

Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA
INCLINACIÓN DE LAS ALMAS EN LAS
SECCIONES TIPO CAJÓN EN PUENTES**

Autor: Sergio Cobo Pérez

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Sevilla, 2016



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería Civil

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA INCLINACIÓN DE LAS ALMAS EN LAS SECCIONES TIPO CAJÓN EN PUENTES

Autor:

Sergio Cobo Pérez

Tutor:

Antonio Martínez de la Concha

Profesor titular

Dep. Teoría de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo de Fin de Grado: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA INCLINACIÓN DE LAS ALMAS EN
LAS SECCIONES TIPO CAJÓN EN PUENTES

Autor: Sergio Cobo Pérez

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

*A mi hermano José María, mis
padres, José María y Mari
Carmen y mi amiga Cynthia
Expósito Gil*

*A mis maestros especialmente a
mi tutor Antonio Martínez de la
Concha*

Agradecimientos

La realización del trabajo de fin de grado es la meta donde todo alumno desea exponer parte de sus conocimientos que ha adquirido durante estos duros cuatro años. Sin embargo esto no habría sido posible sin una multitud de personas que en mayor o menor medida han participado en el día a día y que sería incapaz de enumerarlos a todos ya que siempre quedarían muchos en el tintero.

De cualquier forma, siempre hay personas especiales que te apoyan incondicionalmente allá donde vayas y por muy lejos que estés. Especialmente te apoyan en los momentos más duros. Esa gente es mi familia: Mi hermano mayor José María Cobo Pérez, que más allá de lo que todo hermano pueda enseñarte, destaca por sus valores morales, la humildad y bondad que muestra cada día; mis padres, José María Cobo González y Mari Carmen Pérez Ochoa, que se levantan día tras día removiendo cielo y tierra para que no nos falte de nada y por muy mala que sea las circunstancias han sabido levantarse después de cada golpe y mi amiga Cynthia Expósito Gil, que bien se dice que hay hermanos de sangre y hermanos que da la vida, por suerte he tenido la oportunidad de conocerla y a pesar de la distancia basta una mirada para decirnos todo.

Quisiera agradecerse al resto de mis amigos, Melisa, Iris, Lourdes, Mary, Mery, Alba, Cartes, Yeya, Ana, Álvaro y Lucas; darle las gracias por apoyarme y confiar en mí, alegrarme los días y sacarme una sonrisa en aquellos que ni a mí me apetecía.

Por otra parte, a mis profesores especialmente aquellos que nos amenizaban las clases, aquellos que han hecho motivarnos y aquellos que nos han atendido de buen agrado, especialmente a Cristina Torrecillas, Pilar Ariza, Lola Noguero y a mi tutor Antonio Martínez, que sin él hubiera sido imposible la realización de este trabajo. También quisiera agradecerse a mi profesor particular de Priego de Córdoba, Juan Carlos, que me ayudó a superar el gran desnivel que tenía los primeros años.

Sergio Cobo Pérez

Estudiante de Ingeniería Civil

Sevilla, 2016

Resumen

En el presente trabajo se ha realizado un estudio de sensibilidad a la inclinación de las almas en secciones tipo cajón de puentes, donde se ha procedido al estudio pormenorizado de dos modelos de secciones tipo cajón diferentes (una de ellas con las almas rectas y otro con las almas inclinadas). En dichos modelos se ha obtenido los desplazamientos, distorsiones, tensiones y esfuerzos para diferentes tipos de cargas.

Una vez analizado y obtenido los resultados de los dos modelos base anteriores, se ha procedido al estudio de la influencia de diferentes inclinaciones de las almas, obteniéndose resultados para 5 modelos de secciones tipo cajón, cuyas características y propiedades son similares entre sí para poder compararlas correctamente. Con los resultados obtenidos, se ha obtenido la variación que tiene las inclinaciones en las almas en los parámetros característicos estudiados (desplazamientos, distorsiones, tensiones y esfuerzos).

Por último, se han establecido las conclusiones acerca del análisis realizado.

