisis únicamente incluimos la carga de peso propio del tablero.

2.2.3.1 Vigas riostras extremas

De acuerdo con lo que J. Manterola expone en [1], el modelo de elementos finitos debe incluir unas vigas riostras en las secciones extremas del puente. El problema es que, el autor no detalla ninguna de sus dimensiones, espesor o ubicación concreta en la sección transversal.

En consecuencia, se tiene la necesidad de encontrar una solución geométrica válida de las riostras que nos aporte unos resultados semejantes a los que obtuvo J. Manterola. Para obtener la geometría definitiva, se inició un proceso iterativo en el que se fueron probando distintas configuraciones de estas vigas hasta dar con una disposición que arrojara resultados similares. Para ello, en cada una de las distintas configuraciones comprobamos que los resultados obtenidos en la distribución de las tensiones longitudinales a lo largo de las secciones 2-2 y 3-3 que indica [1] fueran similares.

Tras el proceso iterativo, se llega a la conclusión de que las vigas riostras que J. Manterola usa en su modelo son concretamente dos vigas riostras (una por cada extremo del puente), localizadas en el interior del cajón y, tienen un espesor de 2.00 metros.

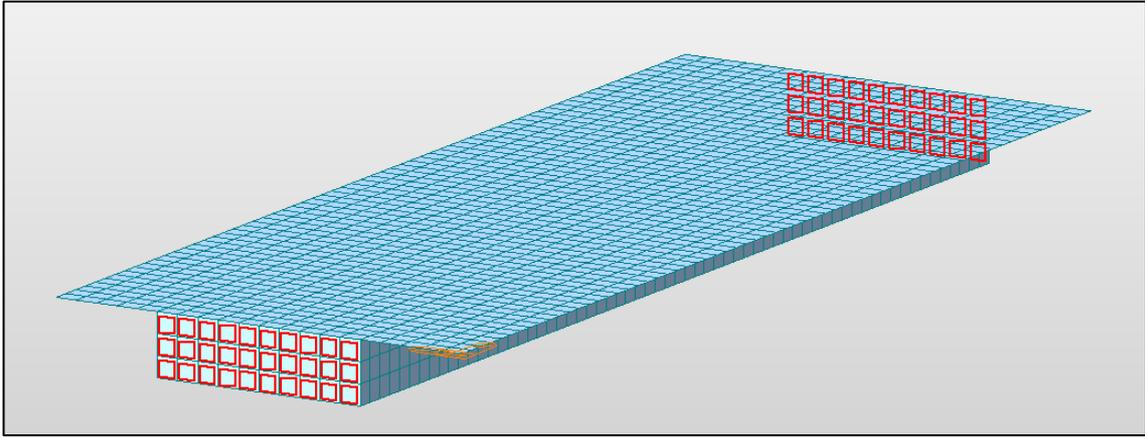


Figura 2-5. Situación de las vigas riostras en la estructura (se trata de una distribución simétrica) [Vista isométrica de uno de los modelos]

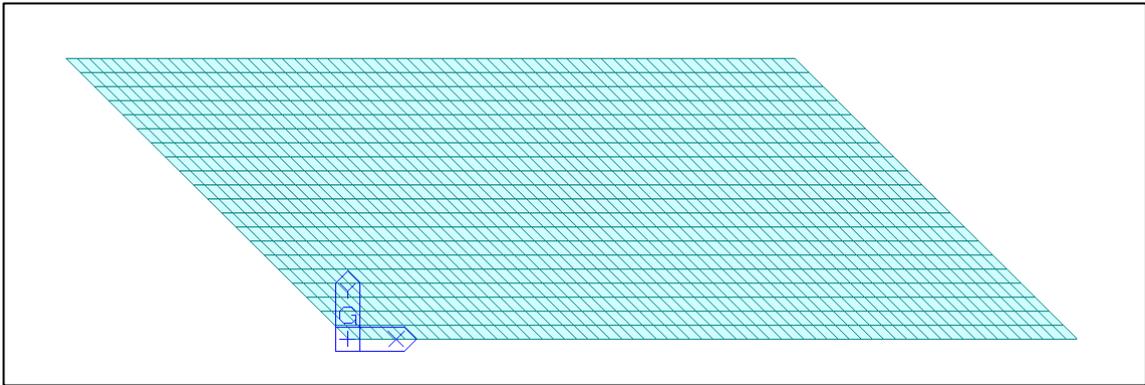


Figura 2-6. Geometría en plana del modelo de Midas Civil

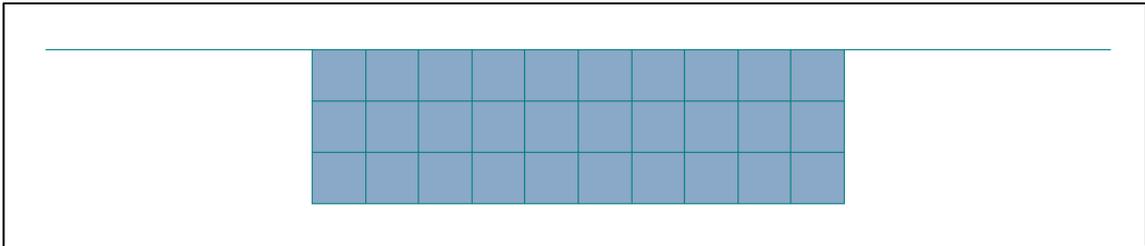


Figura 2-7. Geometría de la sección transversal extrema del modelo de Midas Civil

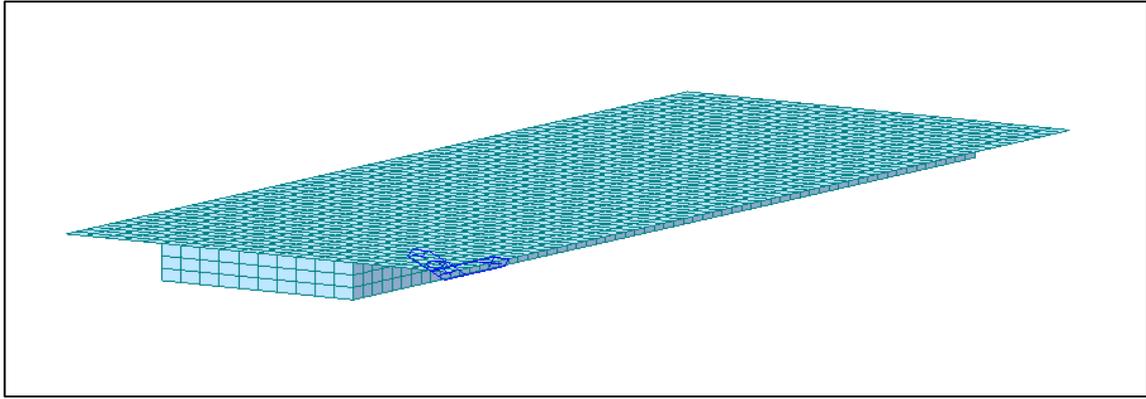


Figura 2-8. Vista isométrica del modelo de Midas Civil

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se recogen los resultados de mayor interés extraídos de cada uno de los modelos. Se descompone en tres apartados: un primer apartado donde se realiza las comparativas entre el modelo básico descrito en el capítulo 2 y los resultados que J. Manterola describe en [1]. Un segundo apartado que recoge el análisis pormenorizado de la influencia del esviaje en el comportamiento estructural de este tipo de estructuras. Por último, en el tercer apartado, se analiza la influencia que tiene la inclinación de las almas en la respuesta estructural de un tablero con un esviaje dado.

Se debe destacar que, en los tres apartados se ha seguido la misma estructura. Una primera parte donde se analiza la influencia sobre las tensiones longitudinales, una segunda en la que se analizan los desplazamientos verticales y, una tercera en la que se discute la variación en la distorsión. Además, debido a la extensión de la primera parte de cada apartado, se ha considerado relevante aportar al final de estos unas conclusiones a modo de resumen.

3.1 Comparativa con los resultados de J. Manterola

En este apartado se comparan los resultados obtenidos por J. Manterola en [1] y los que se obtienen con nuestro modelo al objeto de determinar la conformidad de este y, ampliar el estudio de la influencia del esviaje del tablero sobre el comportamiento estructural de viaductos con sección en cajón.

Como comentamos al inicio del documento, J. Manterola expone en [1] una terna de parámetros que toma como representativos de la influencia del esviaje en el comportamiento estructural de este tipo de estructuras. Así, los parámetros a los que el autor hace referencia son los siguientes:

- Tensiones longitudinales a lo largo de secciones longitudinales 2-2 y 3-3
- Corrimientos verticales según línea AB
- Distorsión de la sección 1-1

En la siguiente ilustración se muestra la situación de las distintas secciones a las que el autor hace referencia en su estudio en [1].

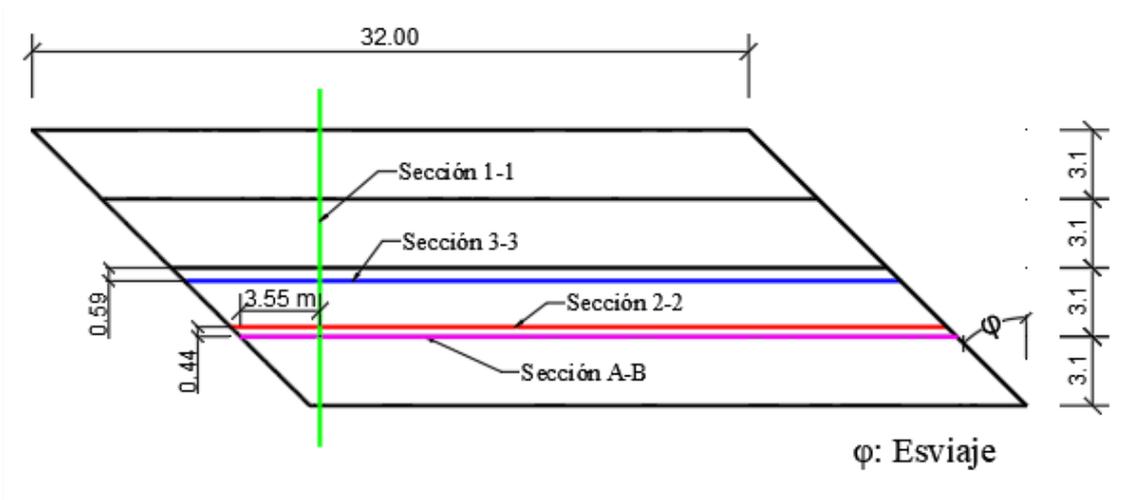


Figura 3-1. Distribución de las secciones de interés sobre el tablero [Vista en planta]

3.1.1 Tensiones longitudinales

Antes de comenzar con el análisis de las tensiones longitudinales (σ_{XX}) se debe destacar que, tras los distintos modelos realizados en Midas Civil se llega a la conclusión de que los resultados que J. Manterola expone como tensiones σ_{XX} , en realidad se ajusta mejor a fuerzas axiales por unidad de longitud dentro del modelo de placas analizado (F_{XX}), medidos en *toneladas/m*. Tras esta aclaración, en lo que sigue se ilustran los resultados del autor (figura 3-2) y, los de nuestro modelo de cálculo (figura 3-3).

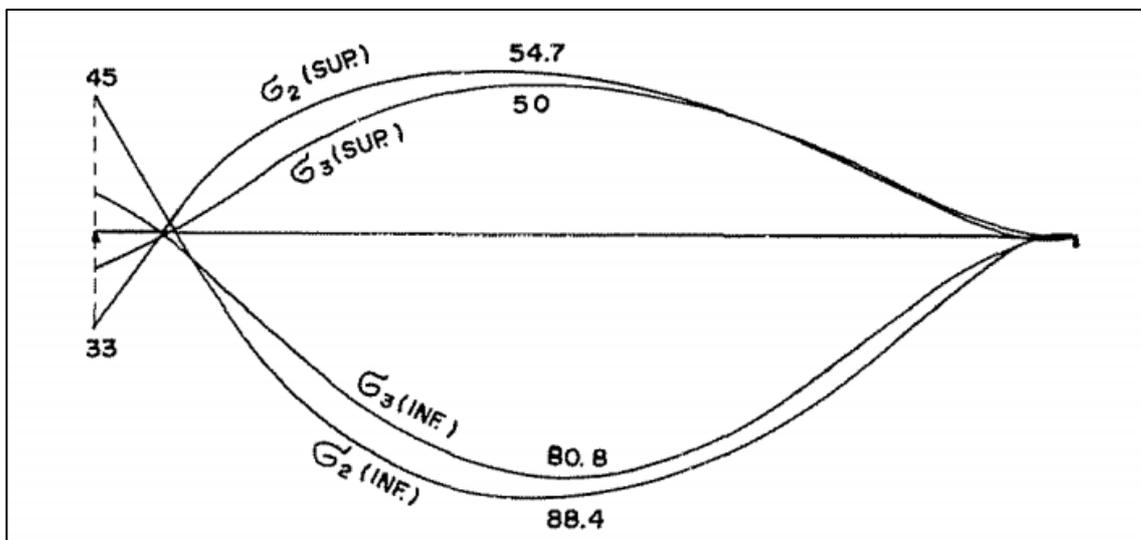


Figura 3-2. Estado tensional σ_{XX} a lo largo de las secciones longitudinales 2 y 3 por J. Manterola en [1]

Como aclaración, en la figura 3-2 se expone la distribución de las tensiones normales a lo largo de dos secciones longitudinales distintas localizadas en la parte del cajón. Lo que el autor indica por “SUP” son los resultados que obtiene en el corte con la losa superior, mientras que con “INF” los respectivos en el corte con la losa inferior para cada una de las dos secciones.

Para corroborar que nuestro modelo cumple con la tendencia de la distribución que aporta J. Manterola, hemos atendido a un par de factores:

- El valor máximo que toma la variable F_{xx} en las cercanías del punto medio de las secciones 2-2 y 3-3.
- Los valores que toma la variable F_{xx} en las secciones correspondientes a los extremos del puente.

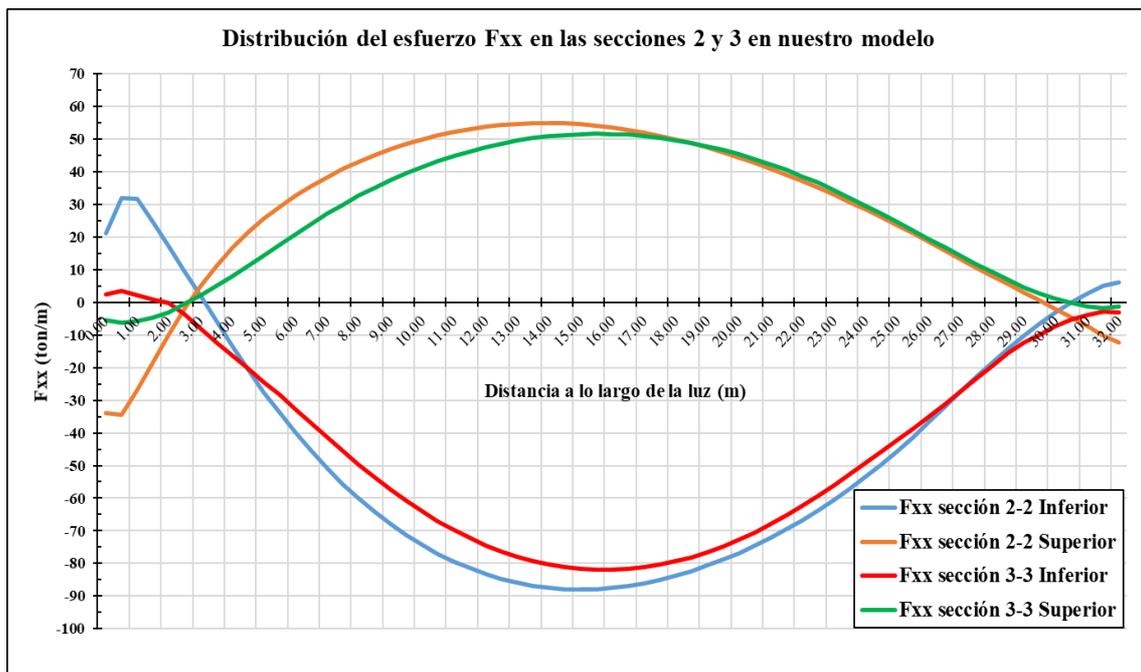


Figura 3-3. Distribución del esfuerzo F_{xx} en las secciones 2 y 3 extraída del modelo

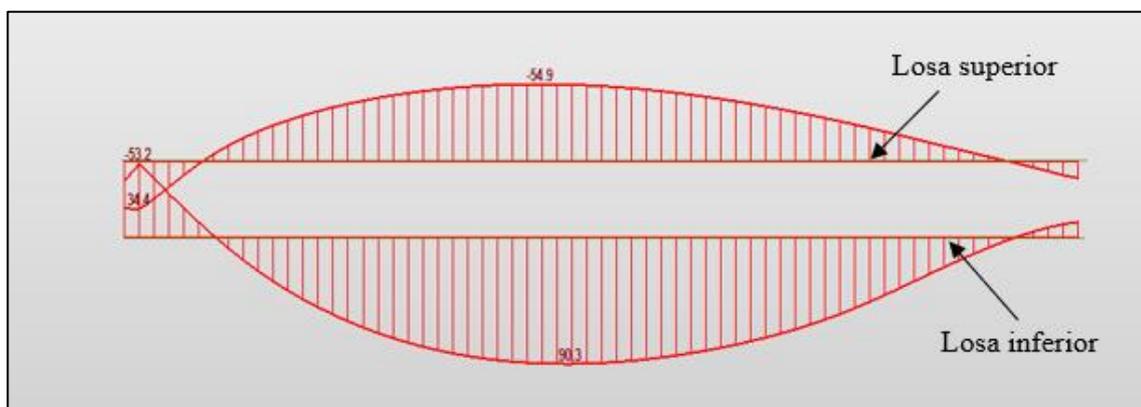


Figura 3-4. Distribución de F_{xx} en la sección 2 obtenidas en Midas Civil

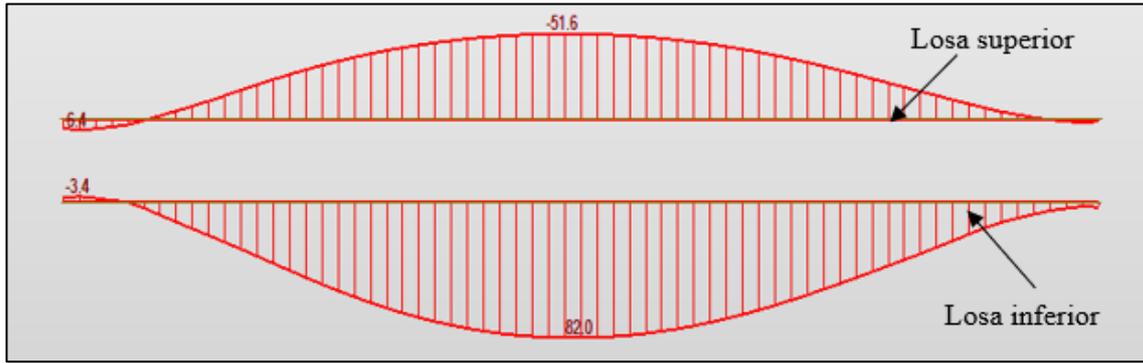


Figura 3-5. : Distribución de F_{xx} en la sección 3 obtenidas por Midas Civil

Debe destacarse que la distribución de tensiones de la figura 3-4 y 3-5 están exageradas por la forma de disponer los resultados del software. Para una mayor claridad, en la siguiente imagen se muestra una comparativa entre los resultados obtenidos por J. Manterola en [1] y, los que se extraen del modelo de Midas Civil.

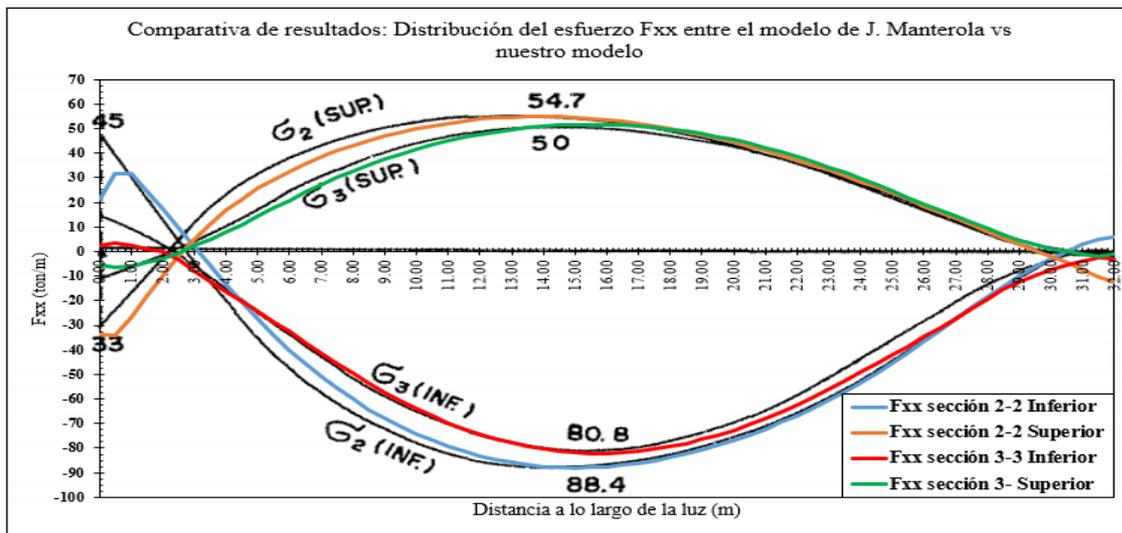


Figura 3-6. : Comparativa entre las distribuciones del esfuerzo F_{XX} en las secciones 2 y 3 obtenidas por J. Manterola vs nuestro modelo

Por último, en las tablas 3-1 y 3-2 se recogen los valores más significativos del esfuerzo F_{xx} en las secciones 2 y 3. De acuerdo con dichas tablas, se concluye que la diferencia entre los resultados obtenidos por J. Manterola y los obtenidos con nuestro modelo es mínima.

Tabla 3–1 Comparativa de los F_{xx} obtenidos por Manterola y, el modelo de Midas Civil en la losa superior

Esfuerzo F_{XX} [ton/m] en la losa superior . Esviaje 45°			
Sección de comprobación	J.Manterola	Modelo Midas Civil	Error
Sección 2: Centro	-54.7	-54.9	0.37 %
Sección 2: Extremo obtuso	33	34.4	4.24 %
Sección 3: Centro	-50	-51.6	3.20 %
Sección 3: Extremo obtuso	-	6.4	-

Tabla 3–2 Comparativa de los F_{xx} obtenidos por Manterola y, el modelo de Midas Civil en la losa inferior

Esfuerzo F_{XX} [ton/m] en la losa inferior . Esviaje 45°			
Sección de comprobación	J.Manterola	Modelo Midas Civil	Error
Sección 2: Centro	88.4	90.3	2.15 %
Sección 2: Extremo obtuso	-45	-40	11.11 %
Sección 3: Centro	80.8	82	1.49 %
Sección 3: Extremo obtuso	-	-3.4	-

Se debe aclarar que el autor J. Manterola no deja constancia de los valores que obtuvo para los esfuerzos F_{xx} en el extremo de la sección 3-3. En este sentido, se ha tomado la decisión de no considerar estos valores en la comparativa por ello, no aparecen resultados en la columna pertinente a la “Sección 3: Extremo Obtuso” en las tablas anteriores.

3.1.2 Desplazamientos

Como se expone en [1], J. Manterola obtuvo los siguientes desplazamientos verticales en la sección A-B localizada en la parte inferior del alma de la viga cajón.

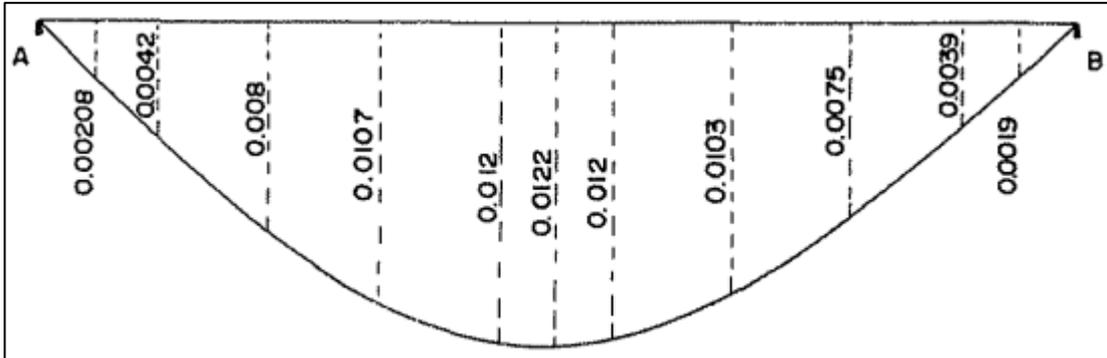


Figura 3-7. : Corrimientos verticales obtenidos por J. Manterola

Los desplazamientos verticales " u_z " que obtenemos del modelo de Midas Civil en la parte inferior del alma de la sección AB, se muestran en la figura siguiente.

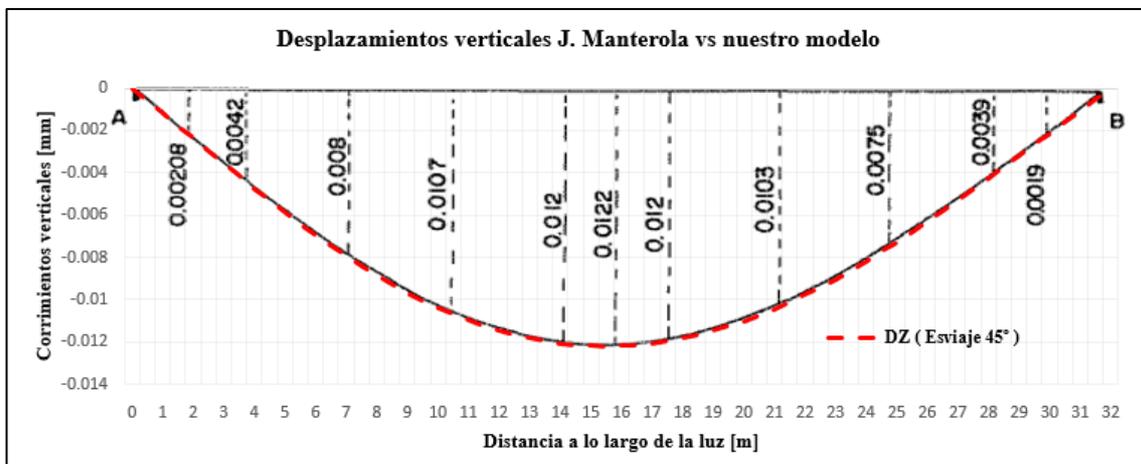


Figura 3-8. : Desplazamientos verticales obtenidos del modelo de Midas Civil en la sección AB.

En la imagen anterior, la línea a trazos de color rojo representa los desplazamientos verticales que obtenemos con el modelo de elementos finitos en Midas Civil. Como puede advertirse, la superposición de ambas gráficas es prácticamente idéntica validando en este sentido los resultados de nuestro modelo con los que obtuvo J. Manterola en su estudio.

Se debe destacar que no podemos afinar más el modelo en cuanto a los corrimientos verticales debido a que, J. Manterola no indica las coordenadas de los puntos en los que obtuvo los desplazamientos verticales.