Abstract

In this work it has performed a sensitivity study to the inclination of souls in sections type box type in bridges, where we proceeded to a detailed study of two different models of box type sections (one with straight souls and other with inclined souls). In such models, it has obtained the displacements, distortions, stresses and strains for different types of loads.

Once analyzed and obtained the results of the two previous base models, it has proceeded to study the influence of different inclinations of souls, obtaining results for 5 models of box type sections, whose characteristics and properties are similar to each other to compare them correctly. With the results, it has obtained the variation that the inclinations in souls has in the characteristic parameters studied (displacements, distortions, stresses and strains).

Finally, it has established the conclusions about the analysis performed.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
2 Base metodológica	3
2.1. Modelos básicos	3
2.2. Características mecánicas	7
2.3. Consideraciones adicionales	8
3 Comportamiento de la viga cajón	9
3.1 <i>Comportamiento de la viga cajón con almas verticales</i>	9
3.1.1 Respuesta ante cargas puntuales	10
3.1.1.1 Desplazamientos	10
3.1.1.2 Distorsión	12
3.1.1.3 Tensiones	14
3.1.1.4 Esfuerzos	17
3.1.1.5 Influencia de la situación de la carga	19
3.1.2 Respuesta ante cargas distribuidas	26
3.1.2.1 Desplazamientos	26
3.1.2.2 Distorsión	28
3.1.2.3 Tensiones	30
3.1.2.4 Esfuerzos	32
3.2 <i>Comportamiento de la viga cajón con almas inclinadas</i>	37
3.2.1 Respuesta ante cargas puntuales	37
3.2.1.1 Desplazamientos	37
3.2.1.2 Distorsión	39
3.2.1.3 Tensiones	41
3.2.1.4 Esfuerzos	43
3.2.1.5 Influencia de la situación de la carga	46
3.2.2 Respuesta ante cargas distribuidas	53
3.2.2.1 Desplazamientos	53
3.2.2.2 Distorsión	55
3.2.2.3 Tensiones	56
3.2.2.4 Esfuerzos	58
4 Análisis de sensibilidad	63
4.1 <i>Definición del análisis</i>	63
4.2 <i>Desplazamientos</i>	64

4.3	<i>Distorsión</i>	70
4.4	<i>Tensiones</i>	76
4.4.1	Tensiones longitudinales	76
4.4.2	Tensiones tangenciales	83
4.5	<i>Esfuerzos</i>	87
4.5.1	Momentos flectores transversales (M_y)	87
4.5.2	Axiles transversales (N_y)	90
4.5.3	Cortantes (N_{xy})	93
4.6	<i>Corroboración de los resultados: otras cargas</i>	96
4.6.1	Desplazamientos	96
4.6.2	Distorsión	104
4.6.3	Tensiones	108
4.6.4	Esfuerzos	116
4.7	<i>Resumen</i>	127
5	Conclusiones	129
	Referencias	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 – Ángulos y distorsión del modelo 1 a lo largo de la luz	12
Tabla 3.2 – Distorsión modelo 1	12
Tabla 3.3 – Desplazamientos de los nodos 3 y 7 en la sección central [m]	19
Tabla 3.4 – Distorsión de la sección central	20
Tabla 3.5 – Ángulos y distorsión del modelo 1 con carga distribuida 1 a lo largo de la luz	28
Tabla 3.6 – Distorsión modelo 1 con carga distribuida 1	29
Tabla 3.7 – Ángulos y distorsión del modelo 4 a lo largo de la luz	39
Tabla 3.8 – Distorsión modelo 4	39
Tabla 3.9 – Desplazamientos de los nodos 3 y 7 en la sección central [m]	46
Tabla 3.10 – Distorsión de la sección central	47
Tabla 3.11 – Ángulos y distorsión del modelo 4 con carga distribuida 1 a lo largo de la luz	55
Tabla 3.12 – Distorsión modelo 4 con carga distribuida 1	55
Tabla 4.1 – Distorsión y ángulos. Modelo 1	70
Tabla 4.2 – Distorsión y ángulos. Modelo 2	71
Tabla 4.3 – Distorsión y ángulos. Modelo 3	71
Tabla 4.4 – Distorsión y ángulos. Modelo 4	72
Tabla 4.5 – Distorsión y ángulos. Modelo 5	73
Tabla 4.6 – Distorsión de los modelos	74
Tabla 4.7 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 1	96
Tabla 4.8 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 2	97
Tabla 4.9 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 3	97
Tabla 4.10 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 4	98
Tabla 4.11 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 5	98
Tabla 4.12 – Desplazamientos (m) para la Carga distribuida 1	99
Tabla 4.13 – Desplazamientos (m) para la Carga distribuida 2	99
Tabla 4.14 – Desplazamientos (m) para la Carga distribuida 3	100
Tabla 4.15 – Distorsión (rad) en la sección central para las diferentes cargas en los modelos	104
Tabla 4.16 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección A	108
Tabla 4.17 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección B	108
Tabla 4.18 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección C	109
Tabla 4.19 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección D	112
Tabla 4.20 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección E	112

Tabla 4.21 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección A	116
Tabla 4.22 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección B	116
Tabla 4.23 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección C	116
Tabla 4.24 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección D	117
Tabla 4.25 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección E	117
Tabla 4.26 – Distribución de N_y (kN/m) en la sección A	121
Tabla 4.27 – Distribución de N_y (kN/m) en la sección B	121
Tabla 4.28 – Distribución de N_y (kN/m) en la sección C	121
Tabla 4.29 – Distribución de N_{xy} (kN/m) en la sección D	124
Tabla 4.30 – Distribución de N_{xy} (kN/m) en la sección E	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelos básicos	5
Figura 2.2 – Posición cargas puntuales	6
Figura 2.3 – Posición cargas distribuidas	6
Figura 3.1 – Geometría	9
Figura 3.2 – Desplazamientos del modelo [m]	10
Figura 3.3 – Desplazamientos [m] para $x = 20$ m	10
Figura 3.4 – Desplazamientos para $x = 15$ m	10
Figura 3.5 – Distribución de las flechas a lo largo de la luz en los nodos 3 y 7	11
Figura 3.6 – Ángulos de distorsión	12
Figura 3.7 – Distribución de la distorsión	13
Figura 3.8 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en el centro de la luz ($x = 20$ m)	14
Figura 3.9 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en $x = 15$ m	14
Figura 3.10 – Distribución a lo largo de la luz de σ_{xx} (kN/m ²)	15
Figura 3.11 – Distribución a lo largo de la luz de τ_{xy} (kN/m ²)	15
Figura 3.12 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de $x = 19.5$ m	16
Figura 3.13 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de $x = 19$ m	16
Figura 3.14 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central ($x = 20$ m)	17
Figura 3.15 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección de $x = 15$ m	17
Figura 3.16 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) a lo largo de la luz	17
Figura 3.17 – Distribución de los esfuerzos cortantes N_{xy} [kN/m] en la losa superior	18
Figura 3.18 – Distribución de los esfuerzos cortantes N_{xy} [kN/m] en la losa superior	18
Figura 3.19 – Situación de las cargas puntuales	19
Figura 3.20 – Desplazamiento del nodo 3 según la situación de la carga [m]	20
Figura 3.21 – Desplazamiento del nodo 7 según la situación de la carga [m]	20
Figura 3.22 – Distorsión de la sección central	21
Figura 3.23 – Puntos significativos	21
Figura 3.24 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 3 para la sección central	22
Figura 3.25 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 10 para la sección central	22
Figura 3.26 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 3 para la sección $x = 15$ m	22
Figura 3.27 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 10 para la sección $x = 15$ m	23
Figura 3.28 – M_y Sección A	23
Figura 3.29 – M_y Sección B	24