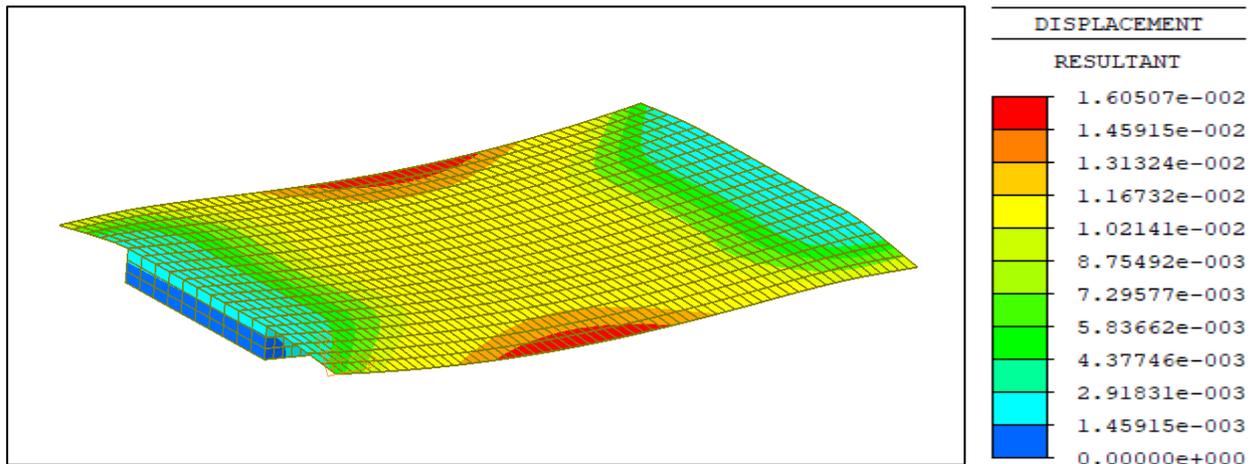


Figura 3-9. : Deformada del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 45°

3.1.3 Distorsión

El último parámetro del que J. Manterola expone resultados es la distorsión de la sección 1-1 de su modelo. Debe destacarse que, el autor toma el criterio de signos que se muestra en la figura 3-11 para determinar la distorsión de dicha sección, en nuestro estudio se ha empleado el mismo criterio de signos.

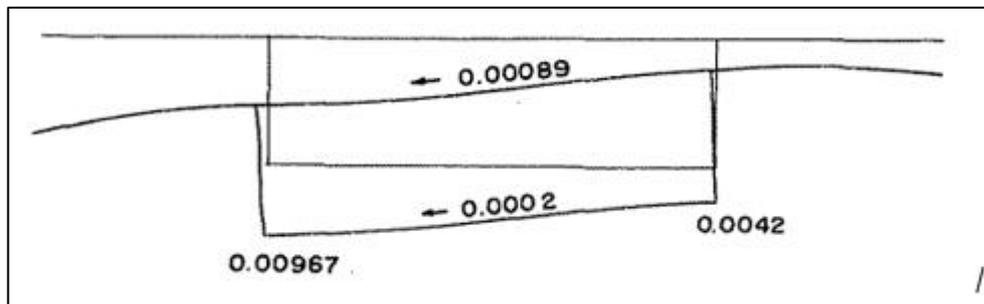


Figura 3-10. : Deformada de la sección 1-1 obtenida por J. Manterola en [1].

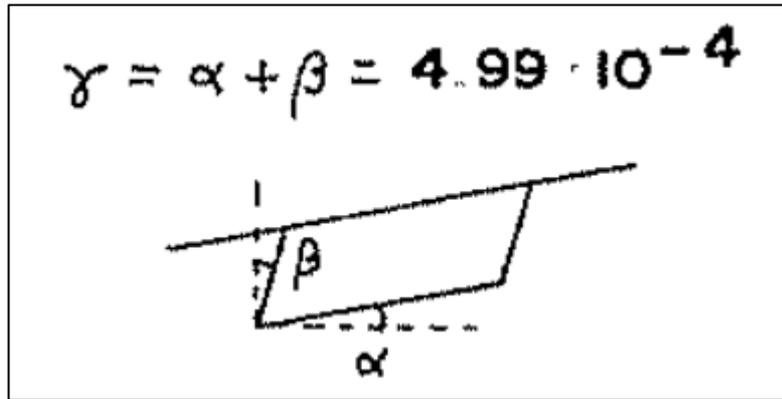


Figura 3-11. : Determinación de la distorsión de la sección 1.1 obtenida por J. Manterola junto a sus resultados.

Al analizar los desplazamientos en la sección 1-1 dentro del modelo de Midas Civil y obtener los ángulos “ α ” y “ β ” que J. Manterola indica en el cálculo de la distorsión, llegamos a la conclusión de que realmente ese parámetro lo obtiene de acuerdo con la expresión que se expone a continuación en la cual se tiene en cuenta la deformación de cada una de las aristas que conforma el cajón respecto de su posición indeformada.

$$\text{Distorsión} = \frac{(\alpha + \beta) + (\gamma + \delta)}{2}$$

El significado de cada uno de los ángulos que aparece en la expresión anterior se indica en la siguiente imagen (figura 3-12).

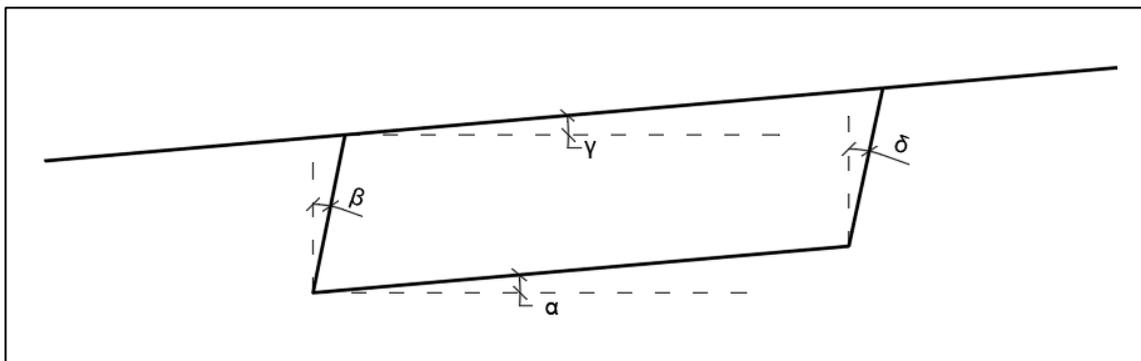


Figura 3-12. : Croquis aclarativo del criterio seguido para la determinación de la distorsión del cajón

Para obtener el valor de los distintos ángulos se ha empleado convenientemente los desplazamientos en la sección transversal de los cuatro vértices que conforman el cajón. Los resultados que se obtienen se recogen en la tabla 3-3.

Distorsión de la sección 1-1 para esviaje de 45°			
	J. Manterola	Modelo Midas Civil	Error (%)
α [rad]	-	0.000908	-
β [rad]	-	-0.000428	-
γ [rad]	-	0.000909	-
δ [rad]	-	-0.000407	-
Distorsión [rad]	0.000499	0.000491	1.62%

Tabla 3-3 Resultados tras el análisis de la distorsión en la sección 1-1

Tras analizar los resultados de la distorsión, se aprecia que el modelo de Midas Civil obtiene una distorsión prácticamente idéntica a la que obtuvo J. Manterola.

Por último, en la siguiente imagen se puede apreciar la deformada real de la sección 1-1 en el modelo de Midas Civil.

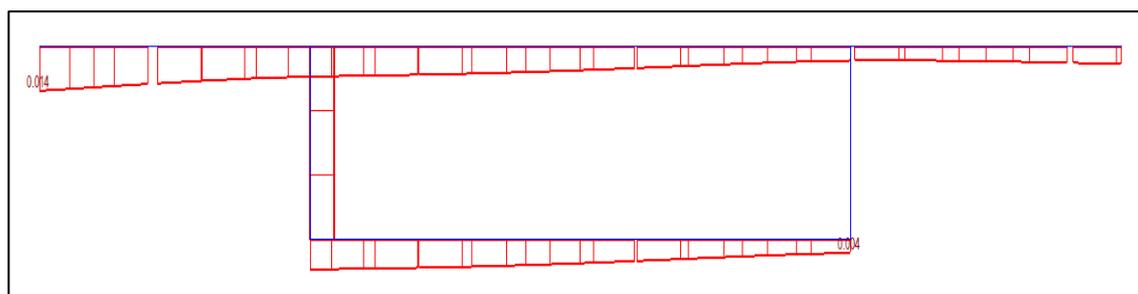


Figura 3-13. : Deformada de la sección 1-1 extraída del modelo de Midas Civil

3.1.4 Conclusiones de la comparativa

En base a los resultados que se han analizado en este capítulo, podemos concluir que nuestro modelo de Midas Civil consigue replicar el modelo que J. Manterola expone en [1].

Se debe tener presente que las disconformidades entre ambos modelos pueden asociarse al desfase tecnológico que existe entre el modelo de elementos finitos del que J. Manterola extrae los resultados y el nuestro. Ciertamente, cuando el autor empleó la técnica de elementos finitos para construir su modelo, la capacidad computacional era inferior a la actual por lo que al usar un número menor de elementos finitos los resultados pueden variar levemente.

Con todo esto, se concluye que el modelo que se ha desarrollado en Midas Civil es válido para la ampliación del estudio de la influencia del esviaje en el comportamiento estructural de viaductos con secciones tipo cajón de hormigón.

3.2. Influencia del esviaje en la respuesta estructural

Una vez se ha ajustado el modelo de elementos finitos, en este capítulo nos centramos en la primera parte en exponer cómo cambian los parámetros estudiados con anterioridad al variar el esviaje del tablero. En concreto, se obtienen los resultados para los esviajes de 0°, 15°, 30°, 45° y 60°.

Posteriormente en este capítulo, se analiza la respuesta estructural del puente cuando se va variando la inclinación de las almas.

En todo momento estudiamos la evolución de los siguientes parámetros:

- La influencia del esviaje en la distribución de los esfuerzos longitudinales por unidad de longitud a lo largo de las secciones 2-2 y 3-3 tanto en la losa superior como en la inferior del cajón.
- La influencia del esviaje en los corrimientos/desplazamientos verticales a lo largo de la cara inferior de las almas (sección AB).
- La influencia del esviaje en la distorsión del cajón que conforma el tablero del viaducto (sección 1-1).

Para todos los casos se emplea el mismo modelo de elementos finitos descrito hasta ahora con la salvedad de la variación en la geometría del puente que ocurre cuando se va variando el esviaje del tablero o, de la inclinación de las almas según corresponda.

3.2.1 Tensiones longitudinales

En primer lugar, se pretende analizar la influencia del esviaje en las tensiones longitudinales que aparecen en la estructura. Por consistencia al desarrollo que se ha tenido hasta ahora, se mostrarán los resultados en las secciones 2-2 y 3-3 que destaca en sus apuntes J. Manterola como secciones de interés.

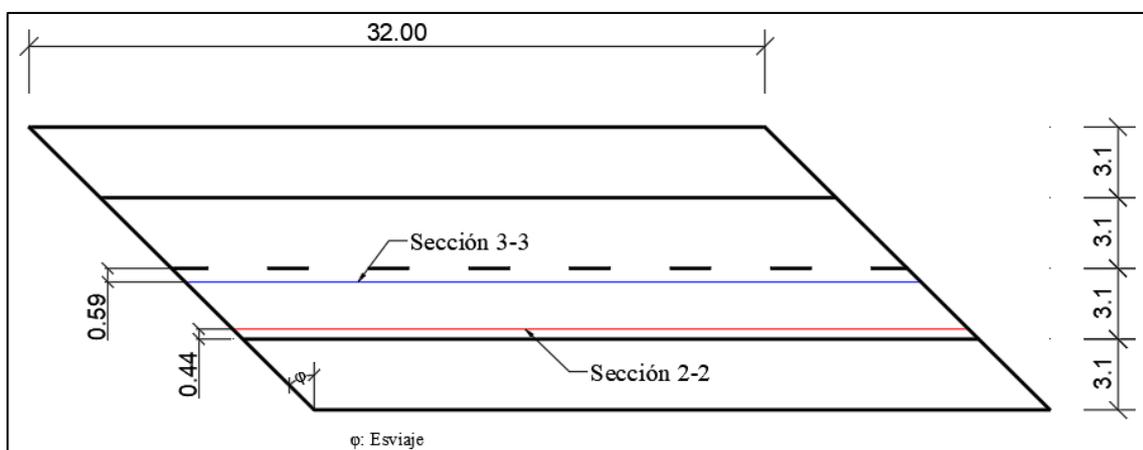


Figura 3-14. : Situación de las secciones longitudinales de estudio

En los siguientes apartados se ilustran la distribución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de las secciones 2-2 y 3-3 conforme varía el esviaje. Se aportan también en cada caso una gráfica que recoge la evolución del valor que toma dicho esfuerzo en los puntos más significativos del modelo como son los valores máximos, mínimos y, los valores que alcanza en el extremo obtuso y agudo en cada caso.

A continuación, se muestra la distribución global de este esfuerzo en cada uno de los modelos:

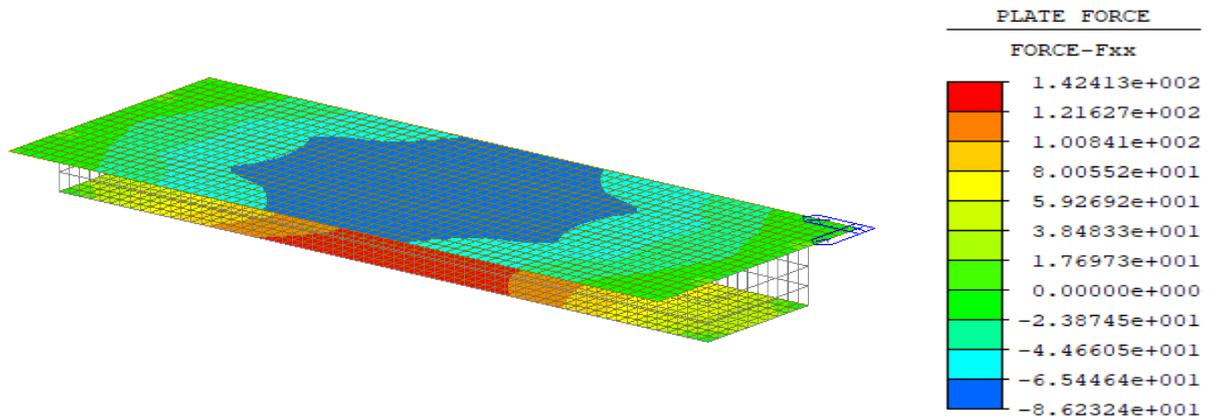


Figura 3-15. : Distribución de F_{xx} (ton/m) en modelo 1: Esviaje del tablero 0°

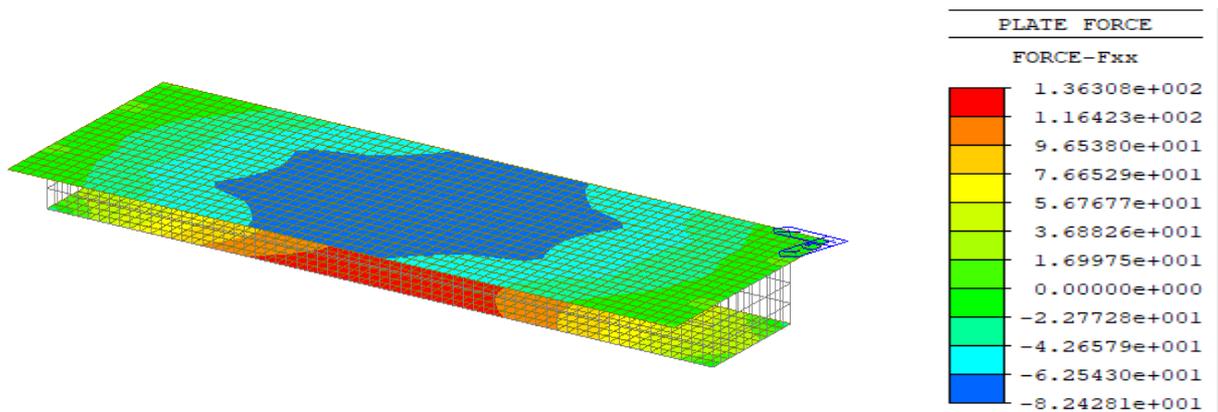


Figura 3-16. : Distribución de F_{xx} (ton/m) en modelo 2: Esviaje del tablero 15°

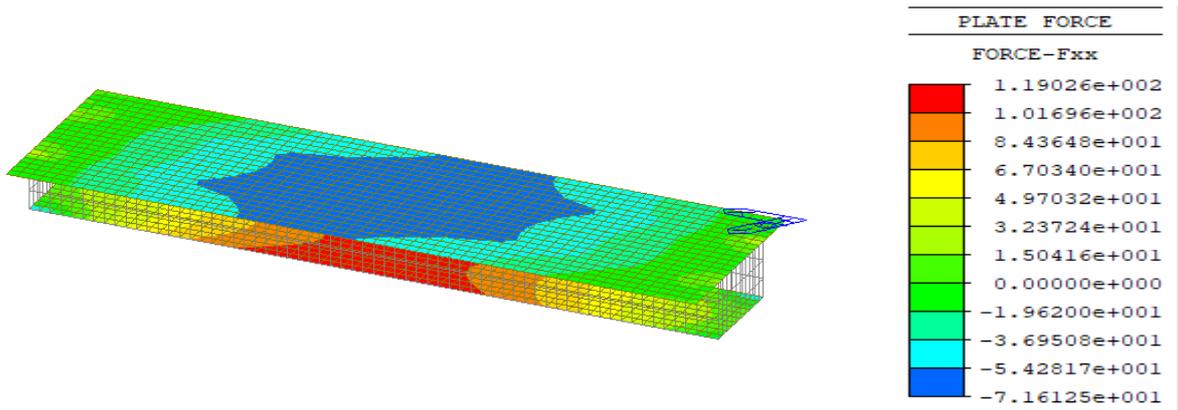


Figura 3-17. Distribución de F_{XX} (ton/m) en modelo 3: Esviaje del tablero 30°

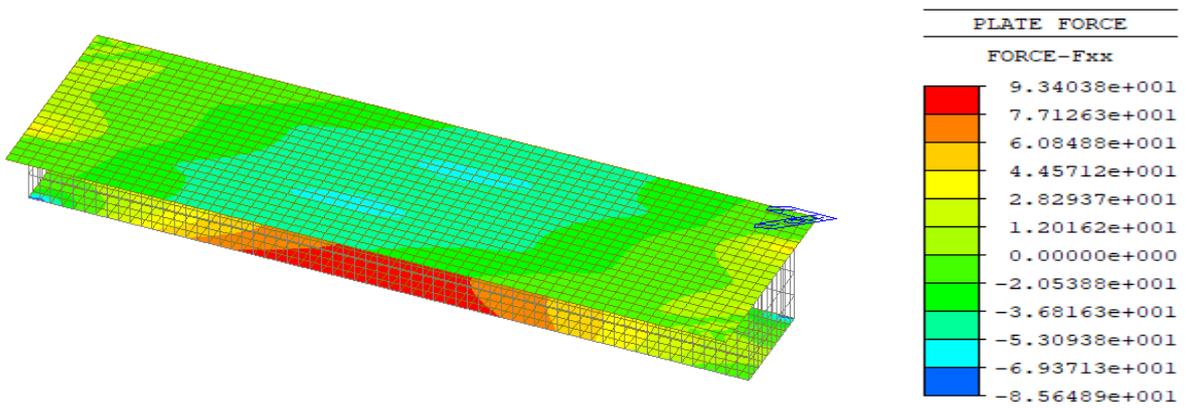


Figura 3-18. Distribución de F_{XX} (ton/m) en modelo 4: Esviaje del tablero 45°

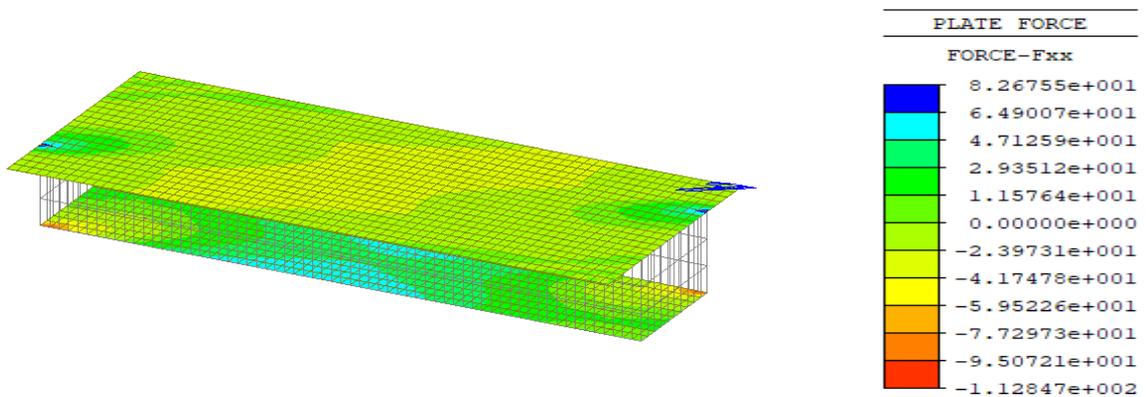


Figura 3-19. Distribución de F_{XX} (ton/m) en modelo 5: Esviaje del tablero 60°

3.2.1.1 σ_{XX} en la sección 2-2 Inferior

En la siguiente ilustración (figura 3-20), se recoge la evolución del esfuerzo F_{XX} a lo largo de la sección 2-2 en la losa inferior para cada uno de los esviajes considerados. Además, se aporta la gráfica 3-21 con la que puede seguirse mejor la evolución de dicho esfuerzo.

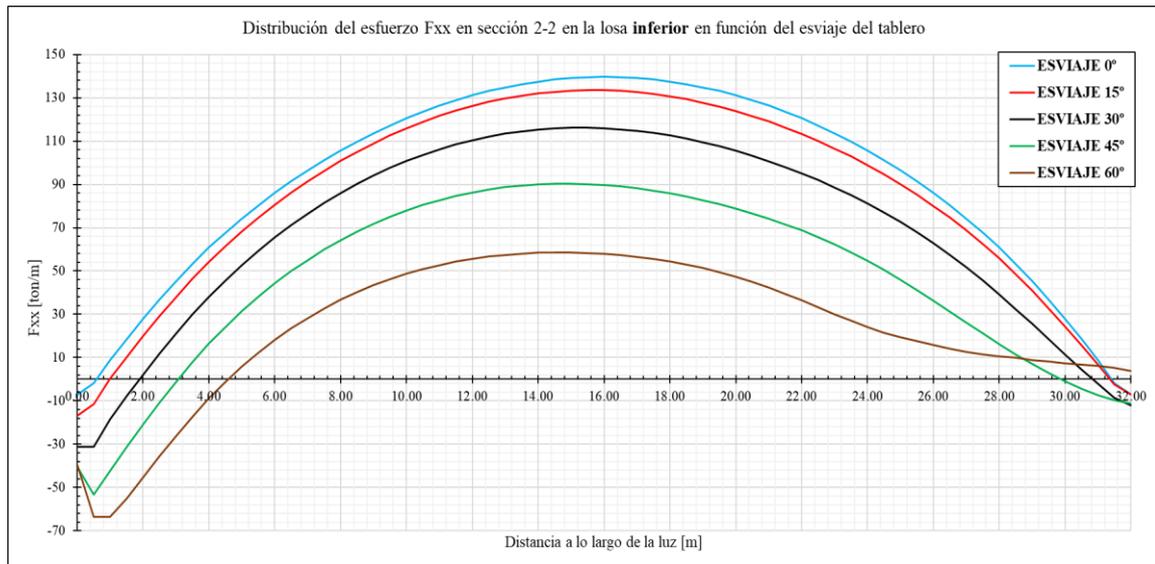


Figura 3-20. Distribución longitudinal del esfuerzo F_{xx} en función del esviaje (Sección 2-2 Losa inferior)

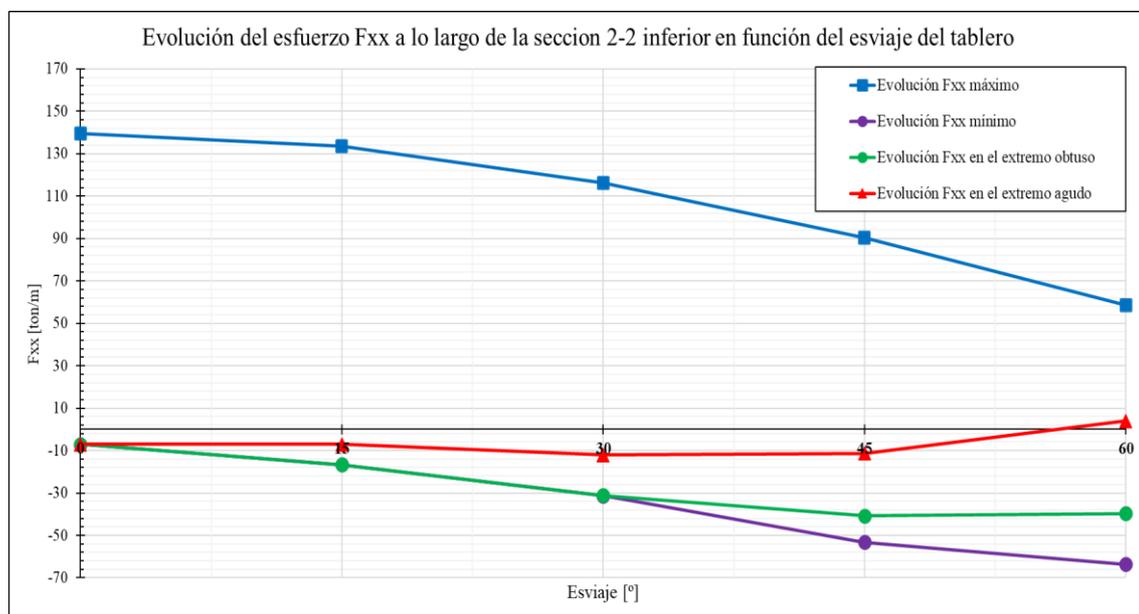


Figura 3-21. Evolución de los valores que toma el esfuerzo F_{xx} en los puntos característicos de la sección 2-2 inferior con el esviaje del tablero

De acuerdo con la gráfica 3-20, la distribución del esfuerzo es similar para los modelos estudiados si bien, deja de ser simétrica conforme el esviaje del tablero aumenta.

Se puede observar que existe una clara influencia del esviaje del tablero sobre el valor máximo que alcanza el esfuerzo en esta sección, siguiendo una tendencia a la baja conforme aumenta el esviaje.

Como puede observarse en ambas figuras, los valores mínimos del esfuerzo F_{XX} se encuentran entorno al extremo obtuso del tablero siguiendo una tendencia contraria a la anterior, es decir, el mínimo en valor absoluto va aumentando conforme aumenta el esviaje del tablero.

3.2.1.2 σ_{XX} en la sección 2-2 Superior

En las siguientes graficas se ilustra la evolución del esfuerzo F_{XX} a lo largo de la sección 2-2 en la losa superior el tablero.

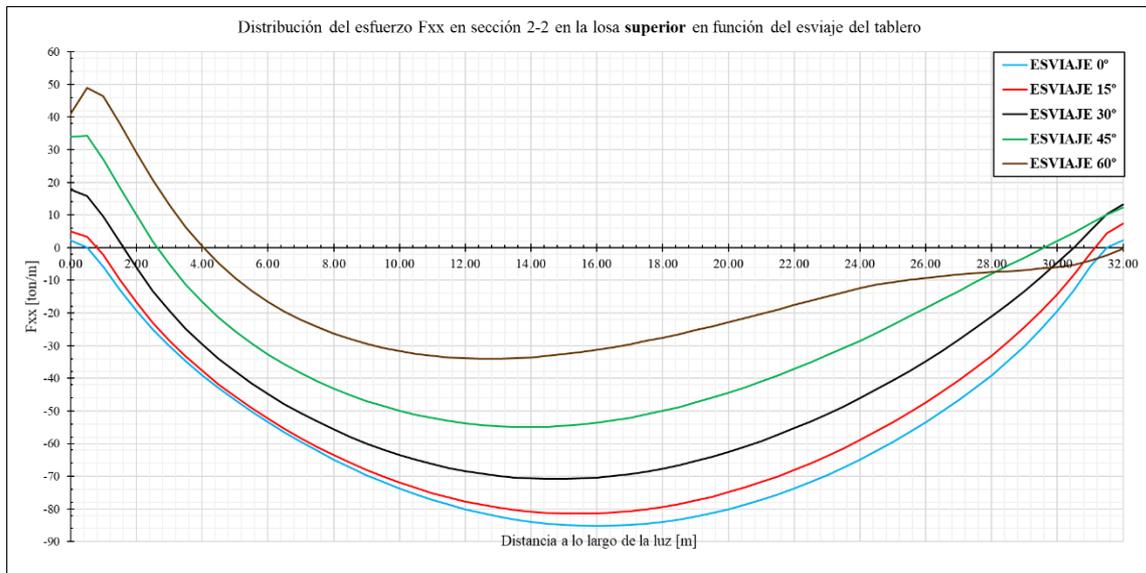


Figura 3-22. Distribución longitudinal del esfuerzo F_{XX} en función del esviaje (Sección 2-2 Losa superior)

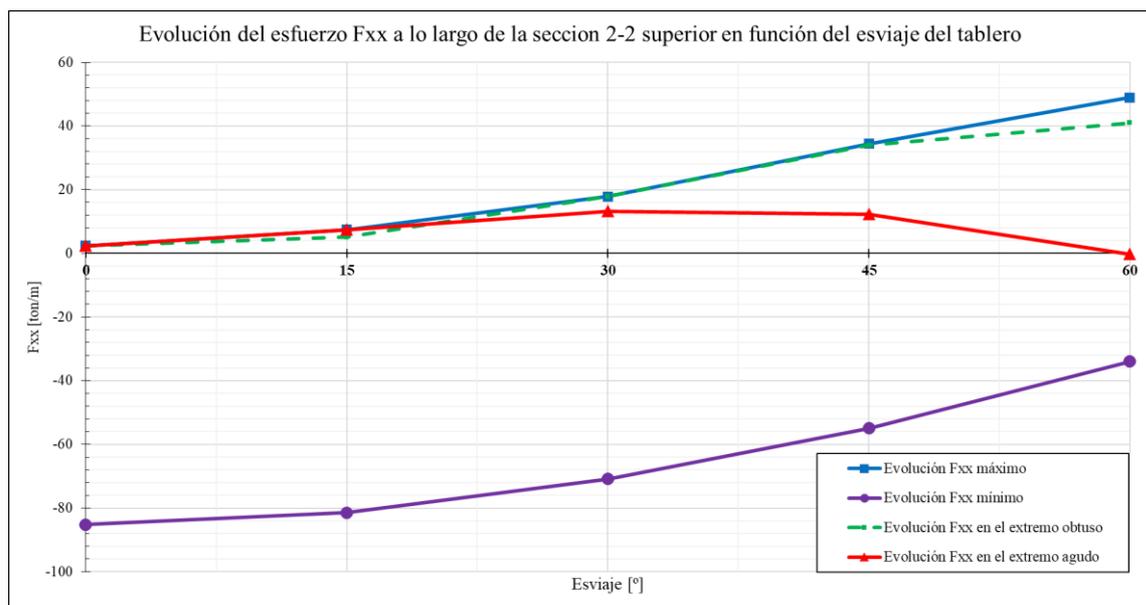


Figura 3-23. Evolución de los valores que toma el esfuerzo F_{XX} en los puntos característicos de la sección 2-2 superior con el esviaje del tablero

En primer lugar, se observa como la distribución del esfuerzo en la sección 2-2 superior adopta valores de signo contrario a los que se tienen en la losa inferior lo cual, sigue la idea de que bajo la distribuida del peso propio la losa superior debe estar en su mayoría comprimida mientras que la losa inferior debe estar traccionada.

Puede observarse como la distribución del esfuerzo es nuevamente simétrica para el tablero recto, pero, empieza a distorsionarse conforme el esviaje de este aumenta.

Se observa en la figura 3-23 como el esviaje tiene de nuevo una clara influencia en la evolución del valor de las máximas tracciones y compresiones. En este caso se tiene que las máximas compresiones disminuyen conforme aumenta el esviaje.

Además, se repite el pico tensional que se observaba en la cercanía del extremo obtuso (como ocurre con la losa inferior). En este caso lo que se tienen son tracciones elevadas que aumentan conforme lo hace el esviaje del tablero.

Observando más detenidamente los resultados obtenidos en la losa superior e inferior de la sección 2-2, se intuye como la distribución correspondiente al modelo sin esviaje es aproximadamente la misma que tendría una viga bi-apoyada (distribución parabólica con máximo en el punto medio del vano, figura 3-24). Lo que parece que sucede es que el esviaje hace que en el extremo obtuso aumente la rigidez al giro de esa estructura bi-apoyada (como si en ese extremo se colocase un muelle que incrementara la rigidez al giro, figura 3-25) por ello, conforme el esviaje aumenta, van concentrándose las tensiones en el extremo obtuso, (va aumentando la rigidez del muelle).

Este comportamiento se hace más evidente si observamos lo que ocurre con los valores de F_{xx} máximo y, los comparamos con los obtenidos en el extremo obtuso. Según las tablas siguientes, la distancia entre el máximo / mínimo (según la parte superior o inferior) y, el valor que toma el esfuerzo en el extremo obtuso es aproximadamente constante (denotada como “H” en las figuras 3-24 y 3-25) para todos los esviajes tal y como ocurre para una barra sometida a una carga uniformemente distribuida (figura 3-24). Apareciendo la concentración de esfuerzos en el extremo obtuso por el fenómeno que se ha explicado en el párrafo anterior.

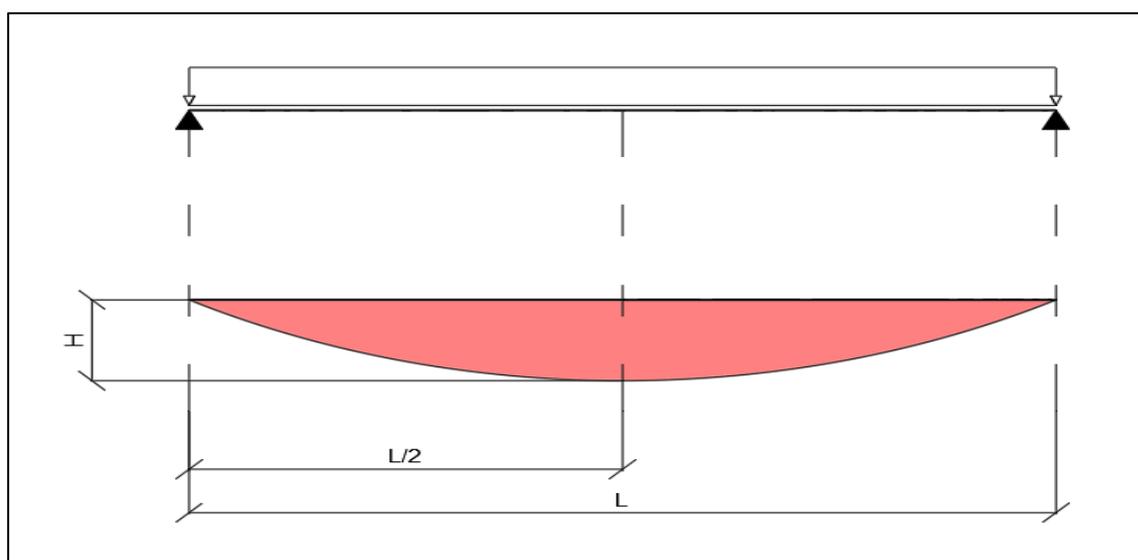


Figura 3-24. Distribución de momentos flectores en viga bi-apoyada sometida a carga uniformemente repartida

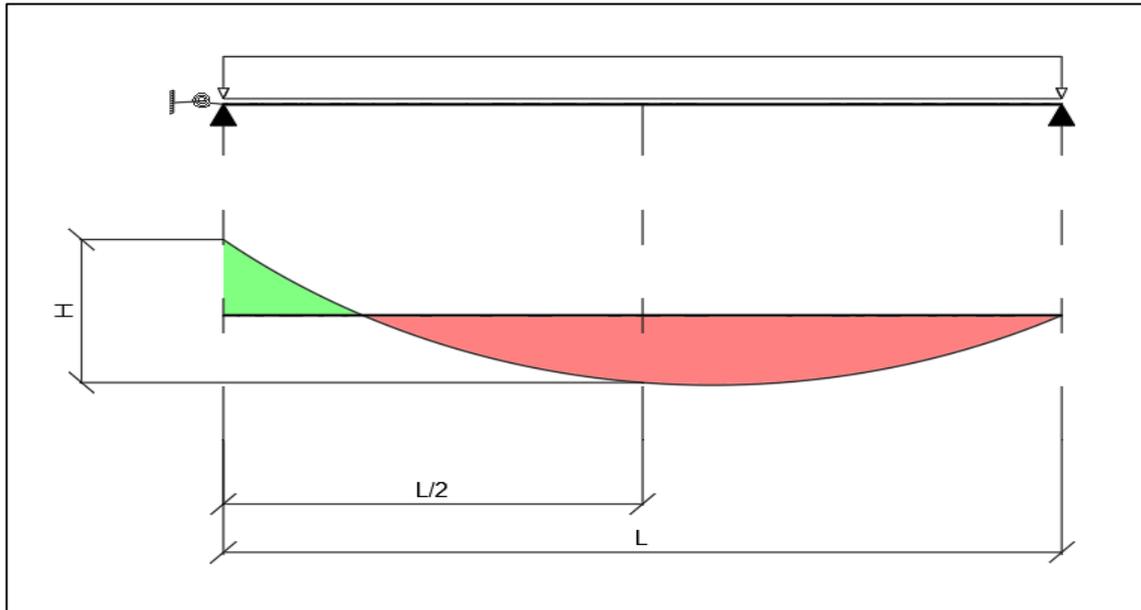


Figura 3-25. Distribución de momentos flectores en viga bi-apoyada sometida a carga uniformemente repartida y con rigidez a giro en uno de sus extremos.

Tabla 3-4 Resultados de F_{XX} en la sección 2 inferior

Comparativa entre valores máximos y mínimos alcanzados por F_{XX} [ton/m] en la losa inferior en función del esviaje					
	0°	15°	30°	45°	60°
F_{XX} máximo	139.65	109.98	116.15	90.32	58.57
F_{XX} mínimo	-7.11	-41.43	-31.27	-53.17	-63.61
Distancia máx – mín	146.76	151.10	147.42	143.49	122.18

Tabla 3-5 Resultados de F_{XX} en la sección 2 superior

Comparativa entre valores máximos y mínimos alcanzados por F_{XX} [ton/m] en la losa superior en función del esviaje					
	0°	15°	30°	45°	60°
F_{XX} máximo	2.32	33.78	17.84	34.39	48.89
F_{XX} mínimo	-85.22	-60.33	-70.85	-54.90	-33.98
Distancia máx – mín	87.54	94.11	88.70	89.29	82.86

3.2.1.3 σ_{XX} en la sección 3-3 Inferior

Se muestra a continuación la distribución del esfuerzo F_{XX} a lo largo de la sección 3-3 en la losa inferior (figura 3-26). Como puede observarse, salvo para el esviaje de 60°, la distribución tiende a la simetría respecto al punto medio de la sección en contraposición con lo que ocurría en la sección 2-2. Por tanto, hay una evolución desde las secciones más cercanas al alma (secciones próximas a la 2-2) hacia las más cercanas al eje del tablero (secciones próximas a la 3-3), se tiende a suavizar la distribución conforme nos alejamos de la conexión con las almas.

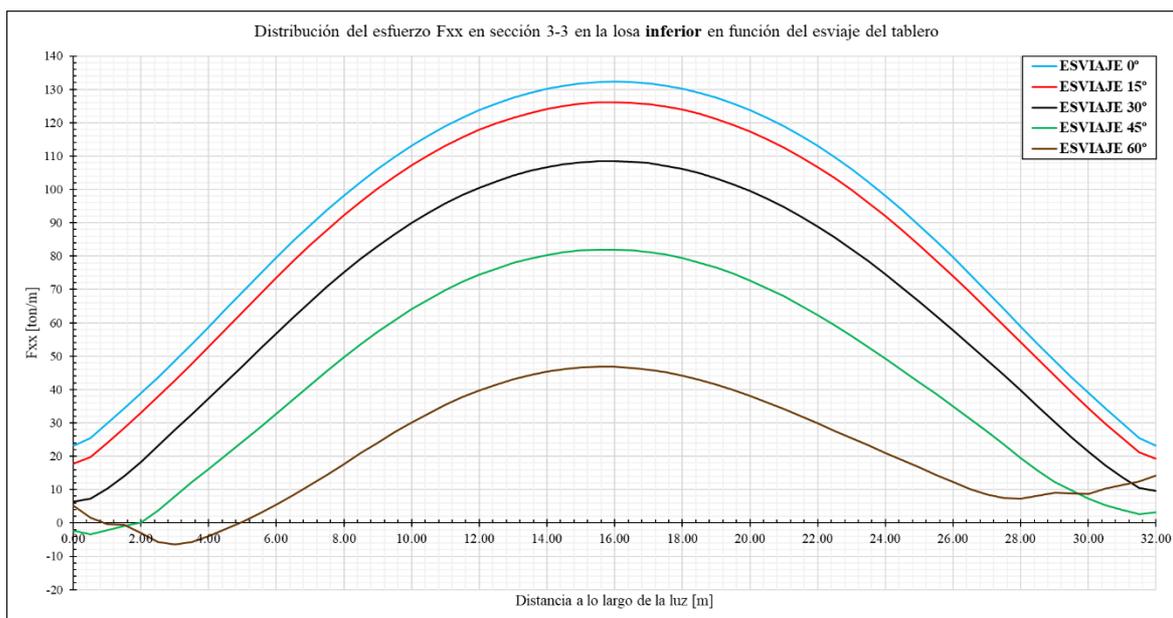


Figura 3-26. Distribución longitudinal del esfuerzo F_{XX} en función del esviaje (Sección 3-3 Losa inferior)

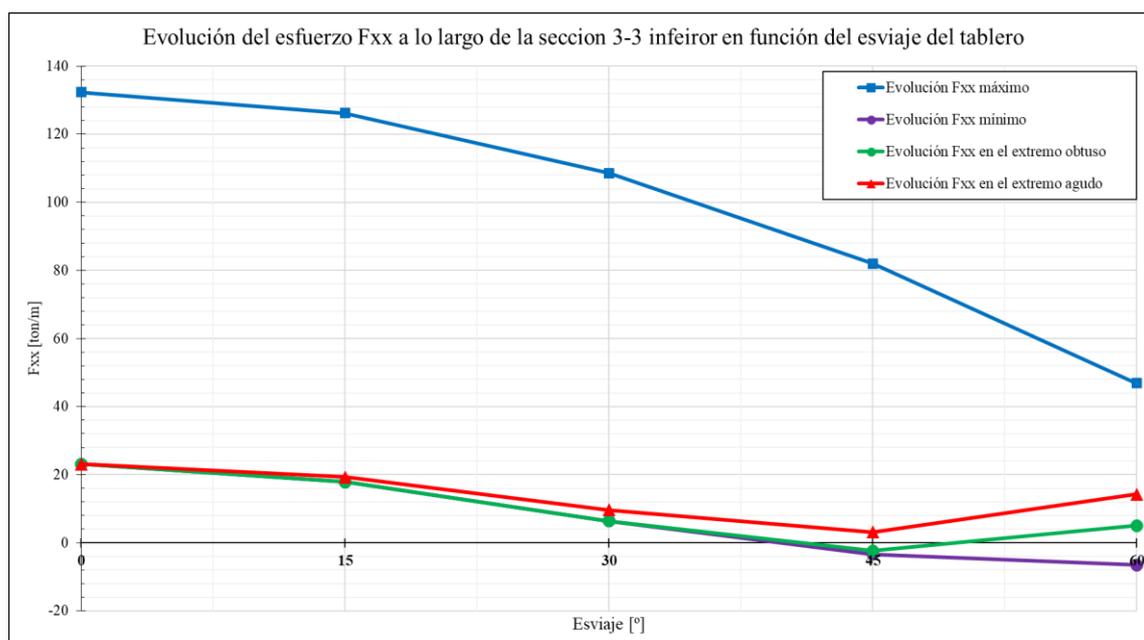


Figura 3-27. Evolución de los valores que toma el esfuerzo F_{XX} en los puntos característicos de la sección 3-3 inferior con el esviaje del tablero

En la figura 3-27 se observa como la tendencia que se discutió en el caso de la sección 2-2 inferior, se mantiene en la sección 3-3 inferior ya que, la evolución de los valores máximos que alcanza F_{XX} a lo largo de la sección, disminuyen conforme aumentamos el esviaje del tablero. En consecuencia, podemos decir que, de forma general, en la losa inferior el valor de las máximas tracciones depende del esviaje del tablero de tal manera que, cuando este aumenta, las máximas tracciones disminuyen.

A diferencia de lo que ocurría con la sección 2-2, la distribución no muestra picos tensionales en ninguno de los extremos del tablero.

El resto de los parámetros que se muestran en la figura anterior no siguen una tendencia clara con respecto a su dependencia con el esviaje del tablero.

3.2.1.4 σ_{XX} en la sección 3-3 Superior

Por último, se estudia la evolución del esfuerzo a lo largo de la sección 3-3 superior. En las figuras siguientes se muestra en primer lugar la evolución de la distribución de dicho esfuerzo (figura 3-28) y, a continuación, se resumen los resultados de mayor interés (figura 3-29).

En este caso, se hace aún más notable lo comentado en el apartado anterior. Se observa como la distribución del esfuerzo es sensiblemente más simétrica que en el mismo caso para la sección 2-2, alejándose de la concentración de tensiones que ocurre en esa sección en el extremo obtuso.

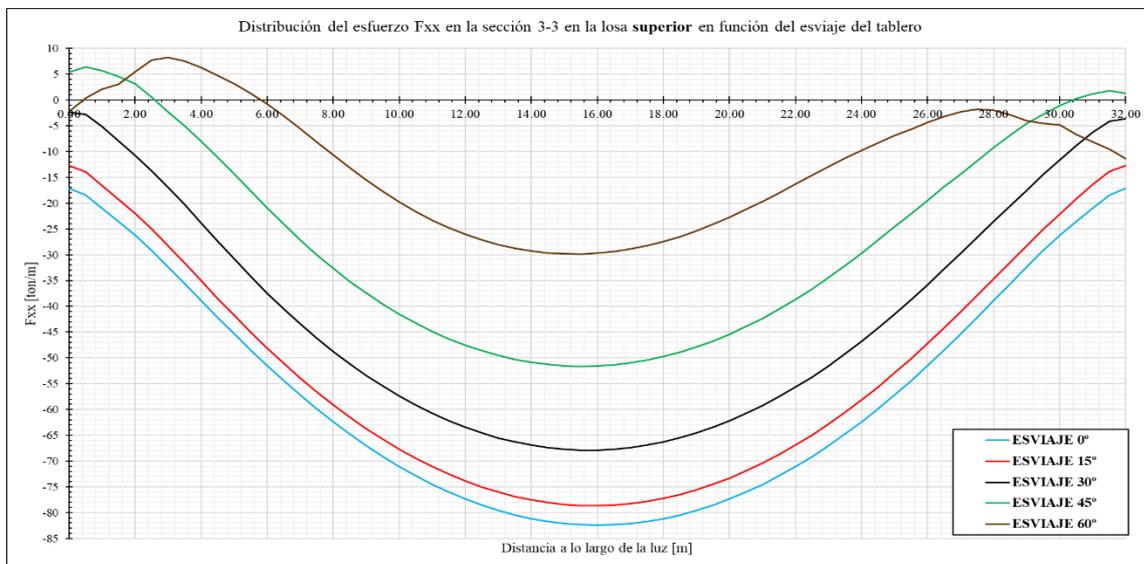


Figura 3-28. Distribución longitudinal del esfuerzo F_{XX} en función del esviaje (Sección 3-3 Losa superior)

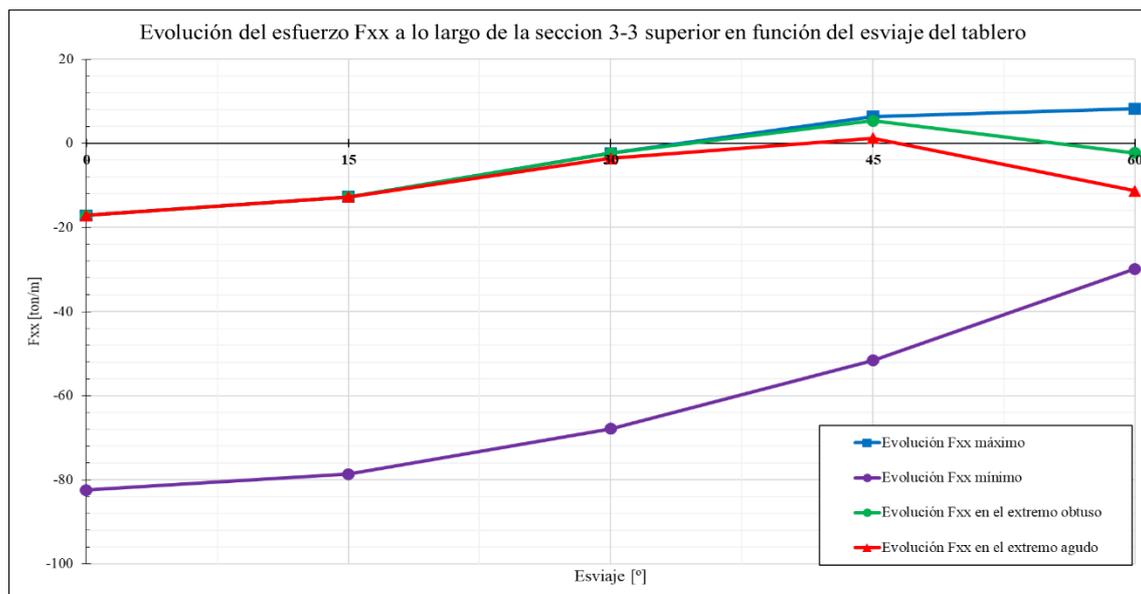


Figura 3-29. Evolución de los valores que toma el esfuerzo F_{XX} en los puntos característicos de la sección 3-3 superior con el esviaje del tablero

Observando la gráfica anterior se deduce que existe una clara dependencia de la distribución del máximo valor que toma el esfuerzo F_{XX} con el esviaje del tablero. Como sucedía para el mismo caso de la sección 2-2, este valor va disminuyendo conforme aumenta el esviaje del tablero.

Resumen del apartado:

Tras analizar la evolución del esfuerzo F_{XX} a lo largo de las secciones 2-2 y 3-3, se puede extraer lo siguiente:

- ❖ Existe una clara dependencia de la distribución del esfuerzo con la variación del esviaje del tablero. Registrándose en todo momento, el máximo valor absoluto de F_{XX} cuando el esviaje es nulo (el tablero es recto) y, tendiendo a valores inferiores cuando el esviaje aumenta. Por tanto, desde el punto de vista tensional, el modelo que menos esfuerzo recoge es en el que el esviaje es de 60° .
- ❖ Se observa tanto en la losa superior como en la inferior que, la distribución de tensiones se concentra en las secciones más próximas al encuentro con las almas. Se suaviza dicha distribución conforme nos acercamos a secciones próximas al eje longitudinal del tablero ya que, comienzan a ser cada vez más simétricas.

3.2.2 Desplazamientos

En este apartado se pretende analizar la influencia del esviaje en los desplazamientos verticales de la sección AB localizada en la parte inferior del alma de la sección (se resaltada en rojo en la figura 3-30).

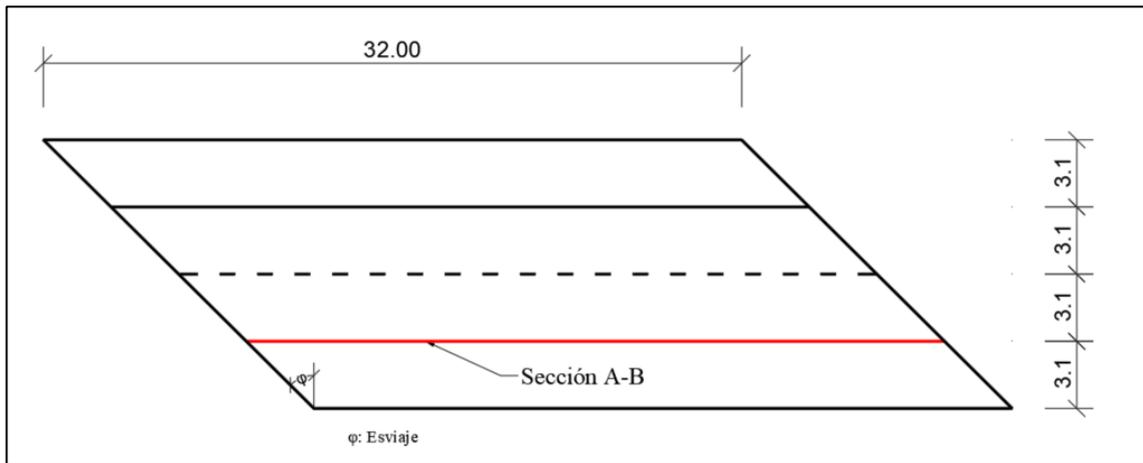


Figura 3-30. Situación de la sección AB a lo largo del tablero [Vista en planta]

En la siguiente imagen (figura 3-31) se ilustra la evolución del desplome de la sección AB a lo largo del tablero para cada uno de los modelos estudiados.

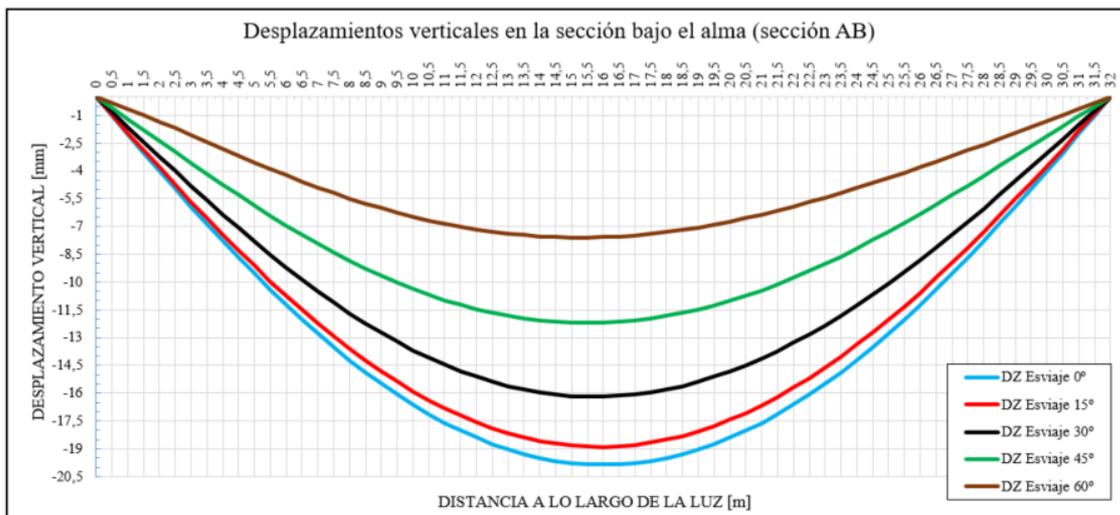


Figura 3-31. Desplazamiento u_z de la sección AB en función del esviaje del tablero

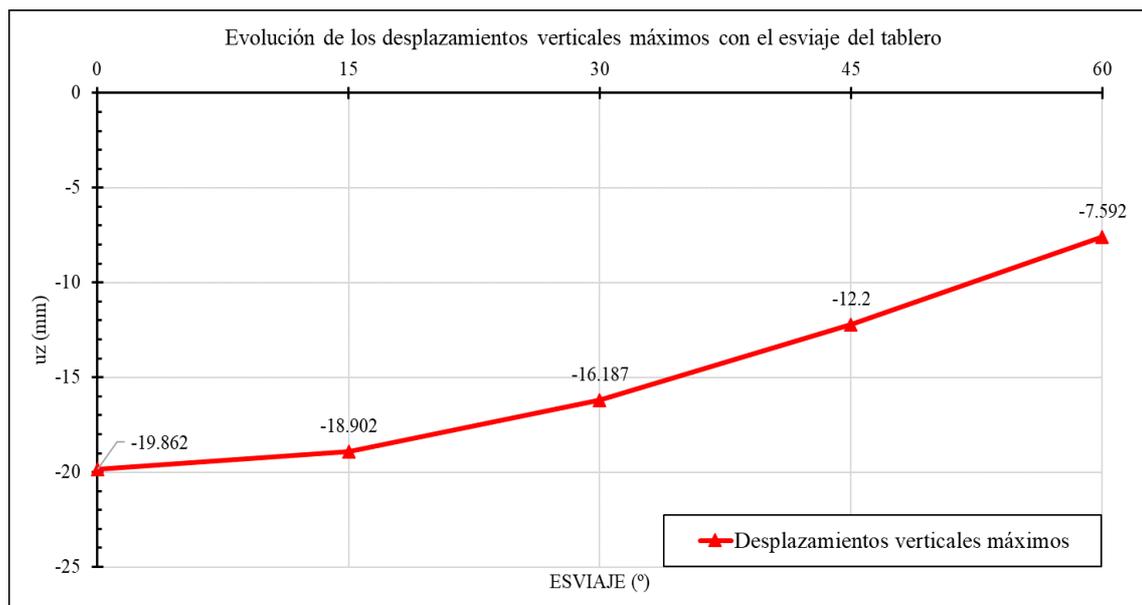


Figura 3-32. Evolución de los desplazamientos verticales máximos de la sección AB en función del esviaje del tablero

De las gráficas anteriores podemos extraer lo siguiente:

- Tal y como cabría esperar según las condiciones de contorno y cargas impuesta, la distribución del desplazamiento vertical es aproximadamente simétrica con respecto al punto medio de la sección AB.
- Se observa como existe una relación entre el esviaje del tablero y el valor de la flecha de dicha sección. Atendiendo a la gráfica 3-32, vemos como el valor de la flecha va disminuyendo conforme aumenta el esviaje.