Figura 3.30 – My Sección C	24
Figura 3.31 – My Sección D	24
Figura 3.32 – My Sección E	24
Figura 3.33 – Ny Sección A	25
Figura 3.34 – Ny Sección B	25
Figura 3.35 – Ny Sección C	25
Figura 3.36 – Ny Sección F	25
Figura 3.37 – Modelos de cargas distribuidas	26
Figura 3.38 – Desplazamientos del modelo	26
Figura 3.39 – Desplazamientos [m] para $x = 20$ m	27
Figura 3.40 – Desplazamientos [m] para $x = 15$ m	27
Figura 3.41 – Distribución de las flechas a lo largo de la luz en los nodos 3 y 7	28
Figura 3.42 – Distribución de la distorsión bajo la carga distribuida 1	29
Figura 3.43 – Comparativa de cargas	30
Figura 3.44 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) para Carga Dist. 1 en el centro de la luz ($x = 20$ m)	30
Figura 3.45 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) para Carga Dist. 2 en el centro de la luz ($x = 20$ m)	31
Figura 3.46 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) para Carga Dist. 3 en el centro de la luz ($x = 20$ m)	31
Figura 3.47 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) para Carga Dist. 1 en la sección $x = 19.5$ m	32
Figura 3.48 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) para Carga Dist. 1 en la sección $x = 0$ m	32
Figura 3.49 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 1	33
Figura 3.50 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 1	33
Figura 3.51 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 2	33
Figura 3.52 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 2	33
Figura 3.53 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 3	34
Figura 3.54 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 3	34
Figura 3.55 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 1	35
Figura 3.56 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 2	35
Figura 3.57 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 3	36
Figura 3.58 – Distribución del Cortante N_{xy} en la sección del apoyo ($x = 0$ m) para la C. Dist. 1	36
Figura 3.59 – Geometría	37
Figura 3.60 – Desplazamientos del modelo	37
Figura 3.61 – Desplazamientos para $x = 20$ m	38
Figura 3.62 – Desplazamientos para $x = 15$ m	38
Figura 3.63 – Distribución de las flechas a lo largo de la luz en los nodos 3 y 7	38
Figura 3.64 – Distribución de la distorsión	40
Figura 3.65 – Comparativa de distorsión de ambos modelos	40
Figura 3.66 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en el centro de la luz ($x = 20$ m)	41
Figura 3.67 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en $x = 15$ m	41
Figura 3.68 – Distribución a lo largo de la luz de σ_{xx} (kN/m ²)	41

Figura 3.69 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de x = 19.5 m	42
Figura 3.70 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de x = 19 m	42
Figura 3.71 – Distribución a lo largo de la luz de τ_{xy} (kN/m ²)	43
Figura 3.72 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central (x = 20 m)	44
Figura 3.73 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección de x = 15 m	44
Figura 3.74 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) a lo largo de la luz	44
Figura 3.75 – Distribución de los esfuerzos cortantes N_{xy} [kN/m] en la losa superior	45
Figura 3.76 – Distribución de los esfuerzos cortantes N_{xy} [kN/m] en la losa superior	45
Figura 3.77 – Situación de las cargas puntuales	46
Figura 3.78 – Desplazamiento del nodo 3 según la situación de la carga [m]	47
Figura 3.79 – Desplazamiento del nodo 7 según la situación de la carga [m]	47
Figura 3.80 – Distorsión de la sección central	48
Figura 3.81 – Puntos significativos	48
Figura 3.82 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 3 para la sección central	49
Figura 3.83 - Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 10 para la sección central	49
Figura 3.84 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 3 para la sección x = 15 m	49
Figura 3.85 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 10 para la sección x = 15 m	50
Figura 3.86 – M_y Sección A	50
Figura 3.87 – M_y Sección B	51
Figura 3.88 – M_y Sección C	51
Figura 3.89 – M_y Sección D	51
Figura 3.90 – M_y Sección E	51
Figura 3.91 – N_y Sección A	52
Figura 3.92 – N_y Sección B	52
Figura 3.93 – N_y Sección C	52
Figura 3.94 – N_y Sección F	52
Figura 3.95 – Modelos de cargas distribuidas	53
Figura 3.96 – Desplazamientos del modelo	53
Figura 3.97 – Desplazamientos [m] para x = 20 m	54
Figura 3.98 – Desplazamientos [m] para x = 15 m	54
Figura 3.99 – Distribución de las flechas a lo largo de la luz en los nodos 3 y 7	54
Figura 3.100 – Distribución de la distorsión bajo la carga distribuida 1	55
Figura 3.101 – Comparativa de cargas	56
Figura 3.102 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) para Carga Dist. 1 en el centro de la luz (x = 20 m)	57
Figura 3.103 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) para Carga Dist. 2 en el centro de la luz (x = 20 m)	57
Figura 3.104 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) para Carga Dist. 3 en el centro de la luz (x = 20 m)	57
Figura 3.105 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) para Carga Dist. 1 en la sección x = 19.5 m	58
Figura 3.106 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) para Carga Dist. 1 en la sección x = 0 m	58
Figura 3.107 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 1	59