Se puede observar en la tabla anterior como la diferencia entre los valores máximos del desplazamiento u_z para dos parejas de esviajes consecutivos es tanto mayor cuanto más aumenta el esviaje. Por ejemplo, la diferencia de flecha entre 0° y 15° es pequeña (0.96 mm) en comparación con los valores entre 45° y 60° (4.608 mm).

Comparativa de las flechas entre los distintos modelos analizados

Esviaje (°)	0	15	30	45	60
Flecha sección AB (mm)	-19.862	-18.902	-16.187	-12.2	-7.592
Diferencia (mm)	0	0.96	2.715	3.987	4.608

- En este caso no se observa una discrepancia con la tendencia de valores que arroja el modelo 2 (esviaje de 15°) como sí ocurría en el caso de la distribución del esfuerzo F_{XX} .

- Como menciona J. Manterola en sus apuntes, sí se observa una diferencia (aunque mínima) en los valores del desplazamiento vertical entre el lado obtuso ($x=0$ metros) y el lado agudo ($x=32$ metros) del tablero, sobre todo para los esviajes de 15° , 30° y 45° .

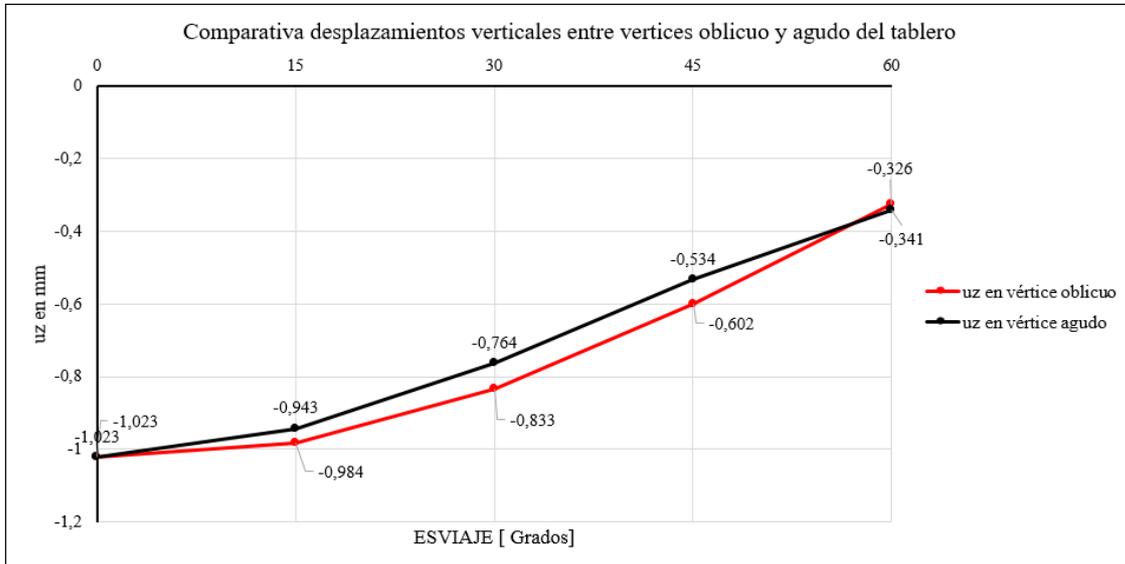


Figura 3-33. Comparativa entre desplazamientos verticales en el lado agudo y obtuso para los distintos modelos esviados analizados.

A continuación, se muestran las deformadas de cada uno de los modelos analizados. Puede observarse como los desplazamientos aumentan haciéndose máximos en la parte central del tablero. Concretamente los mayores vencimientos se dan en los voladizos centrales, lo cual es lógico debido a la menor rigidez de estos elementos. Esta tendencia cambia a partir del modelo 4 (esviaje 45°) apareciendo flexiones de mayor importancia en la parte más alejada de los voladizos situados en las secciones extremas del tablero.

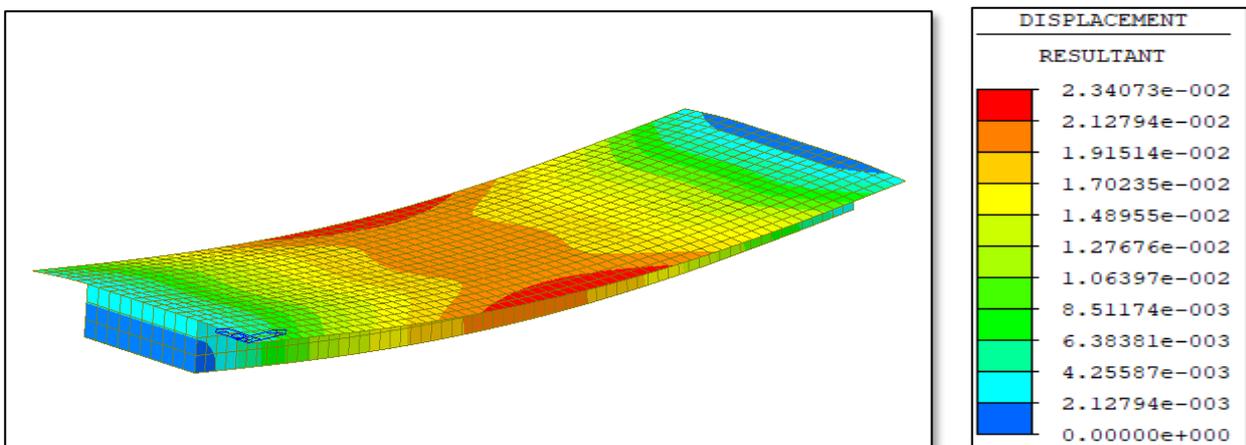


Figura 3-34. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 0° (desplazamientos en metros)

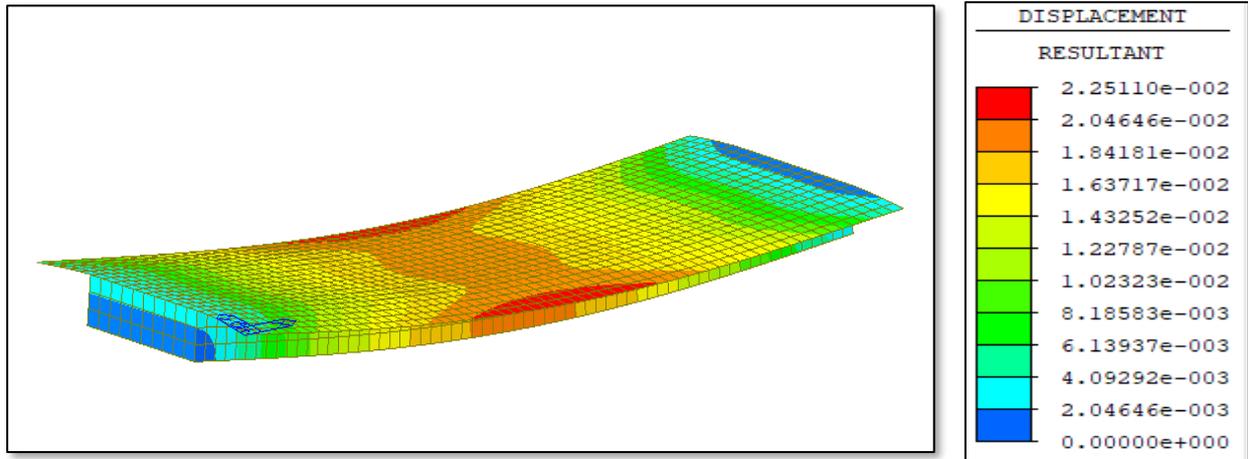


Figura 3-35. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 15° (desplazamientos en metros)

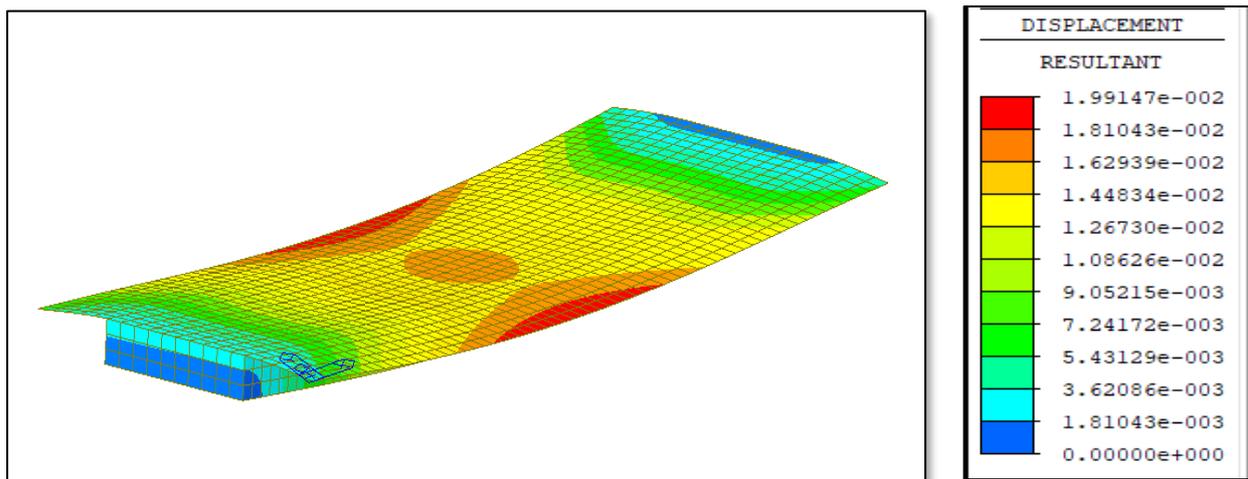


Figura 3-36. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 30° (desplazamientos en metros)

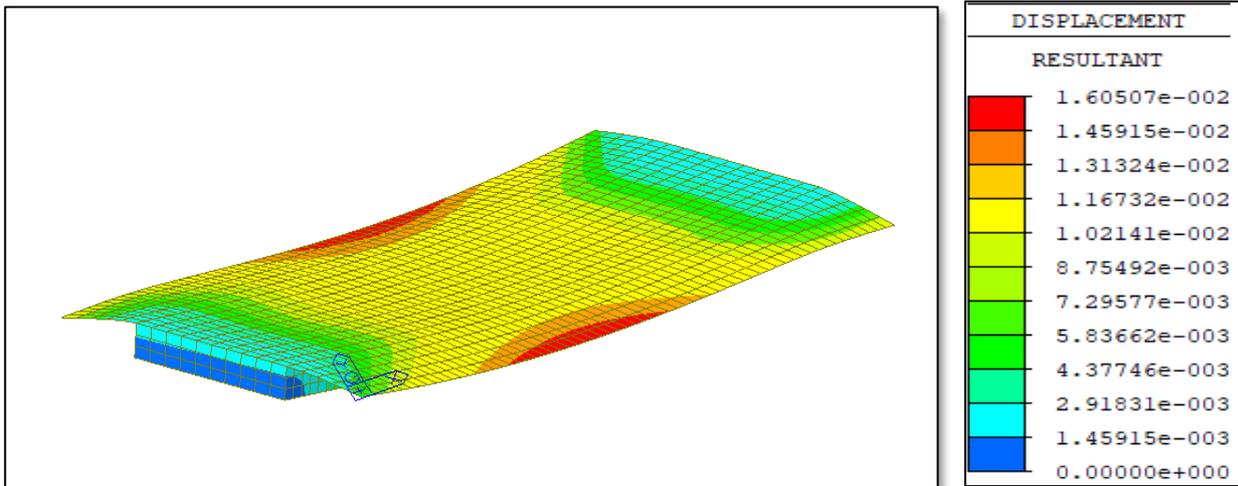


Figura 3-37. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 45° (desplazamientos en metros)

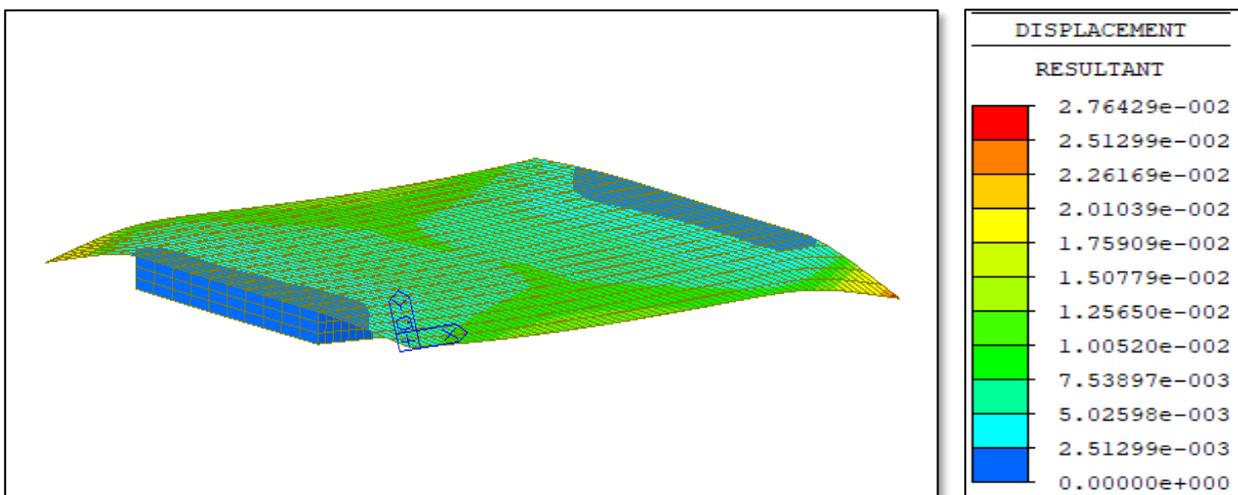


Figura 3-38. Desplazamientos globales del modelo de Midas Civil con el tablero esviado 60° (desplazamientos en metros)

3.2.3 Distorsión

Por último, en este apartado realizamos la comparativa entre el grado de distorsión de la sección 1-1 ortogonal a la directriz del tablero para los distintos esviajes (se destaca en la figura 3-39).

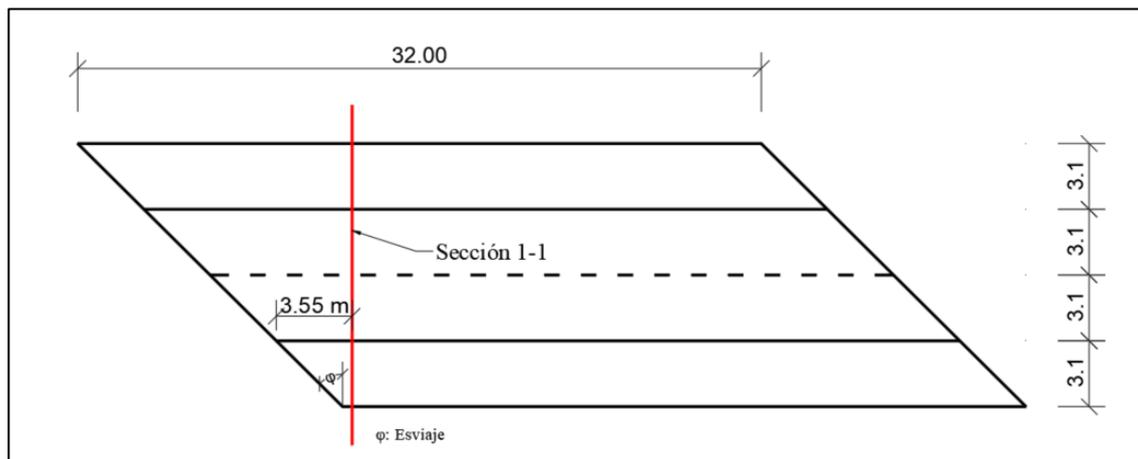


Figura 3-39. Situación de la sección 1-1 en el tablero [Vista en PLANTA]

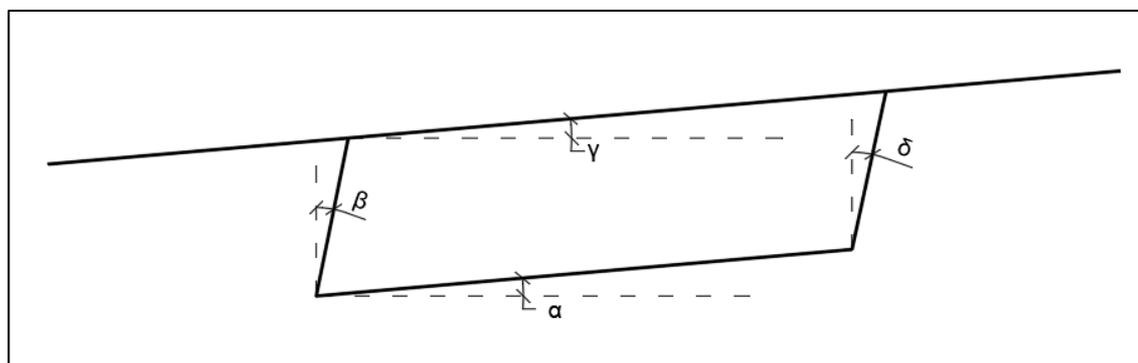


Figura 3-40. Croquis aclarativo del criterio seguido para la determinación de la distorsión del cajón

Para determinar la distorsión del cajón que conforma la sección transversal del tablero necesitamos conocer los desplazamientos en la dirección vertical y horizontal de los vértices del cajón. Con estos datos conocidos, se determinan los giros α , β , γ y δ de cada una de las aristas del cajón para así determinar la distorsión de este según la fórmula siguiente.

$$\text{Distorsión} = \frac{(\alpha + \beta) + (\gamma + \delta)}{2}$$

La siguiente tabla recoge los valores del giro de cada una de las aristas del cajón, así como la distorsión de este para los distintos esviajes analizados. Para visualizar su evolución, se representa en la figura 3-41 la tendencia que sigue esta variable.

Tabla 3-6 Evolución de la distorsión de la sección 1-1 en función del esviaje del tablero

Distorsión de la sección 1-1 en función del esviaje					
	0°	15°	30°	45°	60°
α	0.00000	0.00044	0.00073	0.00091	0.00079
β	-0.00004	-0.00033	0.00048	-0.00043	-0.00023
δ	0.00000	0.00044	0.00073	0.00091	0.00079
γ	0.00006	-0.00025	0.00041	-0.00041	-0.00022
Distorsión (mrad)	0.00986	0.15740	0.27847	0.49093	0.56875

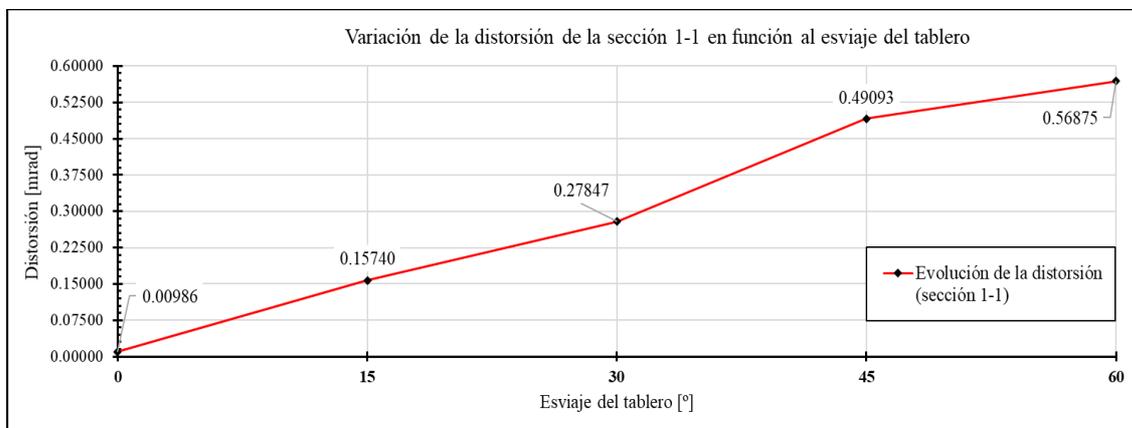


Figura 3-41. Evolución de la distorsión de la sección 1-1 con el esviaje del tablero

Una vez que se han analizado los resultados obtenidos, se puede observar en primer lugar como la distorsión sí se ve afectada por el esviaje del tablero. En este sentido, este parámetro aumenta conforme lo hace el esviaje del tablero. También podemos ver como existe un cambio brusco en la tendencia cuando se sobrepasa el esviaje de 30°.

La mayor distorsión del cajón está asociada a una menor rigidez a torsión del tablero conforme el esviaje aumenta o, dicho de otro modo, a una mayor torsión provocada por el aumento del esviaje. Esto parece contradecir a lo visto hasta ahora pues hasta el momento, el modelo con mayor esviaje era el que menores esfuerzos longitudinales y desplazamientos verticales registraba.

A modo de soporte visual, se aporta las siguientes imágenes de la deformada exagerada de la sección 1-1 en los distintos tableros esviados.



Figura 3-42. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 0°

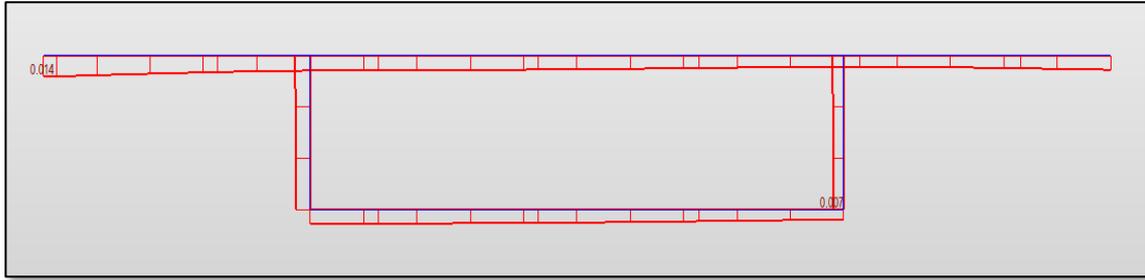


Figura 3-43. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 15°

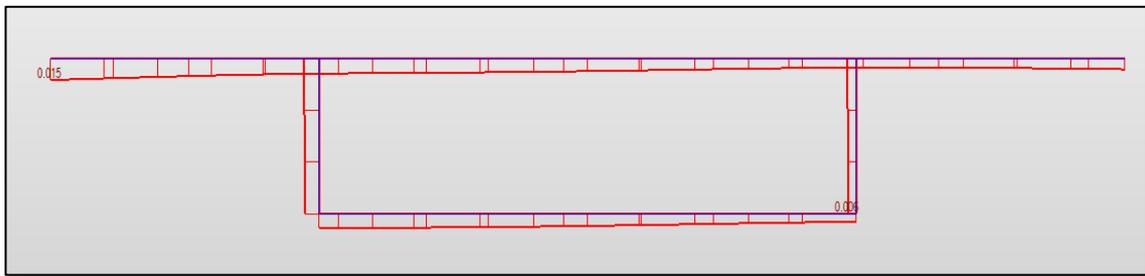


Figura 3-44. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 30°

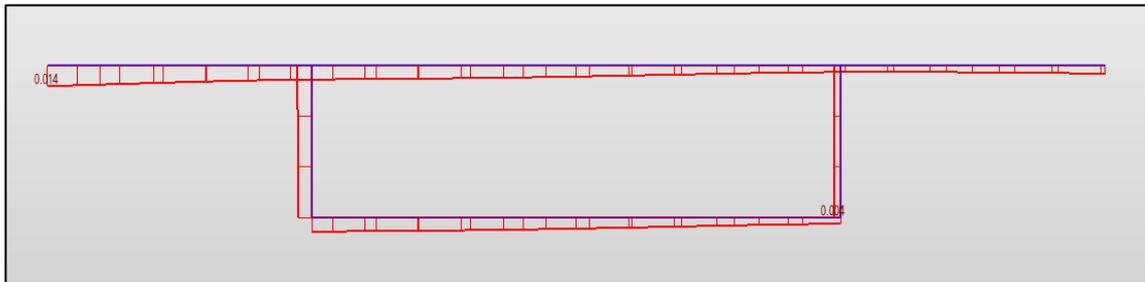


Figura 3-45. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 45°

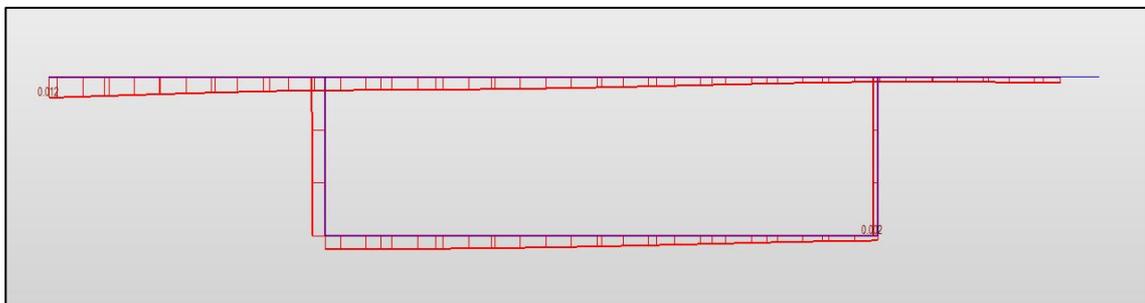


Figura 3-46. Deformada de la sección 1-1 en el modelo con esviaje 60°

3.3. Influencia de la inclinación de las almas en la respuesta estructural

En este apartado se pretende realizar un análisis comparativo de la influencia que tiene la inclinación de las almas en la respuesta estructural de los tableros de viaductos esviados con sección en cajón. Siguiendo con la línea de estudio de este documento, se han analizado los resultados en esfuerzos, desplazamientos y distorsión de las mismas secciones que hasta ahora se han estudiado. En todos los casos, el tablero tiene un esviaje de 45° con el objetivo de ampliar los resultados que se muestran en el capítulo 7 de [1] y, compararlos a su vez con los obtenidos por Sergio Cobo Pérez en [3].

3.3.1 Características de los nuevos modelos

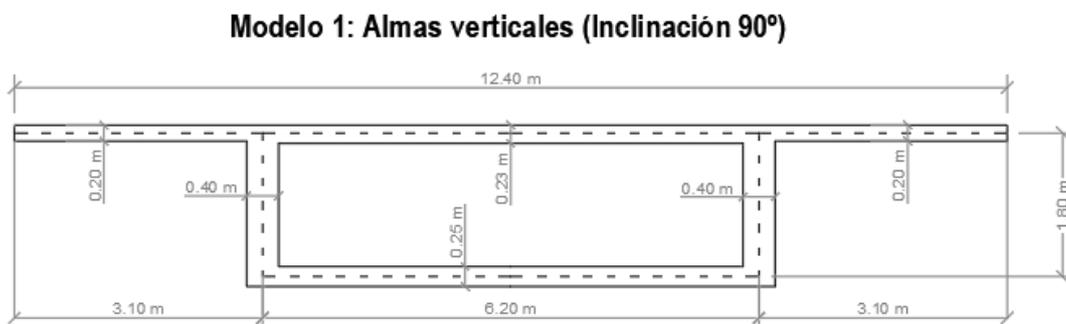
Para que los resultados que se pretenden obtener tengan cierta veracidad, nos apoyamos en el modelo de elementos finitos desarrollado hasta ahora, es decir, tablero de viaducto con sección en cajón de almas verticales con un esviaje de 45° . Para completar el análisis, además del modelo con almas inclinadas 90° respecto a la horizontal, se amplía a inclinaciones de las almas de: 45° , 53° , 63° y 76° respecto la horizontal.

De cada uno de los modelos se extraen los resultados sobre esfuerzos por unidad de longitud, desplazamientos verticales y distorsión de distintas secciones con los que podemos inferir tendencias de comportamiento de los tableros esviados en función a la inclinación de las almas.

3.3.1.1 Descripción de los modelos

1) Características geométricas

Para que los resultados obtenidos hasta ahora y los que se obtienen en este apartado sean comparables, se han mantenido las dimensiones principales del tablero. Así, el tablero mantiene sus 32 metros de luz y, 12.4 de anchura variando entre los distintos modelos la inclinación de las almas que van desde los 45° a 90° . En la figura 3-47 se muestra un croquis de la geometría de las secciones transversales para cada modelo.



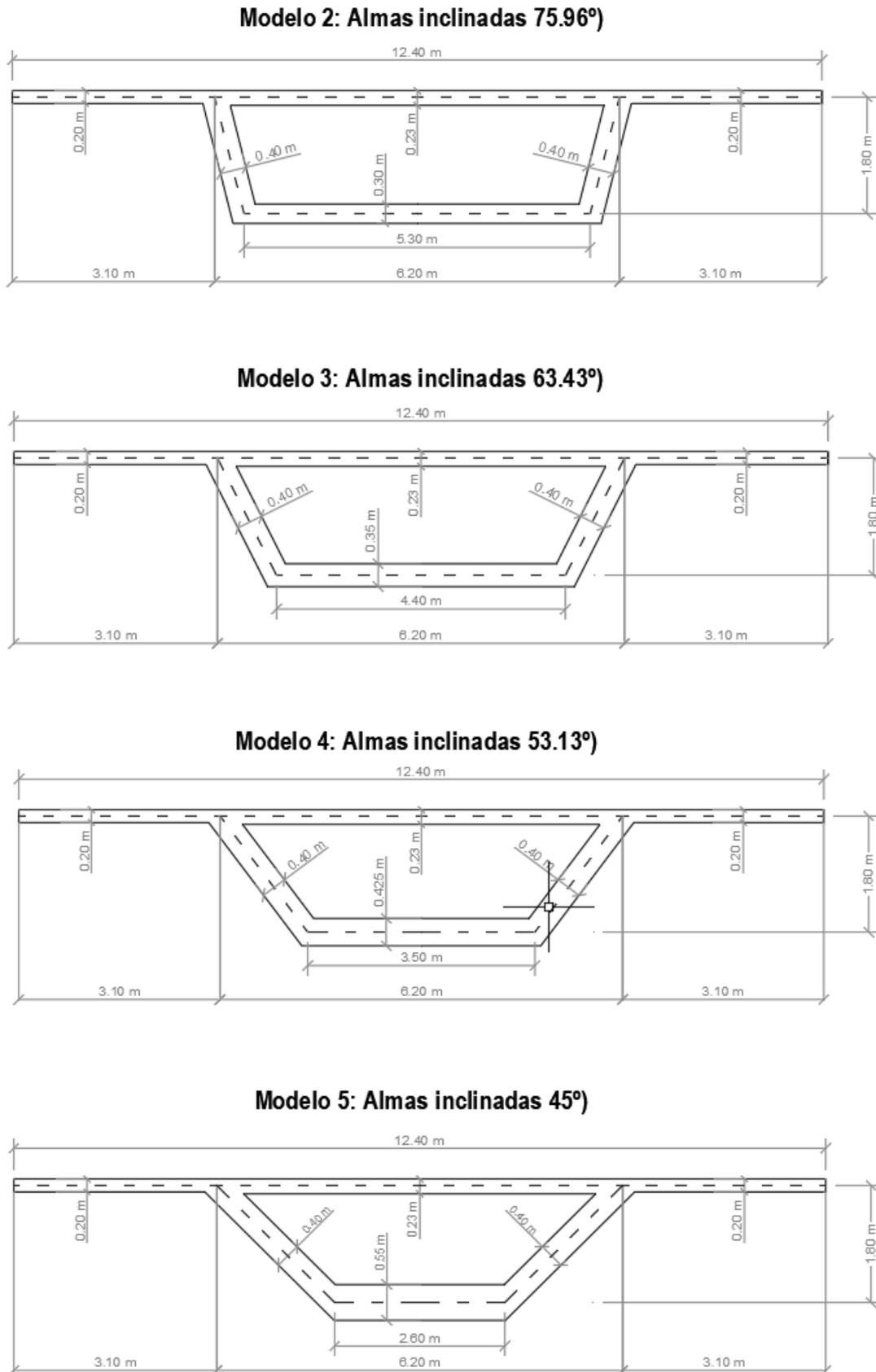


Figura 4.1:

Figura 3-47. Geometría de las secciones de los modelos de estudio.

Tal y como puede observarse en la figura 3-47, se ha decidido mantener en todos los casos las dimensiones y espesores de la losa superior la cual, está dividida en dos voladizos de 20 cm de espesor y 2.90 m de longitud y, un vano central de 23 cm de espesor y el espesor de los voladizos de la sección en 20 cm y, en una longitud de 5.80 m. Las almas de todas las secciones tipo conservan el mismo espesor de 40 cm. En el caso de la losa inferior, el espesor del elemento va aumentando conforme disminuye su dimensión transversal con la intención de mantener la misma inercia a flexión principal de la sección transversal en cada uno de los modelos. En la siguiente tabla se recogen las características mecánicas principales de las secciones transversales empleadas.

Tabla 3-7 Características mecánicas principales de las secciones empleadas

Inclinación de las almas	Espesor losa inferior (cm)	Área (m^2)	I_{YY} (m^4)	I_{ZZ} (m^4)	J (m^4)
90° Almas verticales	25.0	5.61	3.60	51.07	8.57
75.96°	30.	5.64	3.65	47.56	8.29
63.43°	35.0	5.71	3.63	45.35	7.77
53.13°	42.5	5.83	3.64	43.72	7.09
45°	55.0	6.00	3.65	42.42	6.28

2) características de los elementos finitos empleados

Tras la elección de la geometría de las secciones tipo, el siguiente escollo es la correcta discretización de las secciones para conseguir un modelo de elementos finitos uniforme.

Para ello se necesita que la malla resultante de discretizar el modelo sea regular. En este sentido, la elección de las dimensiones longitudinales de los elementos finitos se mantuvo en 50 cm, pero, en el caso de la dimensión transversal de los elementos la elección está más sujeta a que la malla de las vigas riostras extremas sea lo más uniforme posible.

En este sentido, se decide que la parte central de la losa superior y la losa inferior se dividan por el mismo número de elementos de tal manera que, la malla resultante esté conformada por elementos trapezoidales regulares. Con esto lo que conseguimos es que las dimensiones de estos trapecios mantengan una relación de 2 a 1 o 3 a 1, no superiores, para el correcto funcionamiento del elemento finito.

En las siguientes imágenes se muestran las mallas de las vigas riostras extremas donde se advierte esa regularidad que buscamos.

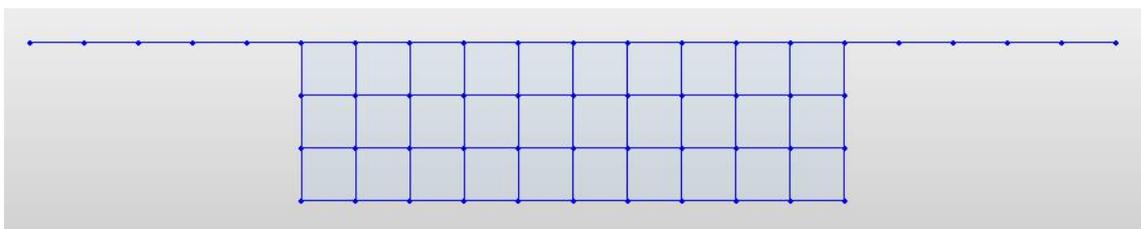


Figura 3-48. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas verticales.

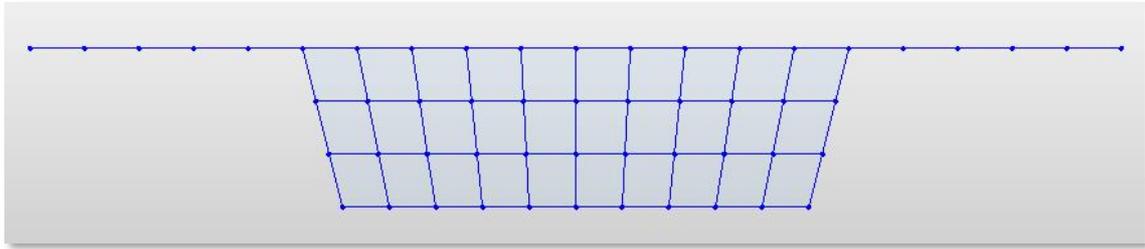


Figura 3-49. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas inclinadas 75.96°.

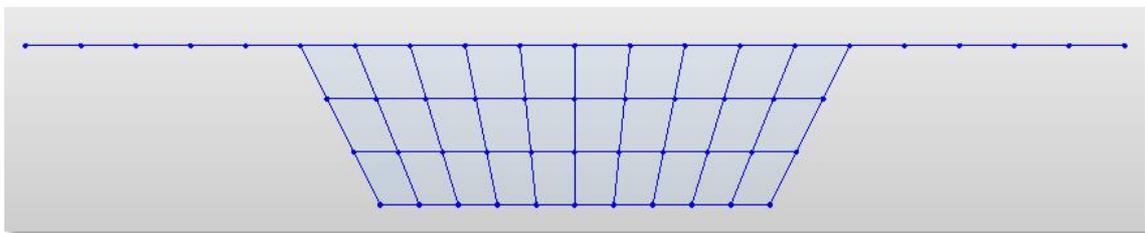


Figura 3-50. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas inclinadas 63.43°.

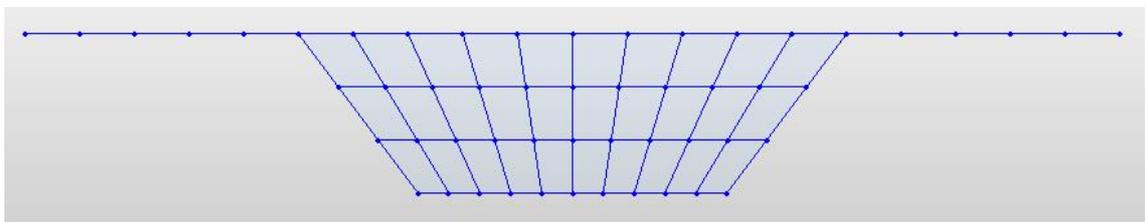


Figura 3-51. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas inclinadas 53.13°.

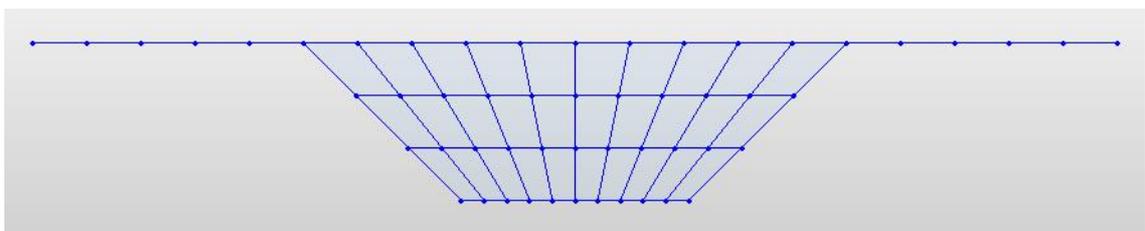


Figura 3-52. Discretización de las vigas riostras extremas en el modelo con las almas inclinadas 45°.

3) Otras características:

Se recuerda que el material empleado para la construcción del modelo de elementos finitos es un hormigón de $25 \text{ kN}/\text{m}^3$, de módulo de elasticidad $E = 29610.8 \text{ MPa}$ y, coeficiente de Poisson $\nu = 0.20$. Se sigue empleando el mismo material con las mismas características para esta ampliación.

Por último, debe destacarse que las cargas que se aplican sobre el modelo son las mismas que se han aplicado para todo el estudio desarrollado hasta ahora, es decir, el peso propio de los elementos estructurales.

3.3.2 Tensiones longitudinales

Una vez se han descrito las características de los distintos modelos empleados en este análisis, se exponen en los siguientes apartados los resultados más relevantes del estudio.

Se debe aclarar que las secciones en las que se han obtenido los resultados se hacen coincidir con las descritas al inicio del documento para poder contrastar resultados.

Antes de exponer los resultados obtenidos en cada uno de los modelos, se hace necesario exponer que en los modelos anteriores es equivalente el hablar en términos de esfuerzos por unidad de longitud (F_{XX}) o tensiones (σ_{XX}) porque los espesores de las losas superior e inferior eran constantes para cada uno de los esviajes analizados. En cambio, en este caso deja de ser cierto la premisa de que la losa inferior tiene un espesor constante, por lo que, se hace necesario aportar además de las gráficas del esfuerzo F_{XX} (ton/m), las gráficas de la tensión longitudinal σ_{XX} (ton/m^2) para que lo obtenido en la losa superior se parezca a lo que se obtiene en la losa inferior y, dejar más clara la evolución.

Una vez se ha discutido uno de los escollos de este análisis, se muestran a continuación los resultados obtenidos del esfuerzo F_{xx} por unidad de longitud y de σ_{xx} en cada una de las secciones.

Como se viene haciendo, este esfuerzo lo evaluamos en las secciones longitudinales 2-2 y 3-3 tanto en el corte con la losa superior como con la losa inferior. Como se describió anteriormente, la sección 2-2 se encuentra a 0.44 metros del alma medidos hacia el interior de la losa superior. Por su parte, la sección 3-3 está situada a 0.59 metros del eje del tablero.

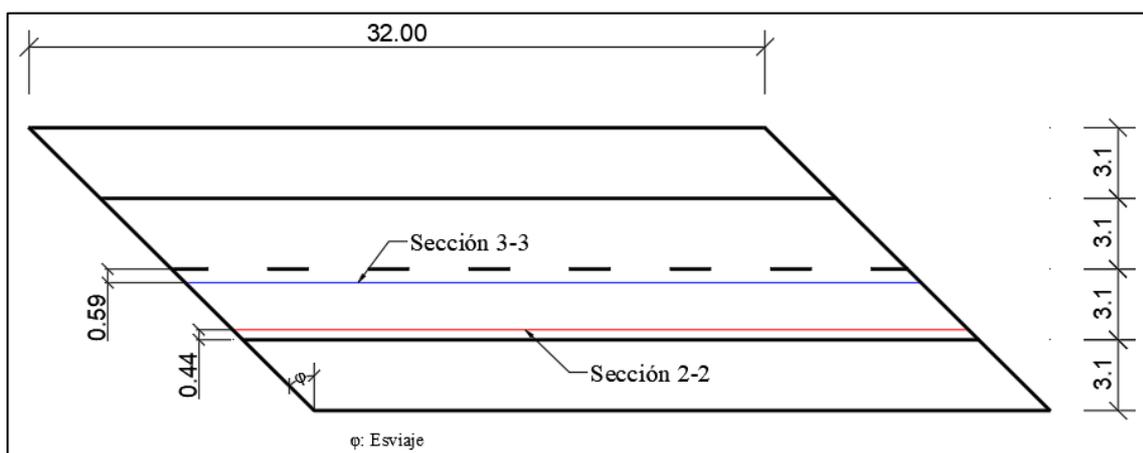


Figura 3-53. Situación de las secciones 2-2 y 3-3 [Vista en planta]

Antes de mostrar los resultados obtenidos, se debe destacar que, si bien el corte con la losa superior a través de las secciones anteriormente citadas es directo, es decir, puede hacerse a las distancias que muestra la figura 3-53, cuando va variando la inclinación de las almas, la longitud transversal de la losa inferior se reduce en consecuencia. Se hace necesario aplicar un criterio de proporcionalidad para hacer el corte sin perder la similitud de los resultados entre los distintos modelos. La situación de los cortes en los distintos modelos puede observarse en las imágenes siguientes.

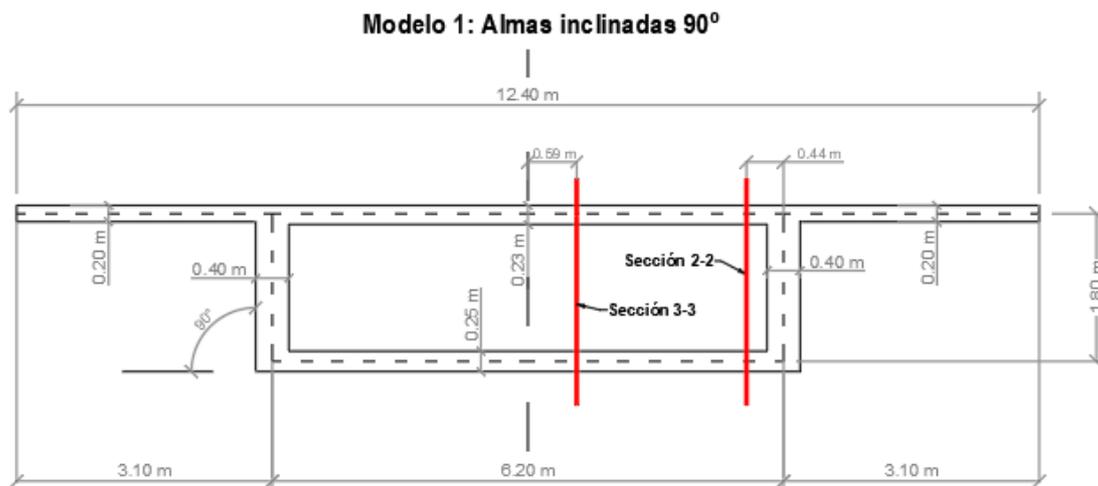


Figura 3-54. Situación de la sección 2-2 y 3-3 en modelo con almas inclinadas 90° (modelo 1).

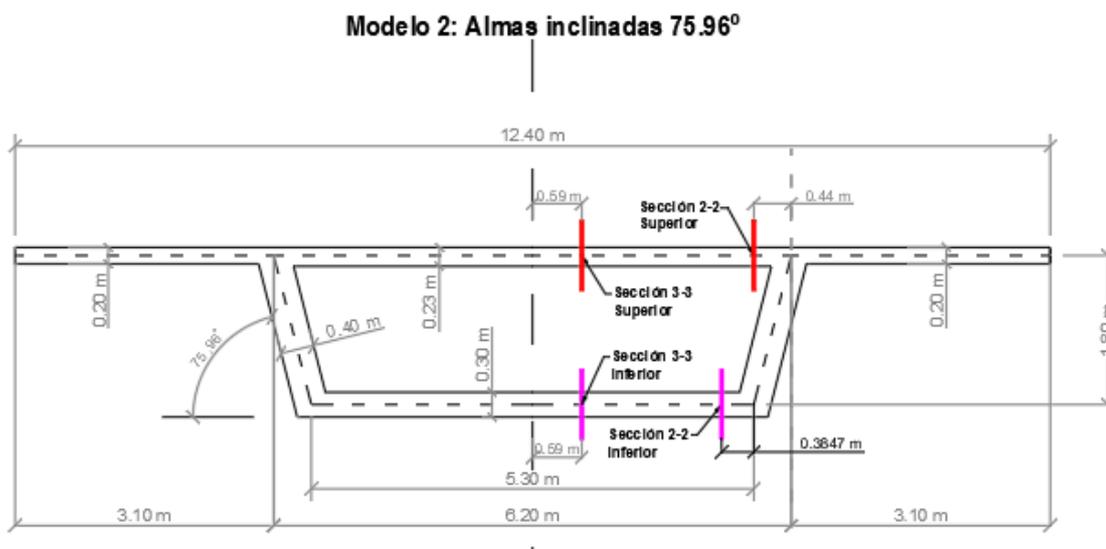


Figura 3-55. Situación de la sección 2-2 y 3-3 en modelo con almas inclinadas 75.96° (modelo 2).

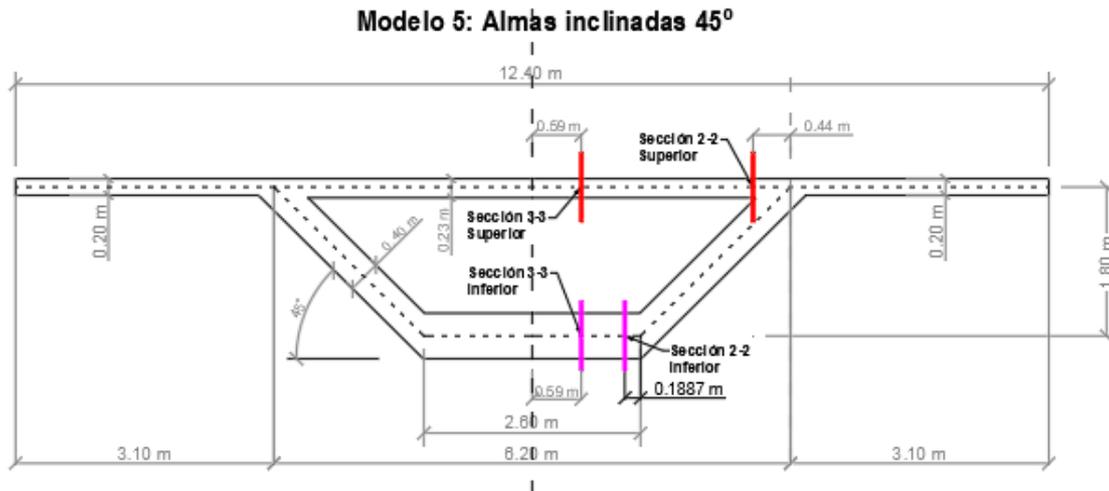
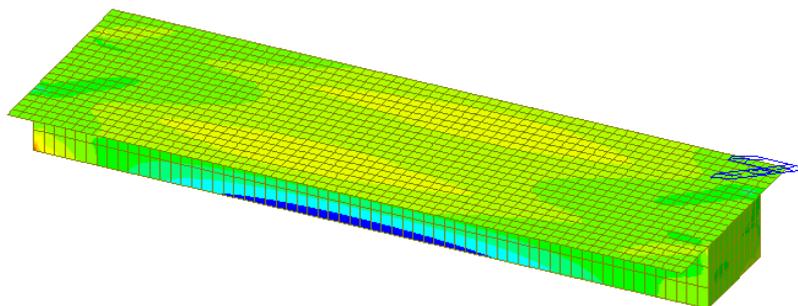


Figura 3-58. Situación de la sección 2-2 y 3-3 en modelo con almas inclinadas 45° (modelo 5).

Una vez descritas las particularidades geométricas pertinentes, se exponen a continuación los resultados más relevantes del estudio del esfuerzo F_{xx} . En primer lugar, se exponen una serie de ilustraciones que muestran la evolución de la tensión longitudinal σ_{xx} para cada uno de los modelos estudiados. Seguidamente, se recoge para cada sección longitudinal, una gráfica del valor del esfuerzo a lo largo de la longitud del tablero a la que, le acompaña otra gráfica que pretende ilustrar la evolución del esfuerzo con la inclinación de las almas en puntos concretos de la estructura, así como sus valores extremos (mínimo y máximo).

Vista isométrica superior:



Vista isométrica inferior:

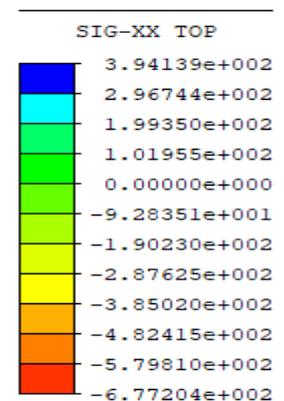
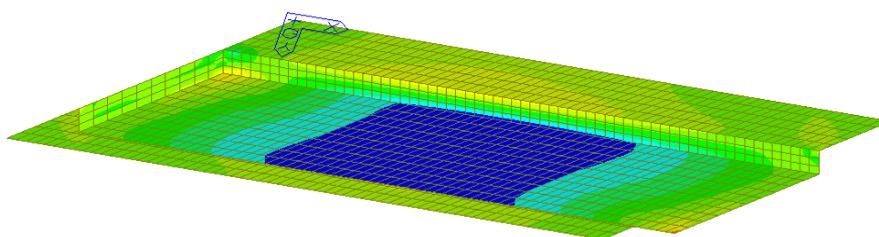
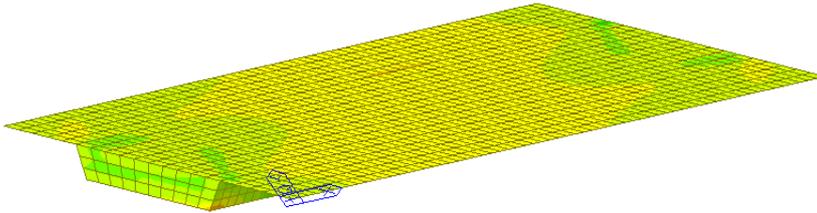


Figura 3-59. Distribución de σ_{XX} (ton/m²) en modelo 1 (inclinación de almas 90°)

Vista isométrica superior:



Vista isométrica inferior:

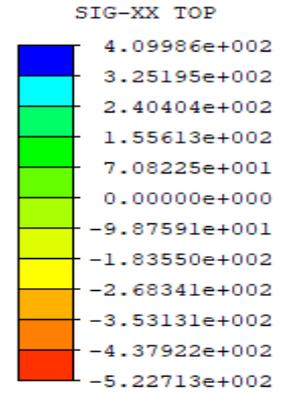
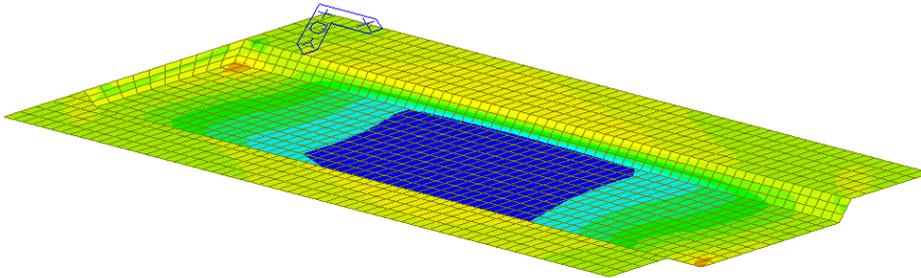
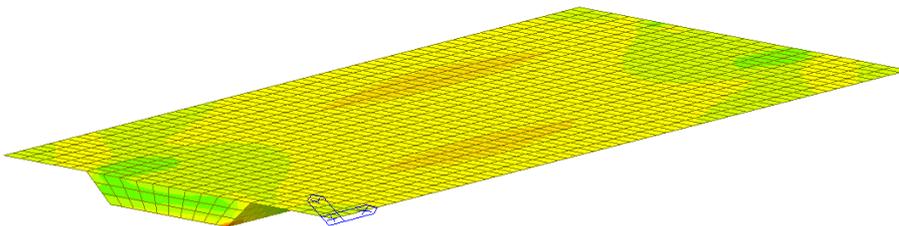
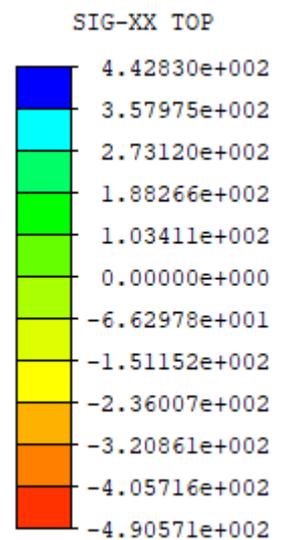


Figura 3-60. Distribución de σ_{XX} (ton/m²) en modelo 2 (inclinación de almas 75.96°)