Figura 3.108 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 1	59
Figura 3.109 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 2	59
Figura 3.110 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 2	59
Figura 3.111 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 3	60
Figura 3.112 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 3	60
Figura 3.113 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 1	60
Figura 3.114 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 2	61
Figura 3.115 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 3	61
Figura 3.116 – Distribución del Cortante N_{xy} en la sección del apoyo ($x = 0$ m) para la C. Dist. 1	62
Figura 4.1 – Desplazamientos globales. Modelo 1	64
Figura 4.2 – Desplazamientos globales. Modelo 2	64
Figura 4.3 – Desplazamientos globales. Modelo 3	65
Figura 4.4 – Desplazamientos globales. Modelo 4	65
Figura 4.5 – Desplazamientos globales. Modelo 5	65
Figura 4.6 – Desplazamientos [m] para la sección central	66
Figura 4.7 – Flechas del Modelo 1	67
Figura 4.8 – Flechas del Modelo 2	67
Figura 4.9 – Flechas del Modelo 3	68
Figura 4.10 – Flechas del Modelo 4	68
Figura 4.11 – Flechas del Modelo 5	69
Figura 4.12 – Distorsión del modelo 1	70
Figura 4.13 – Distorsión del modelo 2	71
Figura 4.14 – Distorsión del modelo 3	72
Figura 4.15 – Distorsión del modelo 4	72
Figura 4.16 – Distorsión del modelo 5	73
Figura 4.17 – Distorsión de los modelos	74
Figura 4.18 – Distorsión en función de la inclinación	75
Figura 4.19 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²): Modelo 1	76
Figura 4.20 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²): Modelo 2	76
Figura 4.21 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²): Modelo 3	77
Figura 4.22 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²): Modelo 4	77
Figura 4.23 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²): Modelo 5	77
Figura 4.24 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección central. Modelo 1	78
Figura 4.25 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección central. Modelo 2	78
Figura 4.26 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección central. Modelo 3	79
Figura 4.27 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección central. Modelo 4	79
Figura 4.28 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección central. Modelo 5	80
Figura 4.29 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) a lo largo de la luz	81
Figura 4.30 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²): Modelo 1	83

Figura 4.31 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²): Modelo 2	83
Figura 4.32 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²): Modelo 3	83
Figura 4.33 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²): Modelo 4	84
Figura 4.34 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²): Modelo 5	84
Figura 4.35 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 1	84
Figura 4.36 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 2	85
Figura 4.37 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 3	85
Figura 4.38 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 4	85
Figura 4.39 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 5	86
Figura 4.40 – Descomposición de fuerzas y estado de cargas en el nudo	87
Figura 4.41 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central. Modelo 1	87
Figura 4.42 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central. Modelo 2	88
Figura 4.43 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central. Modelo 3	88
Figura 4.43 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central. Modelo 4	88
Figura 4.45 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central. Modelo 5	88
Figura 4.46 – Distribución del momento flector M_y (kN·m/m)	89
Figura 4.47 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 1	90
Figura 4.48 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 2	90
Figura 4.49 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 3	90
Figura 4.50 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 4	91
Figura 4.51 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 5	91
Figura 4.54 – Distribución del esfuerzo axil transversal N_y (kN/m) en el nudo 3 a lo largo de la luz	92
Figura 4.53 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 1	93
Figura 4.54 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 2	93
Figura 4.55 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 3	93
Figura 4.56 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 4	94
Figura 4.57 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 5	94
Figura 4.58 – Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} (kN/m) en el nudo 3 a lo largo de la luz	95
Figura 4.59 – DY (m) en función de la inclinación (°) en el nudo 3	101
Figura 4.60 – DZ (m) en función de la inclinación (°) en el nudo 3	101
Figura 4.61 – DY (m) en función de la inclinación (°) en el nudo 3	102
Figura 4.62 – DZ (m) en función de la inclinación (°) en el nudo 10	102
Figura 4.63 – Distorsión en la sección central para las diferentes cargas en los modelos	106
Figura 4.64 – Inclinación óptima en función de la excentricidad de la carga	107
Figura 4.65 – Secciones tensionales más importantes	108
Figura 4.66 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección A	109
Figura 4.67 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección B	110
Figura 4.68 – Distribución de σ_{xx} (kN/m ²) en la sección C	111

Figura 4.69 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección D	113
Figura 4.70 – Distribución de τ_{xy} (kN/m ²) en la sección E	114
Figura 4.71 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección A	117
Figura 4.72 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección B	118
Figura 4.73 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección C	118
Figura 4.51 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección D	119
Figura 4.75 – Distribución de M_y (kN·m/m) en la sección E	119
Figura 4.76 – Distribución de N_y (kN/m) en la sección A	122
Figura 4.77 – Distribución de N_y (kN/m) en la sección B	122
Figura 4.78 – Distribución de N_y (kN/m) en la sección C	123
Figura 4.79 – Distribución de N_{xy} (kN/m) en la sección D	125
Figura 4.80 – Distribución de N_{xy} (kN/m) en la sección E	125

1 INTRODUCCIÓN

La magia es un puente que te permite ir del mundo visible hacia el invisible. Y aprender las lecciones de ambos mundos..

- Paulo Coelho -

La existencia de puentes surgió como solución ante la necesidad de salvar determinados elementos que interfieren en su camino. Inicialmente, sorteaba elementos geográficos tales como ríos, valles o precipicios, pues obstaculizaba o impedía la comunicación entre sus márgenes opuestos. Más tarde, el desarrollo de los diferentes tipos de viarios, aportó una nueva causa para su proliferación como método de diálogo que concilia la presencia de varias vías en un mismo punto sin tener que intersectarse.

A lo largo de la historia, con el desarrollo científico-tecnológico e incorporación de nuevos materiales de construcción y técnicas han posibilitado la existencia de un gran catálogo de tipologías de puentes. Éstos pueden clasificarse según su tipología estructural, es decir, según como soportan los esfuerzos; según la función primordial que cumplen y atendiendo al material empleado, entre otros.

Atendiendo al material que están contruidos, los puentes pueden ser de madera, que son los primeros en aparecer donde los más rudimentarios consistían en uno o varios troncos o tablones unidos. Más tarde, desde la antigüedad hasta el siglo XIX se han desarrollado los puentes de piedra, formados por arcos permitiendo aguantar grandes cargas y su propio peso.

A partir del siglo XIX con la revolución industrial, aparecen los primeros puentes de hierro y acero, cuya morfología primaria imitaba a los hasta entonces puentes de arcos de piedra. Poco a poco con la experiencia e investigación fueron surgiendo nuevas morfologías, ganando los puentes en celosía, cuyo peso aligerado y buenas propiedades del material permitía la construcción de nuevos puentes de forma rápida, económica y eficaz.

Posteriormente, surgieron los puentes de hormigón armado y puentes de hormigón pretensado. Son los más utilizados actualmente, pues combinan las buenas propiedades del acero y también las de hormigón. Además, son capaces de salvar distancias cada vez mayores anteriormente impensables, cada vez son más económicos y la producción en serie, es hoy en día un hecho.