Vista isométrica superior:



Vista isométrica inferior:



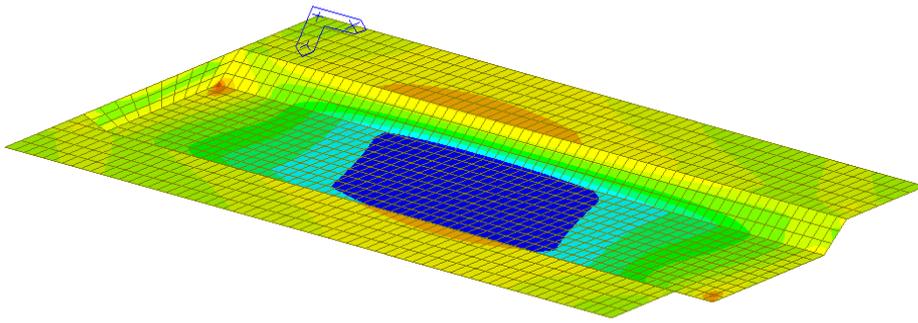
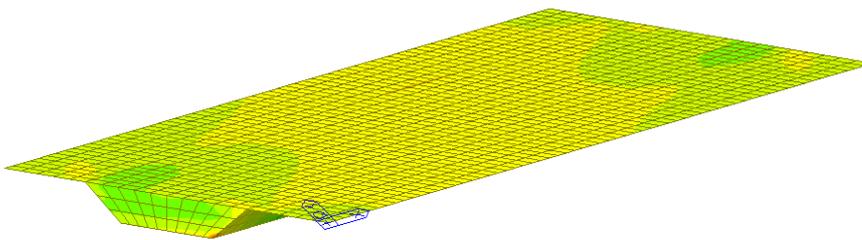


Figura 3-61. Distribución de σ_{xx} (ton/m²) en modelo 3 (inclinación de almas 63.43°)

Vista isométrica superior:



Vista isométrica inferior:

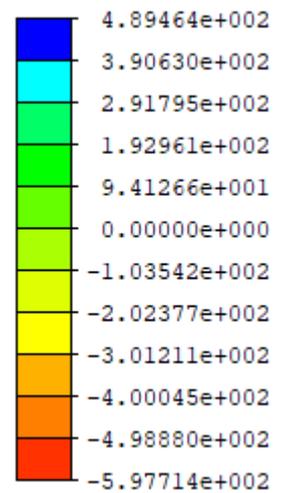
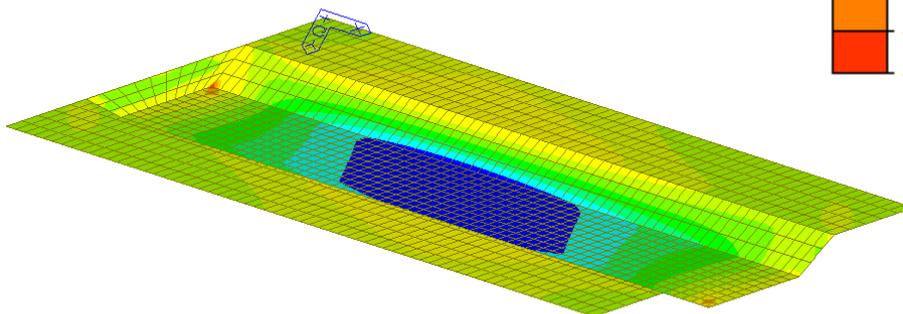


Figura 3-62. Distribución de σ_{xx} (ton/m²) en modelo 4 (inclinación de almas 53.13°)

Vista isométrica superior:

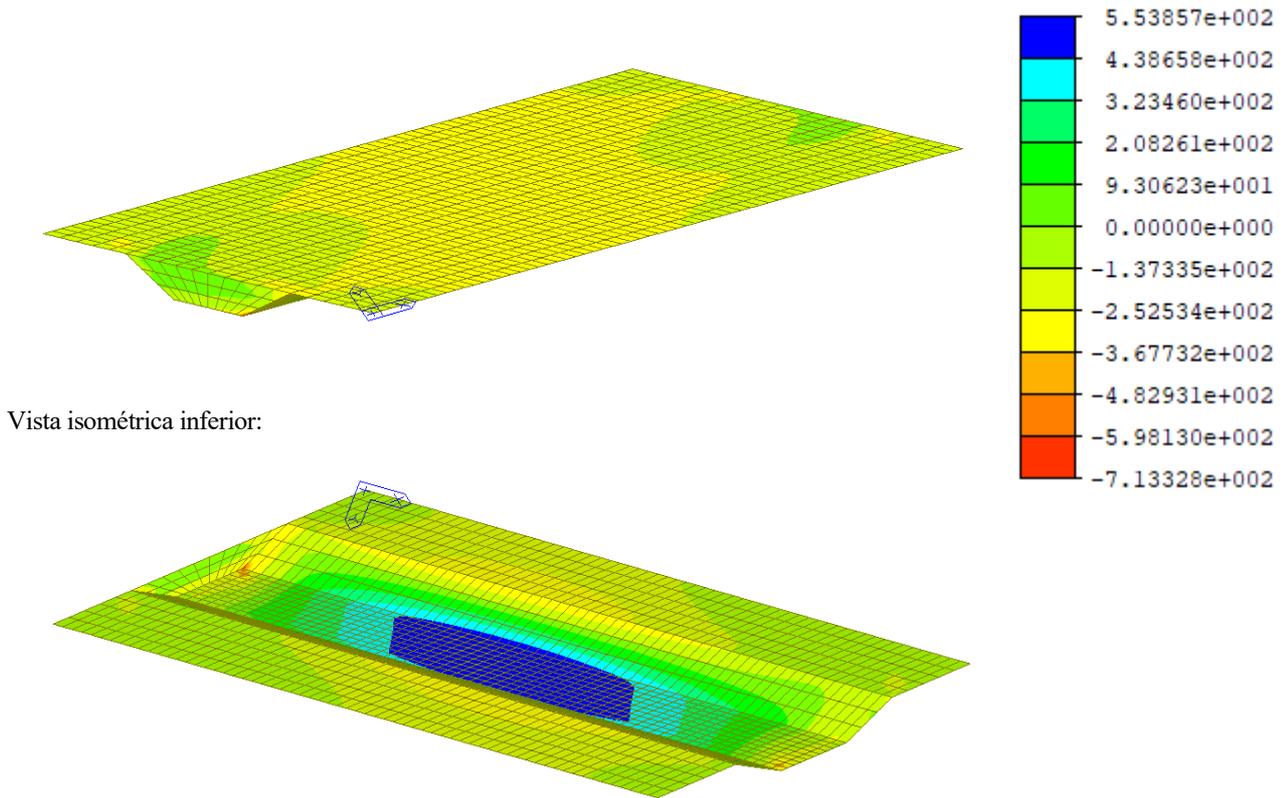


Figura 3-63. Distribución de σ_{XX} (ton/m²) en modelo 5 (inclinación de almas 45°)

3.3.2.1 σ_{XX} en la sección 2-2 inferior

En la figura 3-64 y 3-65 se muestran respectivamente, las gráficas de la evolución del esfuerzo F_{xx} y la de la tensión σ_{XX} a lo largo de la sección 2-2 en la losa inferior para cada uno de los modelos considerados.

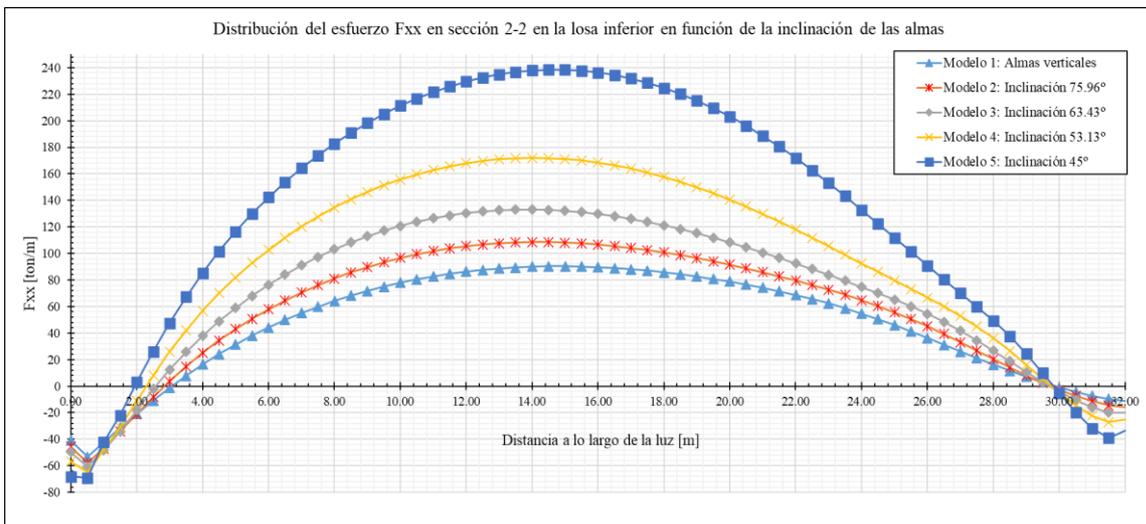


Figura 3-64. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 2-2 inferior en función de la inclinación de las almas

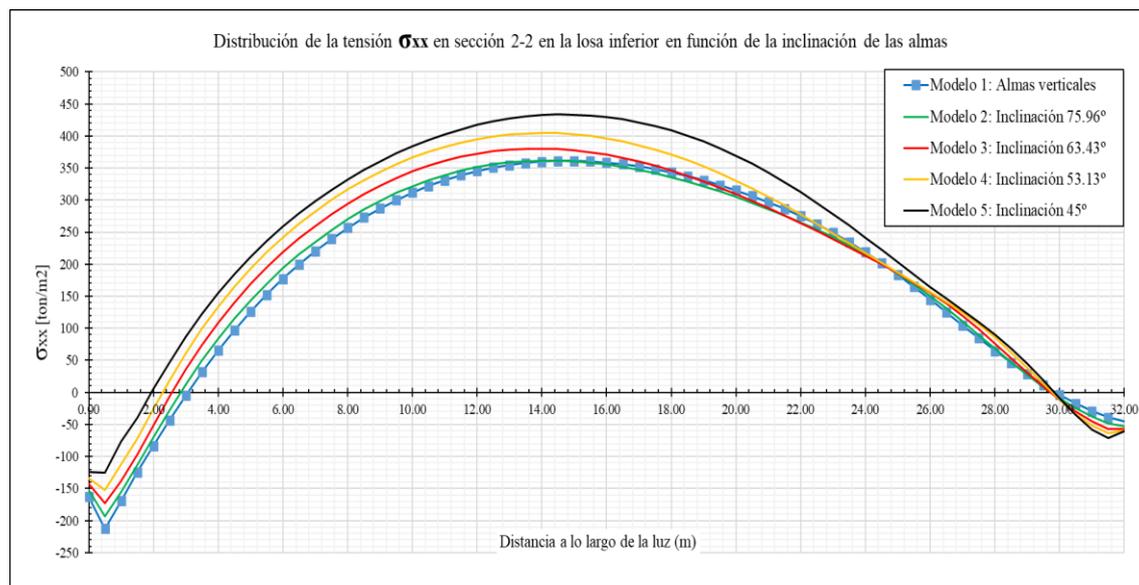


Figura 3-65. Evolución de la tensión σ_{XX} a lo largo de la sección 2-2 inferior en función de la inclinación de las almas

En las figuras 3-66 y 3-67 se recogen la tendencia que siguen distintos que consideramos de importancia como son: El valor del máximo y mínimo, el valor en el extremo obtuso y, en el extremo agudo tanto del esfuerzo F_{xx} como de la tensión σ_{XX} .

A simple vista se puede observar como el valor máximo de la tensión se tiene en los modelos en las secciones próximas a la mitad del tablero. También podemos ver como estas tracciones van disminuyendo con la inclinación de las almas, si bien, la disminución es más notable entre el modelo de 45° al de 53.13°. Podemos concluir en este caso que sí existe una dependencia del valor de las compresiones máximas con la inclinación de las almas de la sección en cajón en la sección 2-2 de la losa inferior.

Tal y como ocurría con los modelos de la primera parte del estudio, se vuelve a observar el pico tensional en las cercanías del extremo obtuso. En todos los casos podemos extraer que el valor de las compresiones máximas va disminuyendo a medida que aumenta la inclinación de las almas.

Se extrae que el modelo que más tensiones longitudinales soporta en la sección 2-2 de la losa inferior es el de las almas más tendidas (45°), adquiriendo en el resto de los modelos valores bastante similares entre sí.

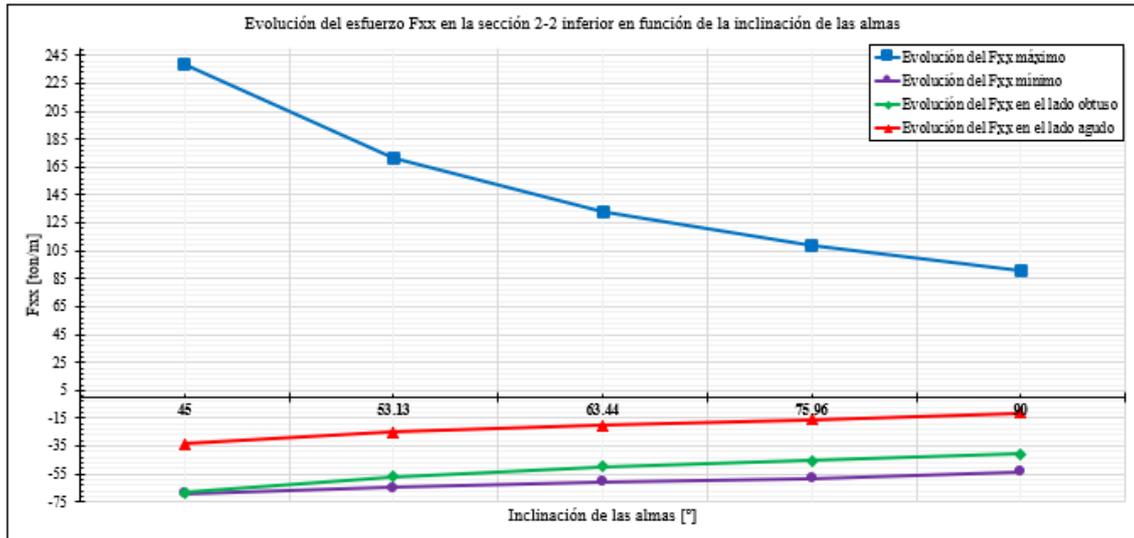


Figura 3-66. Evolución del esfuerzo F_{xx} en puntos característicos de la sección 2-2 inferior en función de la inclinación de las almas

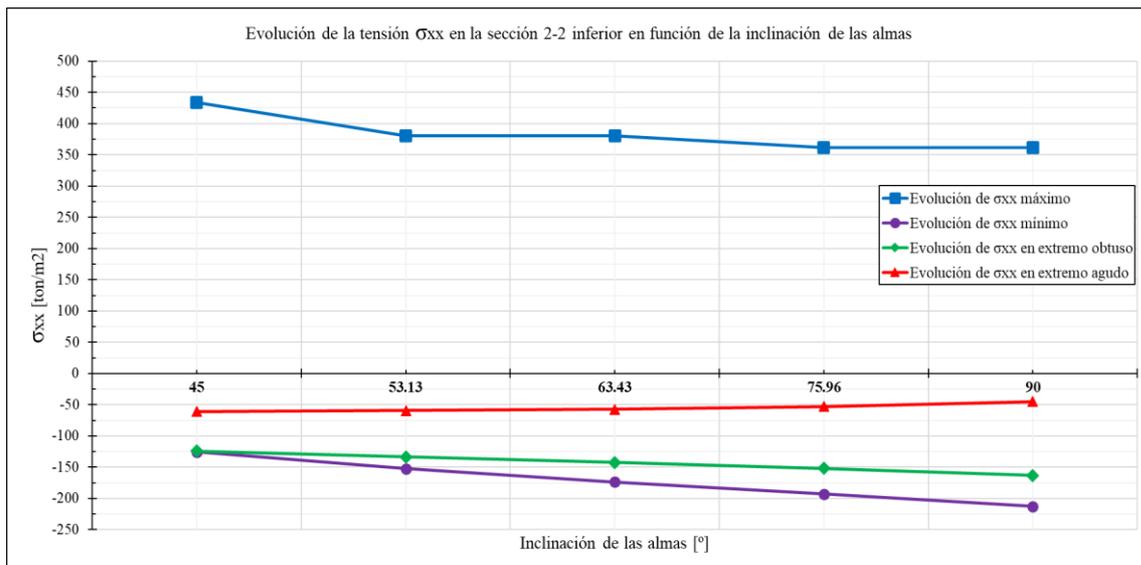


Figura 3-67. Evolución de la tensión σ_{xx} en puntos característicos de la sección 2-2 inferior en función de la inclinación de las almas

3.3.2.2 σ_{xx} en la sección 2-2 Superior

En la figura 3-68 se recoge la evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 2-2 en la losa superior del tablero en función de la inclinación de las almas. Aunque en este caso la losa superior mantiene su espesor (23 cm), también se aporta la gráfica de la distribución de tensiones σ_{xx} (figura 3-69).

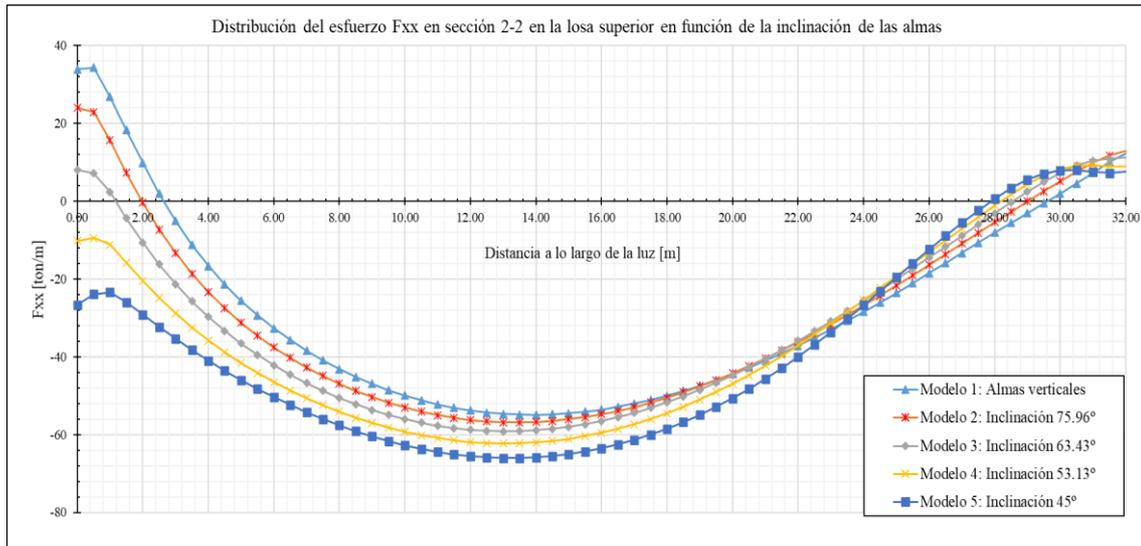


Figura 3-68. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 2-2 superior en función de la inclinación de las almas

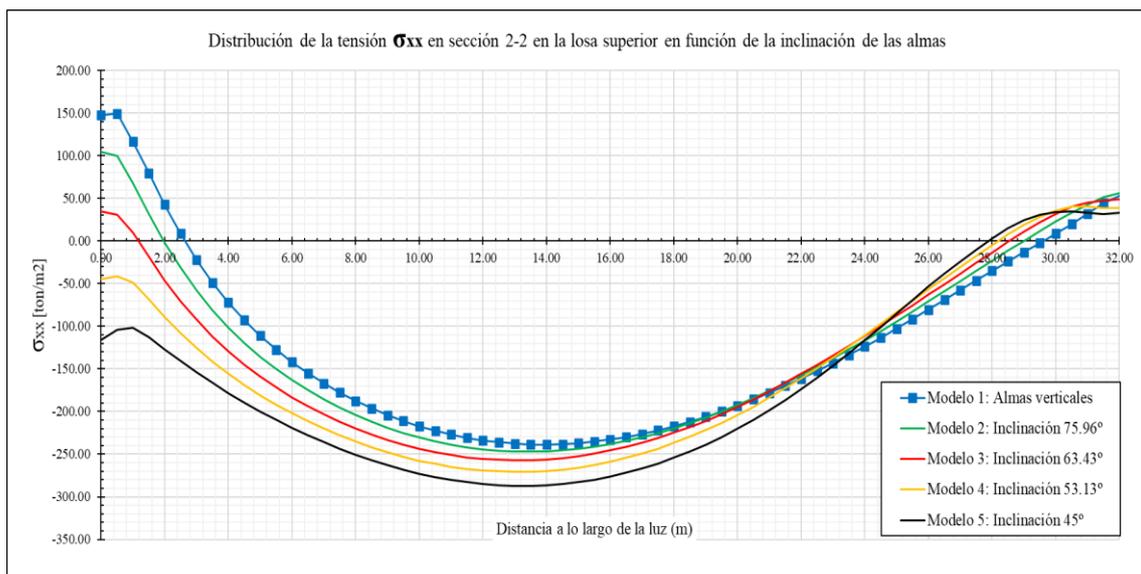


Figura 3-69. Evolución de la tensión σ_{xx} a lo largo de la sección 2-2 superior en función de la inclinación de las almas

En este caso se observa cómo no hay una variación muy exagerada del valor de las compresiones máximas conforme se va variando la inclinación de las almas, mostrando una ligera dependencia entre ambos parámetros. El máximo valor de las compresiones se alcanza en todos los casos para las secciones próximas al punto medio de la sección 2-2 si bien, están ligeramente trasladados al extremo obtuso del tablero.

Como se puede observar en la gráfica 3-69, el extremo agudo ($x = 32.00 \text{ m}$) siempre está sometido a tensiones de tracción y, mantiene el mismo nivel tensional para todos los modelos estudiados. En cambio, el extremo obtuso ($x = 0.00 \text{ m}$) pasa de estar comprimido en los modelos de 45° y 53.13° a, estar traccionado en el resto de los modelos.

Este fenómeno puede estar asociado con la posición relativa de las condiciones de contorno, respecto de los puntos donde se obtienen las tensiones, ya que cuando las almas se van inclinando, la coacción se acerca cada vez más al eje del tablero y a la vez, se aleja longitudinalmente.

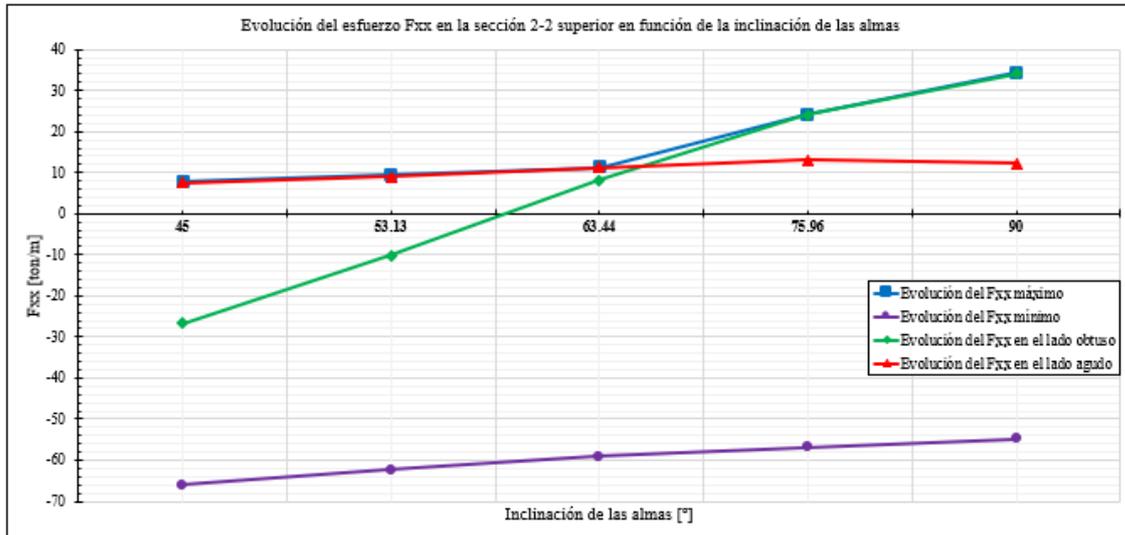


Figura 3-70. Evolución del esfuerzo F_{xx} en puntos característicos de la sección 2-2 superior en función de la inclinación de las almas

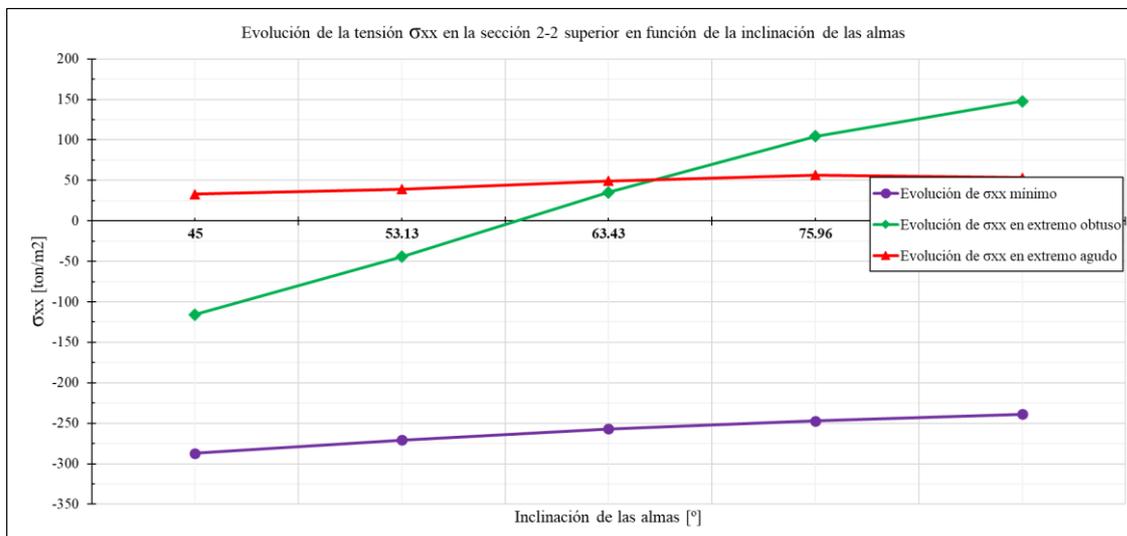


Figura 3-71. Evolución de la tensión σ_{xx} en puntos característicos de la sección 2-2 superior en función de la inclinación de las almas

3.3.2.3 σ_{XX} en la sección 3-3 Inferior

En la figura 3-72 se ilustra la evolución del esfuerzo F_{XX} a lo largo de la sección 3-3 inferior para las distintas inclinaciones de alma estudiadas. Se aporta nuevamente la gráfica de las tensiones longitudinales para esta sección (figura 3-73).