Cabe preguntarse, cuál será el material del futuro. Quizás estemos equivocados pero la tendencia de la nanotecnología puede dar la clave a los materiales del futuro donde cada vez se potencian y extraen las propiedades que el ser humano reclama y con la tecnología actual, es cada día más factible.

Por otra parte, los puentes según su función característica se pueden clasificar en acueductos, utilizados para el transporte de agua; los viaductos, puentes destinados al paso de vehículos y las pasarelas, puentes destinados al paso peatonal.

Finalmente, según su morfología estructural se establecen tres grandes familias:

- a) Puentes rectos o puentes viga: Son la solución más sencilla y primigenia. La estructura resistente es la propia losa (viga) del puente, cuyo mecanismo primordial de transmisión de cargas es la flexión generalizada.
- b) Puentes arco, donde el arco es el soporte fundamental del tablero. Dentro de esta tipología se puede subclasificar en varios tipos: Puente arco con tablero superior, puente arco con tablero intermedio y puente en arco con tablero inferior.
- c) Puentes atirantados y colgantes, se utiliza los cables (tirantes) como soporte fundamental del tablero.

Como podemos observar, los puentes admiten una amplia gama de posibilidades. Sin embargo, la mayoría de ellos, especialmente hoy en día, poseen una forma del tablero específica, la cual es, la sección en cajón.

La sección en cajón es la más utilizada en todo tipo de puentes, esto es debido a que posee ciertas características geométricas que potencian las propiedades del hormigón y acero empleado:

- Gracias a su gran cabeza superior e inferior permite soportar grandes momentos flectores (tanto positivos como negativos).
- Al ser una sección cerrada, proporciona gran rigidez a la torsión. Además tienen pequeños alabeos y la distorsión es reducida. Esto la hace adecuada para que soporte todo tipo de cargas ya estén centradas o no lo estén.
- Posee gran rigidez transversal permitiendo reducir al mínimo su espesor y por tanto, material necesario.
- Gran radio de giro y relación inercia frente área, siendo muy adecuado para los puentes pretensados.
- Otras.

Posee ciertas características resistentes que explican su uso extensivo en la mayoría de puentes. Constan de gran resistencia tanto a flexión y torsión. La sección transversal tiene gran flexibilidad y las losas del cajón tienen deformabilidad por el esfuerzo cortante. Además, la losa tiene gran resistencia bajo la actuación de cargas directas, destacando por ejemplo la actuación del paso de vehículos pesados.

Dichas propiedades permite obtener tableros muy resistentes a pesar de que sean de espesores muy pequeños y ligeros. Es apropiada para todo tipo de luces, desde pequeñas hasta grandes aunque ganan protagonismo y dominan en luces grandes.

A su vez, los puentes de sección en cajón pueden presentarse de diferentes formas, longitudinalmente; con el canto e inercia constante, con el canto constante pero la inercia variable y el tercer caso, donde la inercia y el canto son variables. También la disposición de sus almas es variable, éstas pueden ser rectas (siendo perpendiculares a la losa superior e inferior) e inclinadas. Otra variación es el número de células que conforman la sección pueden ser de una célula o monocelular o de varias células.

Para rigidizar aún más la sección puede disponerse diversos puntales transversales (desde las alas a las almas), para unir varias células entre sí...

En este trabajo, nos centraremos en el estudio de las diferentes inclinaciones de las almas en secciones en cajón de puentes de hormigón obteniendo la influencia que dicha variación tiene en las propiedades del puente. Para ello modelizaremos varios puentes de sección en cajón con diferentes geometrías pudiendo comparar y obtener conclusiones acerca de las ventajas e inconvenientes que tiene cada una de ellas. Sabremos cómo funcionan una de las formas principales de puentes actualmente, constituyendo la base de estudio que todo ingeniero civil necesita conocer a la hora de diseñar una de sus obras cumbre; los puentes.