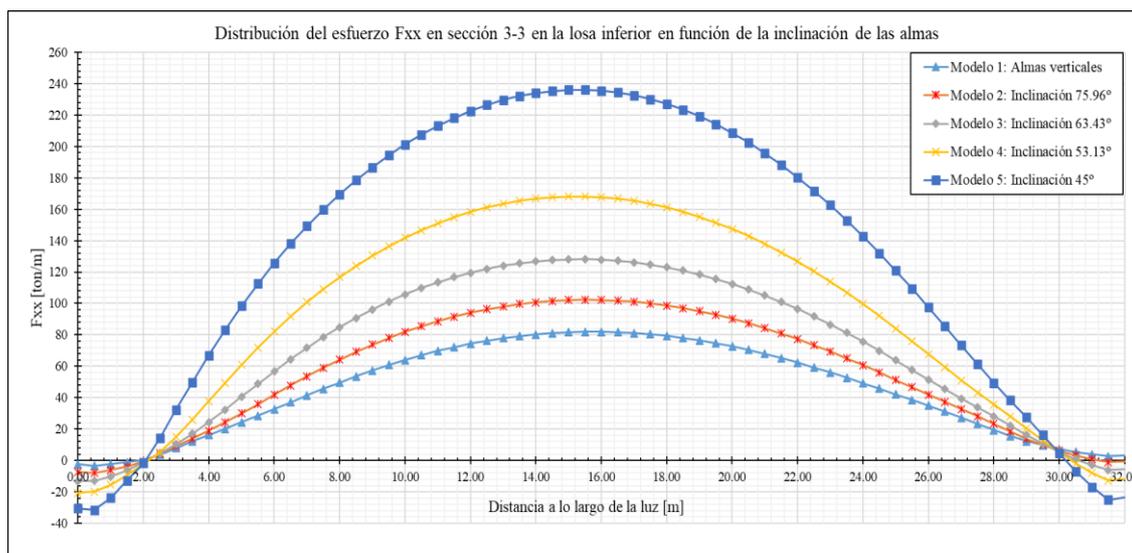


Figura 3-72. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 3-3 inferior en función de la inclinación de las almas

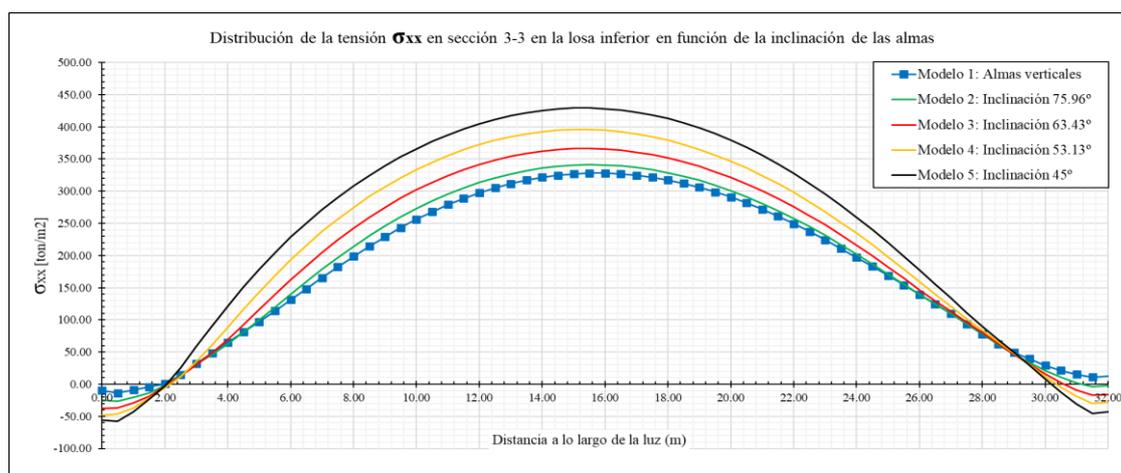


Figura 3-73. Evolución del esfuerzo σ_{xx} a lo largo de la sección 3-3 inferior en función de la inclinación de las almas

Como ocurría con los resultados obtenidos en la sección 2-2 inferior, la inclinación de las almas influye sobre todo en la magnitud de las máximas tracciones que toma la tensión σ_{xx}

Podemos destacar que, los valores obtenidos para ambas secciones (2-2 y 3-3) en la losa inferior son prácticamente idénticos entre sí. En el caso de la distribución de la tensión a lo largo de la sección 3-3 es simétrica respecto del punto medio de la sección mientras que, en la sección 2-2 el máximo está más cerca del extremo obtuso. Sin embargo, aunque el nivel que alcanzan las máximas tracciones en ambos casos es similar para todos los modelos, en el caso de la sección 3-3 inferior no se observa el pico tensional de compresiones cerca del extremo obtuso ($x = 0.00 \text{ m}$) que sí se tiene en la sección 2-2.

Según los valores que arrojan los modelos, podemos extraer que el modelo de almas más tendidas (45°) es el que mayor tensión longitudinal σ_{xx} tiene que resistir. Esto puede ser debido al espesor de

la losa inferior ya que, los modelos con almas más tendidas son también los que mayor espesor de losa inferior tienen y, por tanto, los que mayor esfuerzo deben concentrar en este elemento.

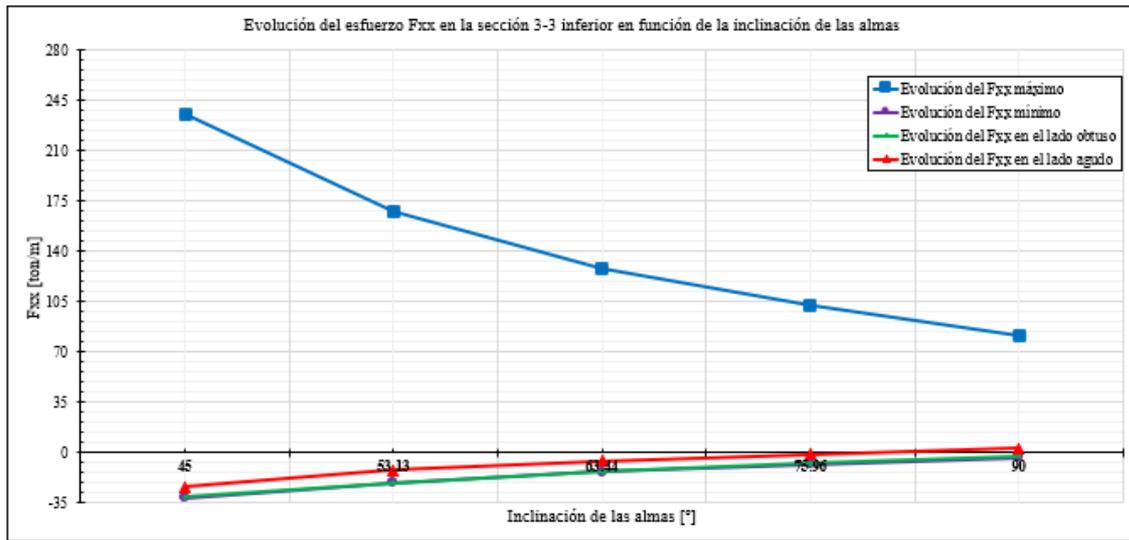


Figura 3-74. Evolución del esfuerzo F_{xx} en puntos característicos de la sección 3-3 inferior en función de la inclinación de las almas

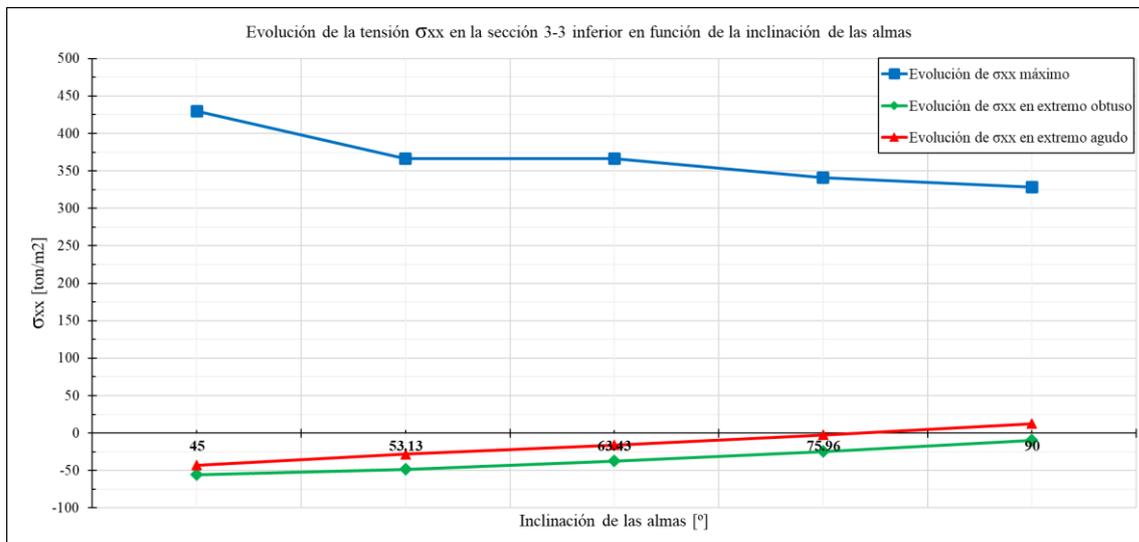


Figura 3-75. Evolución de la tensión σ_{xx} en puntos característicos de la sección 3-3 inferior en función de la inclinación de las almas

3.3.2.4 σ_{xx} en la sección 3-3 Superior

Por último, en la figura 3-76 y 3-77 se exponen, respectivamente, los resultados obtenidos del esfuerzo F_{xx} y la tensión σ_{xx} en la sección 3-3 superior para cada uno de los modelos estudiados.

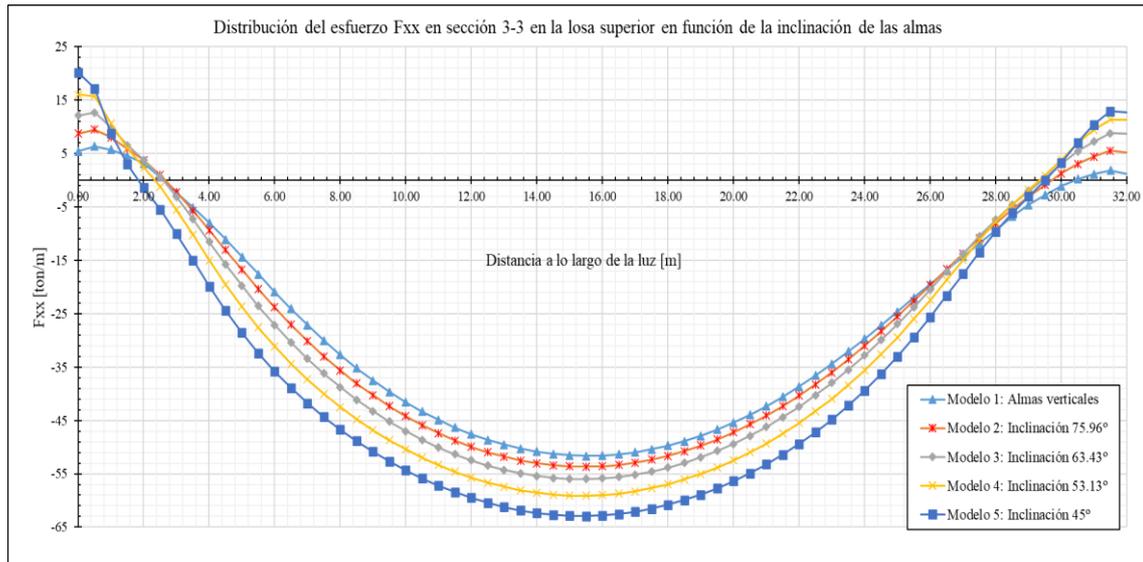


Figura 3-76. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 3-3 superior en función de la inclinación de las almas

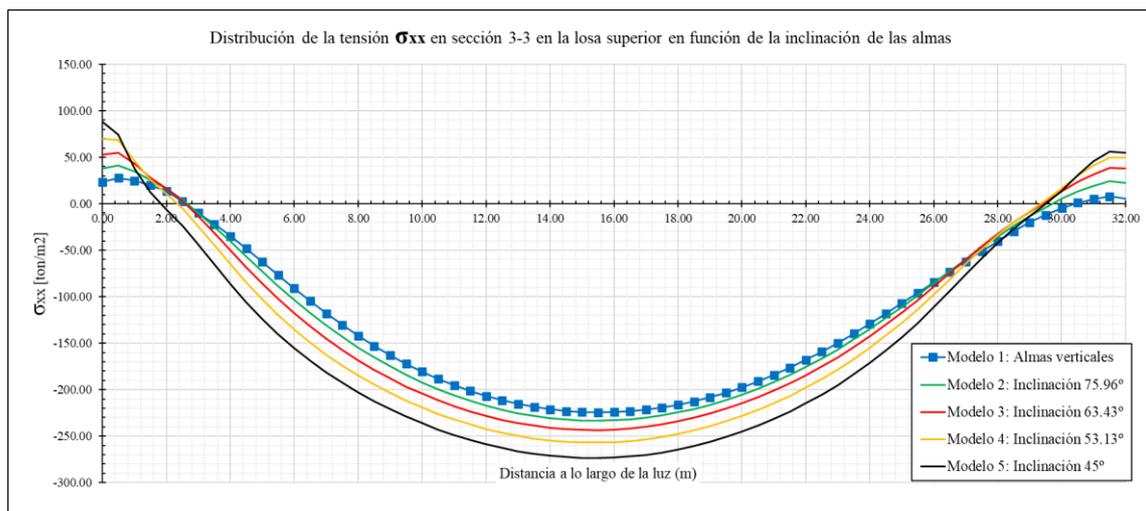


Figura 3-77. Evolución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de la sección 3-3 superior en función de la inclinación de las almas

De la gráfica anterior se extrae que, la distribución del esfuerzo F_{xx} y la tensión σ_{xx} , va regularizándose conforme nos alejamos de la conexión entre las almas y la losa superior ya que, se sigue una tendencia a la simetría desde los resultados obtenidos en la sección 2-2 (no simétricos) a los obtenidos en la sección 3-3 (aproximadamente simétricos).

En cuanto a los resultados obtenidos en la sección 3-3, apoyándonos en la figura 3-79 podemos ver como existe una ligera dependencia con la inclinación de las almas, pero nada fuera de lo normal si bien, el modelo con las almas inclinadas 45° sigue siendo el que mayores tensiones concentra de los 5.

Se observa como esta sección está en su mayoría comprimida si bien, los extremos de esta están traccionados.

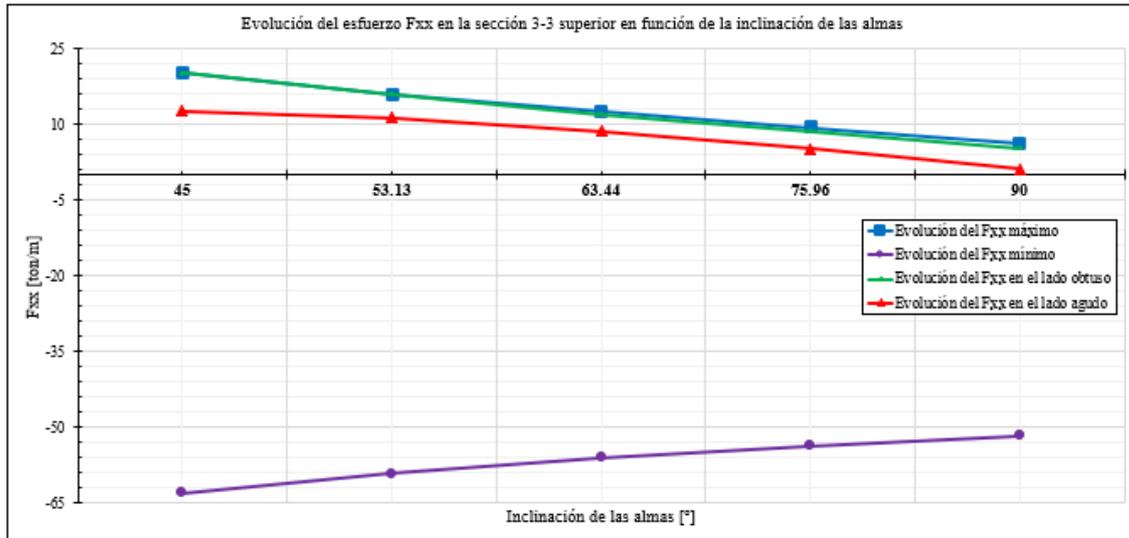


Figura 3-78. Evolución del esfuerzo F_{xx} en puntos característicos de la sección 3-3 superior en función de la inclinación de las almas

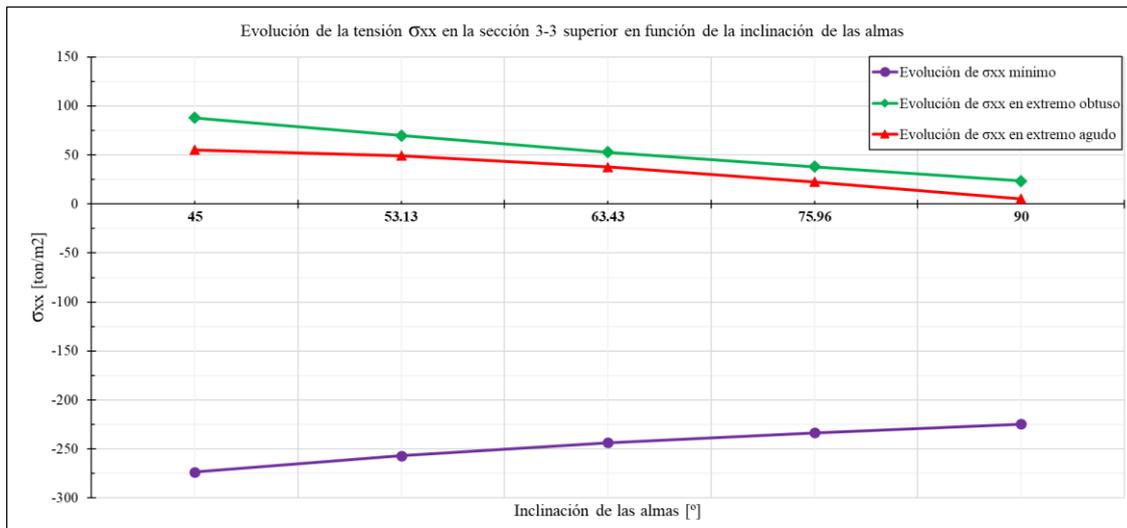


Figura 3-79. Evolución de la tensión σ_{xx} en puntos característicos de la sección 3-3 superior en función de la inclinación de las almas

Resumen del apartado:

Una vez se han analizado los datos obtenidos para cada uno de los modelos de la distribución del esfuerzo F_{xx} a lo largo de las secciones 2-2 y 3-3, las conclusiones más interesantes se recogen a continuación:

- ❖ Se ha observado que la inclinación de las almas afecta a la distribución de la tensión σ_{xx} tanto en la losa superior como en la inferior. De tal manera que, cuanto más tendidas se encuentran las almas de la sección en cajón, mayores valores de este esfuerzo se registran.

- ❖ Tal y como puede observarse en las gráficas anteriores, los valores máximos de las tensiones son prácticamente los mismos en la sección 2 y la sección 3. No obstante, existe una clara diferencia entre ambas distribuciones: se cree que es causada por la cercanía de la sección 2 al nodo donde se imponen las condiciones de contorno.

De esta manera, podemos observar como en el caso de las secciones más próximas al eje del tablero (sección 3), las distribuciones tienden a ser parabólicas mientras que, en el caso de las secciones más próximas al encuentro de las almas con las losas se observa como aparece un pico tensional en el extremo obtuso.

- ❖ En todos los casos se puede observar la influencia del esviaje del tablero. Se observa que, al acercarnos a los extremos del tablero, las tensiones cambian de signo. Este fenómeno está asociado al aumento de rigidez que aparentemente proporciona el esviaje y que se ha sido descrito anteriormente en el documento.

3.3.3 Desplazamientos

En las siguientes figuras se ilustra la evolución de los descensos de la sección AB (destacada en rojo en la figura 3-80) en función de la inclinación de las almas (figura 3-81) así como la tendencia que siguen los desplazamientos máximos para cada uno de los modelos (figura 3-82).

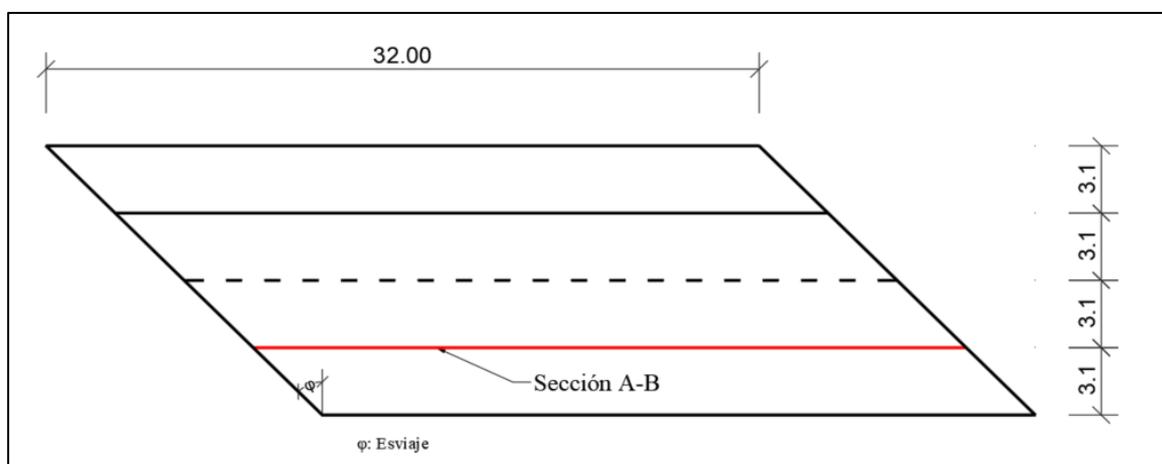


Figura 3-80. Situación de la sección AB en el tablero [Vista en PLANTA]

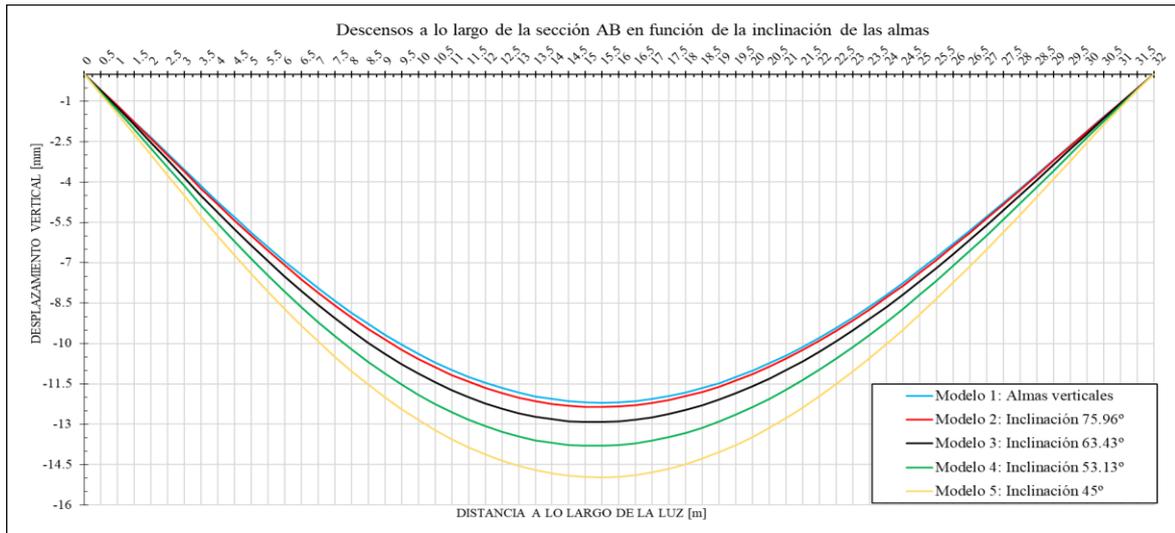


Figura 3-81. Descensos de la sección AB en función de la inclinación de las almas

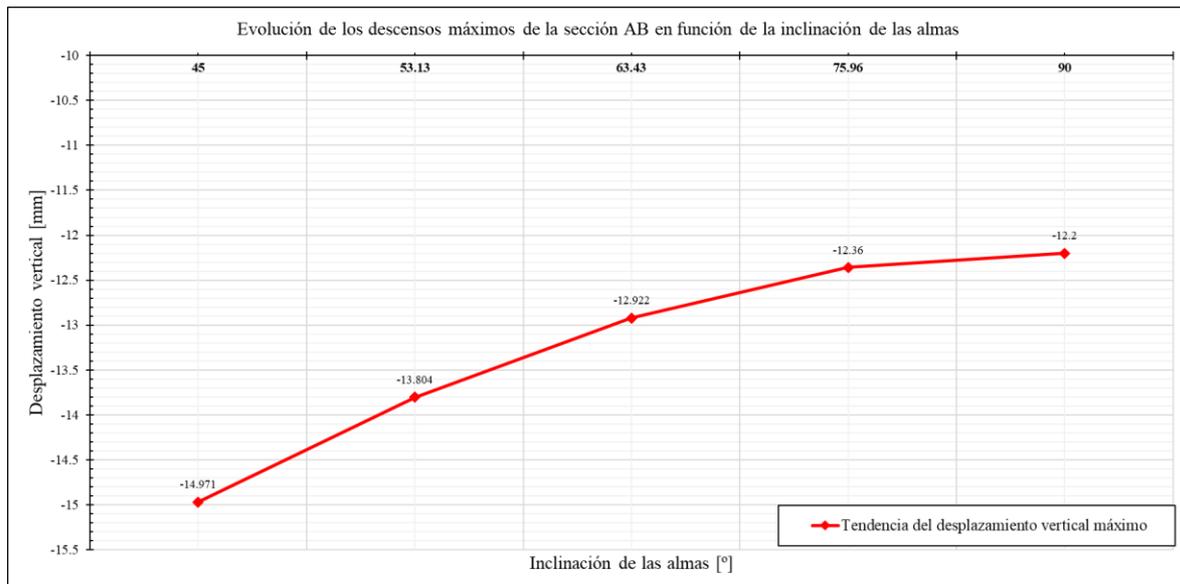


Figura 3-82. Evolución del descenso máximo en función de la inclinación de las almas

De las figuras anteriores se ve como la distribución de los descensos a lo largo de la sección AB es prácticamente simétrica respecto al punto medio del tablero para todos los modelos. La tendencia que marcan los resultados es a la disminución de los desplazamientos verticales conforme las almas se van inclinando, pasando del máximo desplazamiento cuando las almas están inclinadas 45° al mínimo cuando las almas son verticales. La dependencia con la inclinación de las almas es clara, siendo más apreciable cuanto más tendidas están estos elementos.

Se extrae en consecuencia que, el modelo más rígido es el de almas verticales ya que es el que menor desplazamientos verticales tiene. Esto podía intuirse con los resultados que arrojaba la distribución del esfuerzo F_{XX} .

Puede concluirse que en el caso de tableros esviados 45°, cuando los modelos tienen unas inclinaciones

inferiores a los 70° (aproximadamente) dejan de ser convenientes estructuralmente hablando porque, en base a los resultados obtenidos, tienen un peor reparto del estado tensional (mayores valores del esfuerzo F_{XX}) que se traduce por ejemplo en unas peores condiciones deformacionales (mayores desplazamientos verticales).

A continuación, se muestran las deformadas de cada uno de los modelos analizados. Puede observarse como los desplazamientos aumentan haciéndose máximos en la parte central del tablero. Concretamente, los mayores vencimientos se dan en los voladizos centrales, lo cual es lógico debido a la menor rigidez de estos elementos. Además, los desplazamientos van aumentando conforme las almas se van haciendo más tendidas, siendo el modelo 5 (almas inclinadas 45°) el que mayores desplazamientos registra.

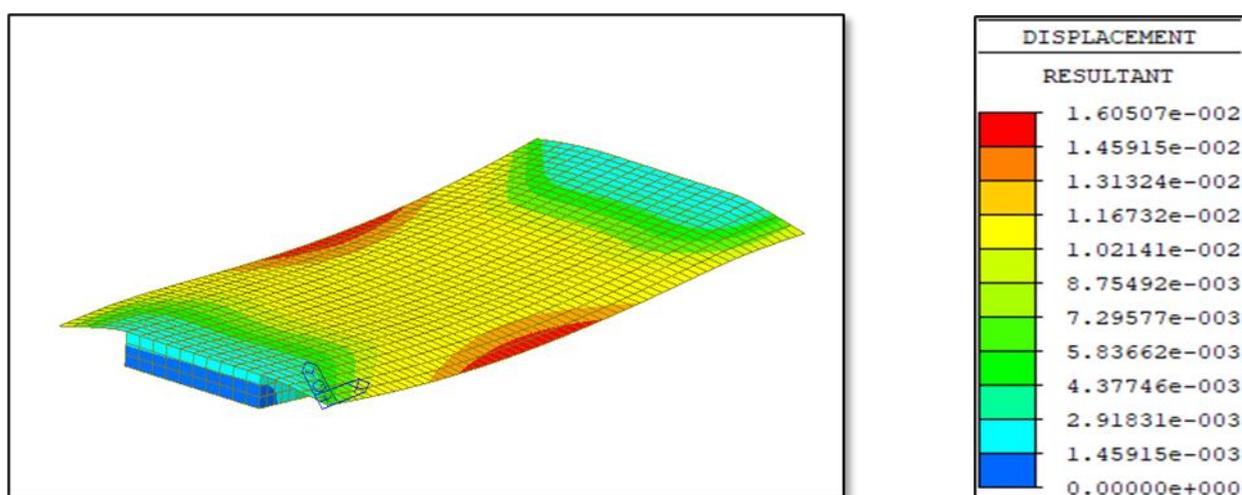


Figura 3-83. Desplazamientos globales del modelo 1 en Midas Civil: Almas verticales (desplazamientos en metros)

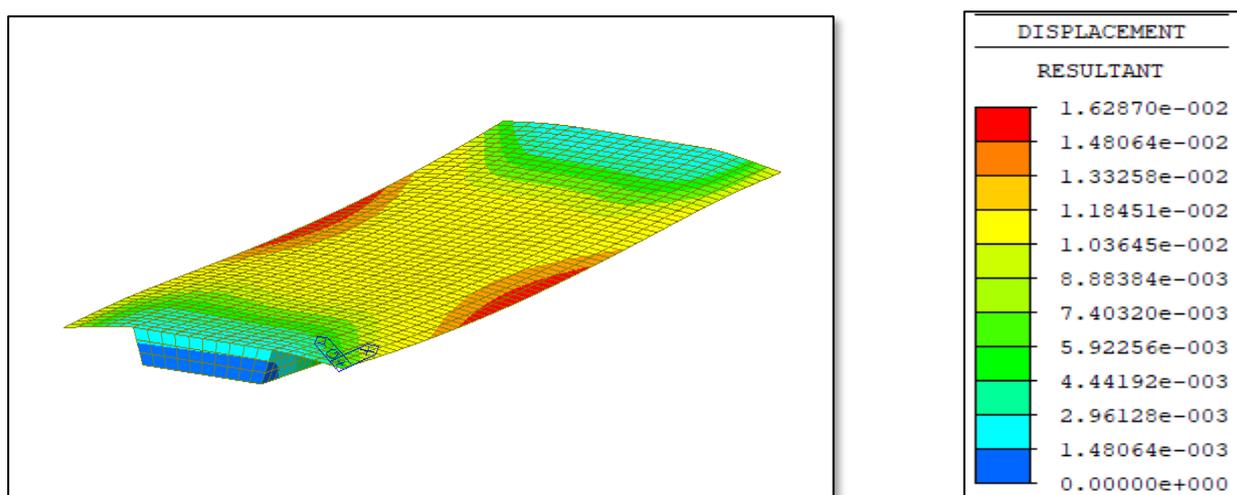


Figura 3-84. Desplazamientos globales del modelo 2 en Midas Civil: Almas inclinadas 75.96° (desplazamientos en metros)

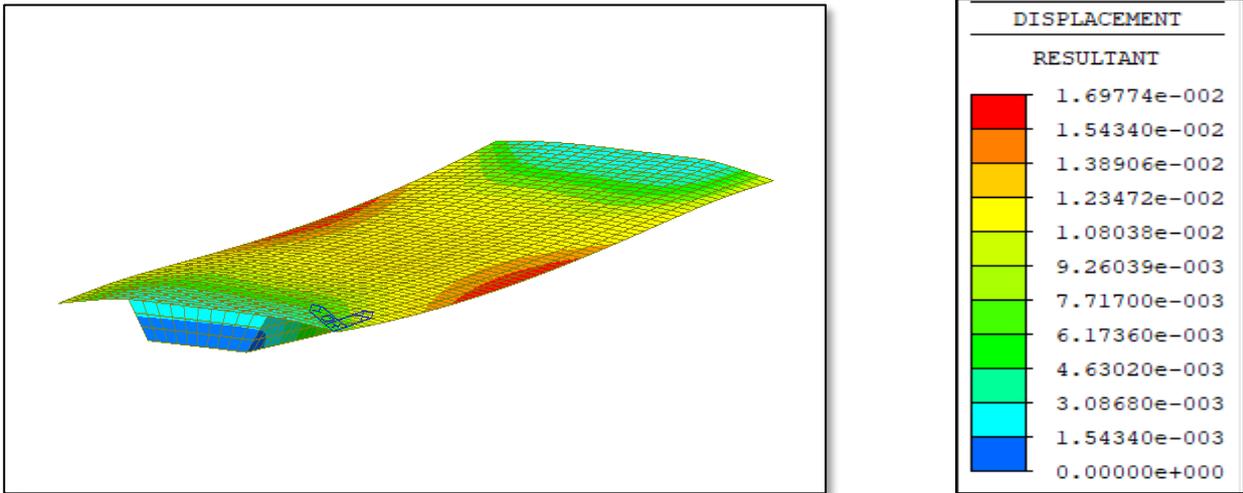


Figura 3-85. Desplazamientos globales del modelo 3 en Midas Civil: Almas inclinadas 63.43°
(desplazamientos en metros)

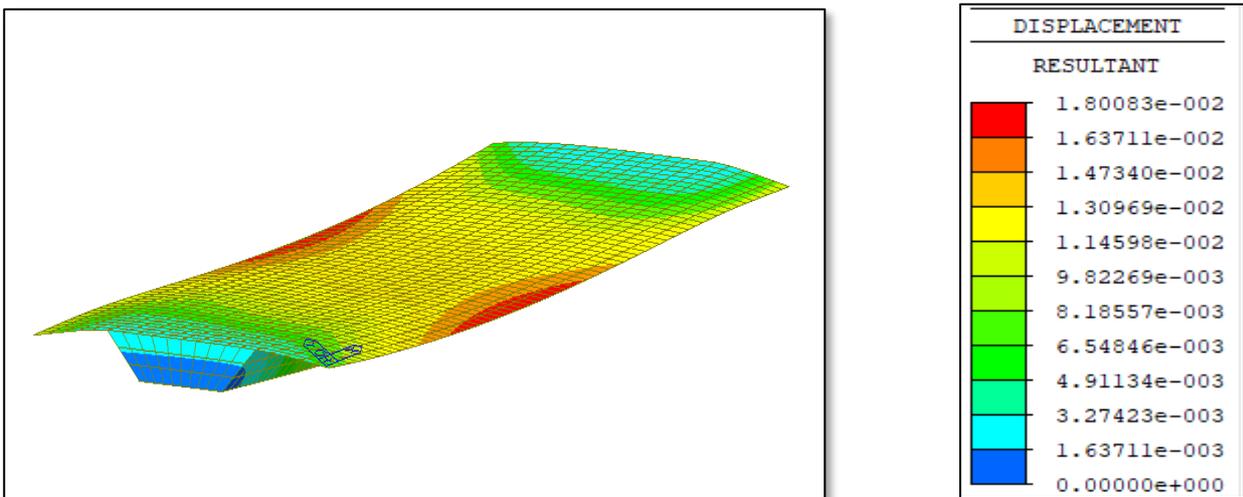


Figura 3-86. Desplazamientos globales del modelo 4 en Midas Civil: Almas inclinadas 53.13°
(desplazamientos en metros)

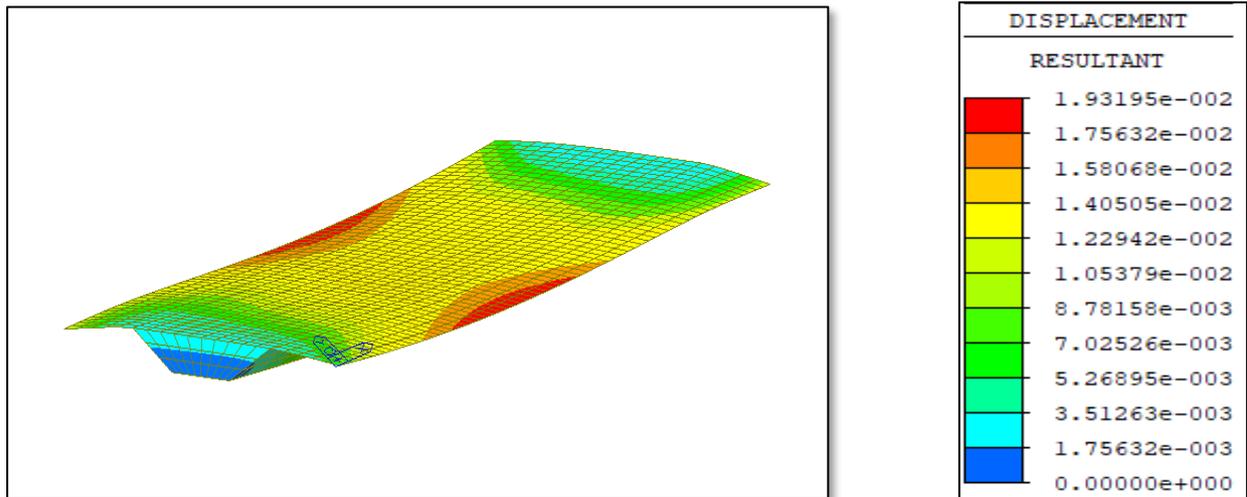


Figura 3-87. Desplazamientos globales del modelo 5 en Midas Civil: Almas inclinadas 45° (desplazamientos en metros)

3.3.4 Distorsión

En las siguientes figuras se recoge la evolución de la distorsión de la sección 1-1 (marcada en rojo en la figura 3-88) cuando se va variando la inclinación de las almas. En la tabla 3-8 se resumen los resultados que son necesarios para determinar la distorsión de dicha sección lo cual se hace de acuerdo con el criterio de signos que marca la figura 3-89.

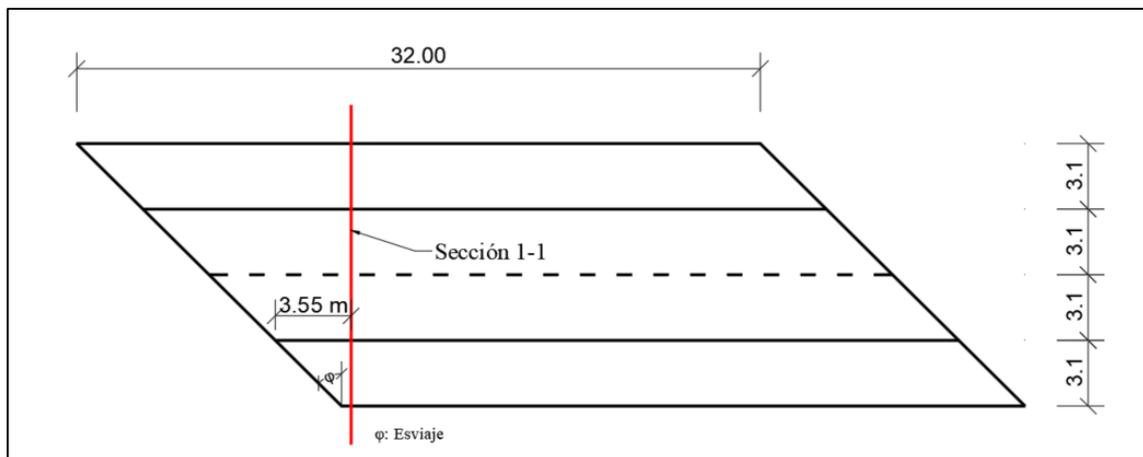


Figura 3-88. Situación de la sección 1-1 en el tablero [Vista en PLANTA]

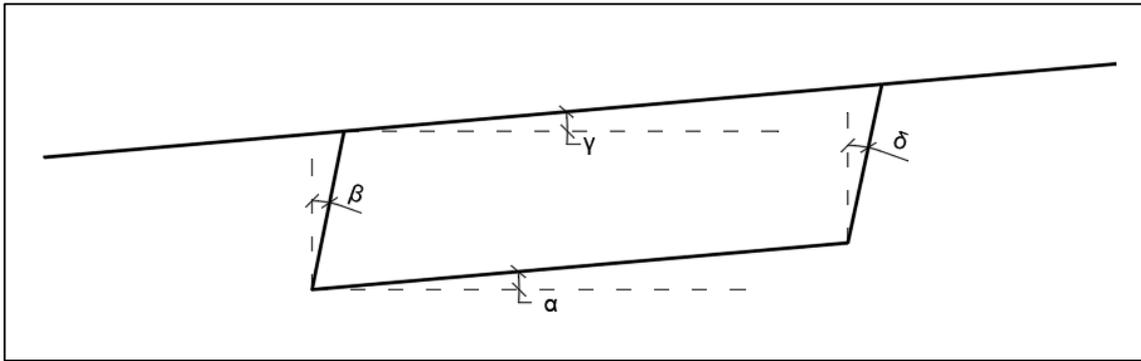


Figura 3-89. Croquis de referencia para determinar la distorsión de la sección 1-1

Tabla 3-8 Evolución de la distorsión de la sección 1-1 en función de la inclinación de las almas

Distorsión de la sección 1-1 en función de la inclinación de las almas					
	45°	53.13°	63.43°	75.96°	90°
α (rad)	-0.00083	-0.00081	-0.00083	-0.00085	-0.00091
β (rad)	0.00074	0.00066	0.00057	0.00049	0.00043
δ (rad)	-0.00076	-0.00075	-0.00077	-0.00081	-0.00091
γ (rad)	0.00067	0.00061	0.00052	0.00045	0.00041
Distorsión (mrad)	0.08661	0.14620	0.25052	0.36224	0.49093

Para determinar la distorsión se ha empleado la siguiente fórmula que tiene en cuenta cuanto han variado las aristas que componen el marco de la sección en cajón:

$$\text{Distorsión} = \frac{(\alpha + \beta) + (\gamma + \delta)}{2}$$

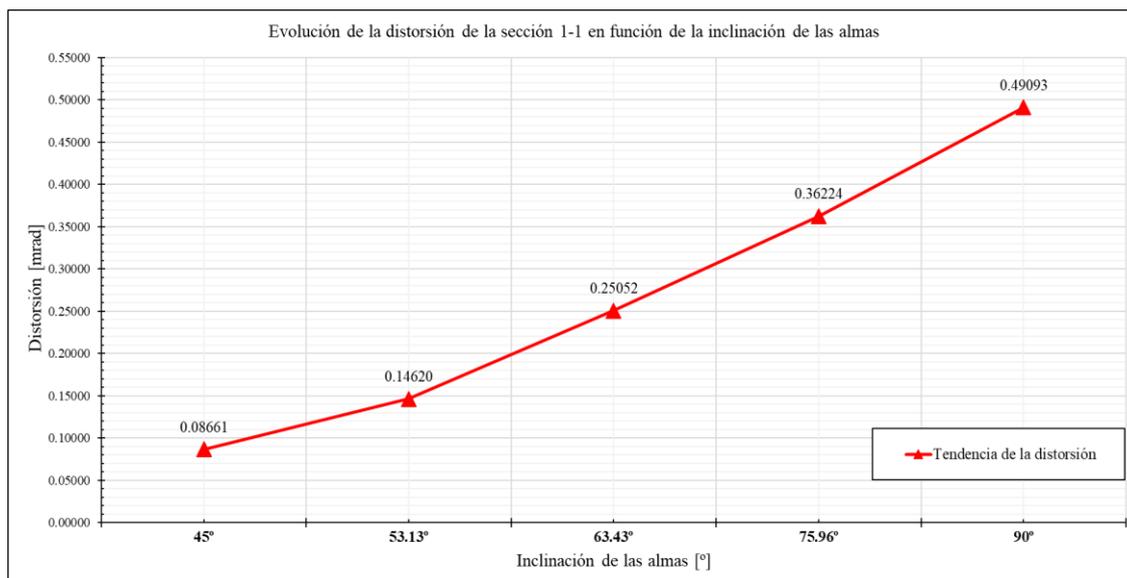


Figura 3-90. Evolución de la distorsión de la sección 1-1 con la inclinación de las almas

Una vez se han ilustrado los resultados inferidos de cada uno de los modelos podemos determinar tras su análisis que existe una clara dependencia entre la distorsión del cajón y la inclinación de las almas. En este caso se observa como la distorsión va disminuyendo conforme las almas son más tendidas, es decir, del modelo de almas inclinadas 53° sufre mayor distorsión que el de 45°, siendo el modelo de almas verticales el que mayor distorsión sufre cuando el esvaje del tablero es de 45° sobre el cual estamos trabajando. La tendencia examinada sigue la lógica de que a mayor longitud de almas más rigidez tiene el cajón.

- Comparativa con resultados de S. Cobo:

En el TFG de Sergio Cobo [3] se observa como las cargas puntuales situadas en los voladizos de la sección en cajón, hacen que la distorsión es máxima cuando las almas son verticales, pero no es mínima cuando las almas están más inclinadas, sino en una posición intermedia. Según S. Cobo, el culpable de este comportamiento es la flexión transversal que provocan las cargas puntuales cuando se aplican sobre el voladizo ya que estas añaden una deformación adicional además de la torsión.

En nuestro caso, al estar la carga uniformemente distribuida ocurre que, la distorsión de las secciones disminuye conforme más tendidas están las almas. La distorsión de las secciones únicamente al esvaje del tablero.

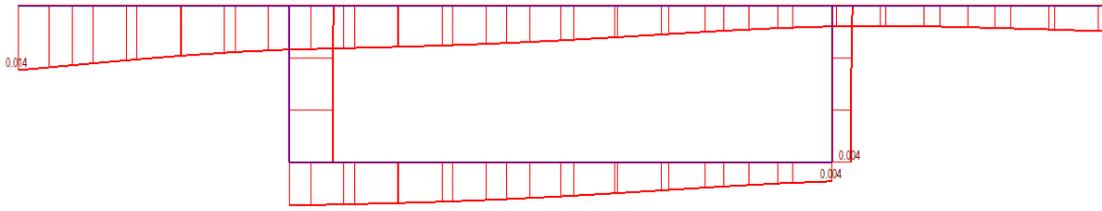


Figura 3-91. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 1: Almas inclinadas 90° (desplazamientos en metros)

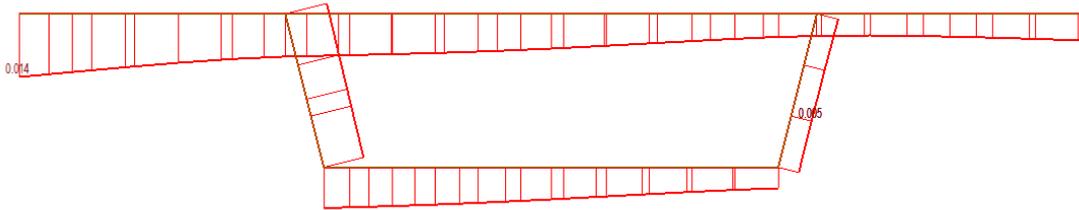


Figura 3-92. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 2: Almas inclinadas 75.96° (desplazamientos en metros)

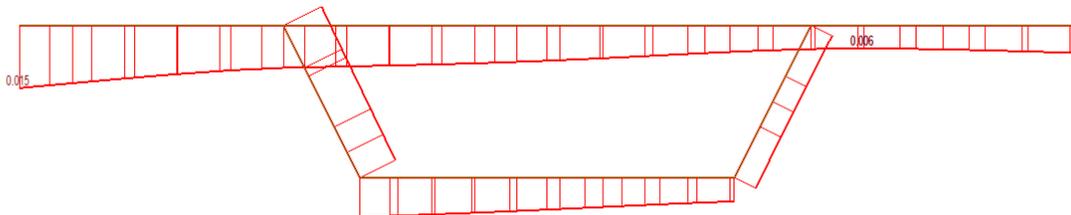


Figura 3-93. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 3: Almas inclinadas 63.43° (desplazamientos en metros)

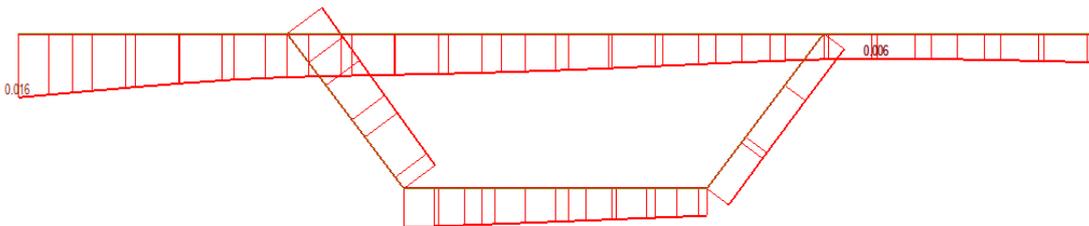


Figura 3-94. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 4: Almas inclinadas 53.13° (desplazamientos en metros)

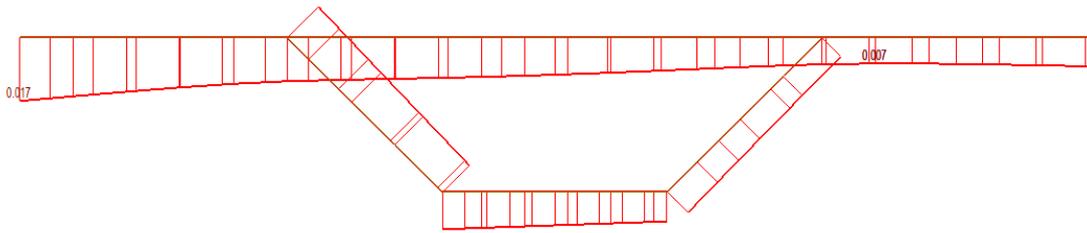


Figura 3-95. Distorsión de la sección 1-1 en el modelo 5: Almas inclinadas 45° (desplazamientos en metros)

4 CONCLUSIONES

En este capítulo se pretenden destacar las ideas principales extraídas de los resultados obtenidos al desarrollar los dos objetivos principales con los que se inició el TFG:

- La ampliación del estudio que J. Manterola desarrolló en [1] sobre la influencia del esviaje en la respuesta estructural de tableros de viaductos con sección en cajón de hormigón.
- El análisis de la influencia que tienen la inclinación de las almas en la respuesta estructural del mismo tipo de estructuras.

Se debe destacar que para poder realizar los distintos análisis y comparar los resultados, primero resultó imprescindible la construcción de un modelo que fuera capaz de reproducir los resultados que J. Manterola obtuvo en [1]. De esta manera conseguimos hacer que los sucesivos modelos realizados tuvieran unas bases comunes: Características mecánicas, condiciones de contorno, geometría general,

En los siguientes párrafos se recogen los resultados más relevantes de los dos objetivos principales destacados anteriormente para los parámetros analizados (tensiones longitudinales, desplazamientos verticales, distorsión):

Resultados extraídos del análisis de la sensibilidad a la oblicuidad del contorno:

Aquí se recogen las conclusiones más relevantes extraídas de los resultados que se han reflejado en el apartado 3.2 sobre el estudio de la sensibilidad de los tres parámetros siguientes a la oblicuidad del contorno del tablero o esviaje.

- Tensiones longitudinales:

Se observa como existe una clara dependencia de este parámetro con la variación del esviaje del tablero. Podemos concluir que el aumento progresivo del esviaje hace que las tensiones longitudinales disminuyan.

Además, podemos ver como la distribución de las tensiones longitudinales se van suavizando conforme escogemos secciones longitudinales más alejadas del encuentro de las almas con las losas.

Es importante destacar como el esviaje impone cierta rigidez adicional en los extremos obtusos del tablero. Esto tiene como consecuencia unos picos tensionales en dicha localización que, es tanto mayor cuanto más cercano están al encuentro de las almas con las losas y mayor sea el esviaje del tablero.

- Desplazamientos verticales:

Tras lo descrito en el apartado 3.2.2 de este documento, podemos destacar lo siguiente en cuanto a los desplazamientos verticales:

El esviaje no tiene influencia en la forma en la que se distribuye el desplazamiento vertical. En

todos los casos la distribución es simétrica confirmándose lo que recoge J. Manterola en sus apuntes: “La deformada es prácticamente simétrica, y únicamente se insinúa la oblicuidad, en unos corrimientos algo mayores en la zona obtusa que en la aguda.”.

Se observa una clara dependencia de los valores de los desplazamientos verticales con el parámetro analizado. En este caso, el esviaje aumenta la rigidez a flexión longitudinal del tablero disminuyendo la flecha máxima conforme el esviaje aumenta.

- Distorsión:

El esviaje del tablero impone una torsión previa a cualquier aplicación de la carga ya que, de no ser así la distorsión sería nula bajo la única aplicación del peso propio de la estructura.

Tras analizar los resultados destacados en el apartado 3.2.3, se puede concluir como el esviaje afecta significativamente a la distorsión de las secciones del tablero. En este caso, el aumento del esviaje provoca un aumento de la distorsión de las secciones transversales.

Resultados extraídos del análisis de la sensibilidad a inclinación de las almas en tableros con un esviaje dado:

Por último, se recogen las ideas de mayor importancia que se extraen del análisis de la sensibilidad a la inclinación de las almas sobre un tablero al cual se le impone un esviaje de 45°. Se debe recordar que este análisis tenía como intención ampliar alguno de los resultados que obtuvo S. Cobo en [3].

- Tensiones longitudinales

Se ha observado una dependencia clara de la inclinación de las almas de la sección en cajón con el valor de las tensiones longitudinales. En este caso, los modelos con almas más tendidas adquieren unas tensiones superiores al resto.

En cuanto a su distribución se destaca como de nuevo, las secciones que están más próximas al encuentro con de las almas con las losas del tablero presentan picos tensionales en el extremo obtuso si bien, es más acusado en la losa inferior. Conforme las secciones tienden a aproximarse al eje del tablero, la distribución se hace cada vez más simétrica.

- Desplazamientos verticales

En este caso, también se observa la inclinación de las almas hace variar la magnitud de los desplazamientos verticales. Se observa como la distribución de estos siempre es simétrica alcanzándose la flecha máxima entorno a la sección central, la cual aumenta conforme aumenta la inclinación de las almas.

Se extrae que la rigidez a flexión longitudinal es cada vez menor a medida que las almas se van tendiendo.

- Distorsión

En el análisis de la distorsión hay que destacar que, tal y como se ha destacado anteriormente, el esviaje del tablero impone una torsión a la estructura por lo que, los valores obtenidos están afectados por este fenómeno.

Se observa como la distorsión del tablero aumenta conforme disminuye la inclinación de las almas (la mayor distorsión se obtiene para el modelo de almas verticales). Lo cual sigue la idea de que

los modelos con las almas más inclinadas deben ser los que mayor rigidez a torsión tienen y, por tanto, menor distorsión de sus secciones.

5 ANÁLISIS FUTUROS

Para concluir este trabajo de fin de grado, se ha considerado importante elaborar una serie de posibles análisis futuros al objeto de que quien desee pueda ampliar los resultados que se han desarrollado en este documento. En concreto, las vías en las que podría profundizarse son las siguientes:

- El documento permite que se siga ampliando el estudio que J. Manterola realizó sobre la influencia del esvaje. De este modo, podría ampliarse a otras tipologías estructurales como puede ser el puente pérgola.
- Se podría ampliar el análisis de la influencia de la inclinación de las almas a distintos esvajes del tablero. De este modo podría compararse con los resultados obtenidos en la primera y segunda parte del estudio desarrollado en el presente documento.
- De acuerdo con lo que desarrolla S. Cobo en [3], se podría analizar la influencia del tipo de carga que actúa sobre la estructura y la localización de esta sobre la respuesta estructural.
- Podría analizarse la influencia que tiene el espesor de las losas y las almas al comportamiento o, lo que es lo mismo, la comparative entre tableros con sección en cajón construidos con hormigón, los metálicos y los tableros mixtos.
- Otra opción sería analizar la influencia del esvaje y/o la inclinación de las almas en la respuesta resistente de este tipo de estructuras de cara a un análisis dinámico.

REFERENCIAS

- [1] Manterola Armisen, J. Puentes: Apuntes para su Diseño, Cálculo y Construcción, vol. 1. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2006.
- [2] Midas Civil 2106, MIDAS IT Co. Ltd. Corea.
- [3] Sergio Cobo Pérez, Antonio Martínez de la Concha: Análisis de la sensibilidad a la inclinación de las almas en las secciones tipo cajón en puentes. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2016