2 BASE METODOLÓGICA

El análisis de sensibilidad a la inclinaciones de las almas en las secciones tipo cajón en puentes ha sido concebido a partir del estudio realizado en el capítulo 5 ‘La sección cajón de hormigón’ del libro ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I’ de Javier Manterola Armisén.

La motivación del análisis ha sido justificada para poder corroborar los resultados y conclusiones de Javier Manterola en el libro anteriormente mencionado, así como, profundizar en la influencia que tiene la inclinación de las almas en puentes tipo cajón.

Para la realización del estudio se ha empleado el programa Midas Civil 2016. En él se han realizado los diferentes tipos de modelos, estableciendo analogía entre ellos para poderlos comparar, y solicitaciones para analizar, caso por caso, las diferentes particularidades pudiendo obtener los resultados buscados.

2.1. Modelos básicos

Para el análisis de los diferentes casos de sección, se ha establecido unos condicionantes preliminares con el fin de poder relacionarlos entre sí. Para ello se ha escogido un puente de 40 metros de luz, 12 metros de anchura (losa superior) y 2 metros de canto. Se encuentra biapoyado en sus extremos, en los cuales se han colocado además diafragmas.

Se han realizado una serie de modelos básicos según muestra la Figura 2.1, que aparece a continuación. Para conseguir cierta analogía entre ellos, se han aplicado los siguientes criterios para poder seleccionar las dimensiones de cada uno de ellos: similares áreas de la sección e inercias a flexión.

Entre los modelos, se ha mantenido el espesor y anchura de la losa superior, espesor de sus almas pero para conseguir que mantengan aproximadamente los mismos valores de áreas, inercias... se ha modificado el espesor de la losa inferior debido a la progresiva inclinación de sus almas con el criterio primordial de que se mantenga constante el área de la losa inferior.

Con el fin de lograr un análisis pormenorizado de cada sección, se han creado elementos tipo placa gruesa (considerando la deformación por cortante) de diferentes espesores (según modelos), cada 0.5 m en sus tres direcciones.

Las direcciones de los ejes son las siguientes: El eje ‘x’ determina la dirección del puente, la luz; el eje ‘y’, la anchura del puente; mientras que el eje ‘z’ se refiere a la altura (cota) del mismo.

Por otra parte, se han colocado las siguientes condiciones de contorno en sus apoyos: En los cuatro apoyos que tiene, dos por extremo, se le han restringido los siguientes movimientos: En uno de ellos en dirección ‘x’, ‘y’ y ‘z’, a su compañero del mismo extremo, se ha restringido la dirección ‘z’. En el otro extremo, se le ha restringido la dirección ‘z’ en ambos nudos y la dirección ‘y’ en uno de ellos. Por otro lado, para simular la colocación de los diafragmas en ambos extremos, se le han impedido en todos los nudos de las secciones extremas, el movimiento en dirección ‘y’, ‘z’ y la rotación en el eje ‘x’.

La carga puntual aplicada en los diferentes casos y posiciones será de 1000 kN.

La carga distribuida aplicada en los diferentes casos y posiciones será de 4 kN/m^2 , según se estipulaba en la antigua Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. La Instrucción actual establece que dicha carga debe ser de 9 kN/m^2 en 3 metros a lo ancho de la sección, sin embargo, se ha optado por la carga anterior por diversos motivos:

- Al ser colocada a lo largo de sus 40 metros de luz y sobre 6 metros de ancho, equivale a 960 kN, fuerza similar a la carga puntual.

- Es el valor utilizado por Javier Manterola en un estudio similar del que este pretende ser una ampliación.

Las diferentes posiciones de las cargas puntuales y cargas distribuidas, han sido representadas en la Figura 2.2 y la Figura 2.3, respectivamente. Se han aplicado sobre el 'Modelo 1' de la Figura 2.1, del mismo modo, se extiende para el resto de modelos.

En la Figura 2.2, se han establecido 5 posiciones de cargas en los nudos '1' al '5'. Por simetría, los casos correspondientes a los nudos '6' al '9' son simétricos a los anteriores.

En la Figura 2.3, se han establecido 3 casos diferentes.

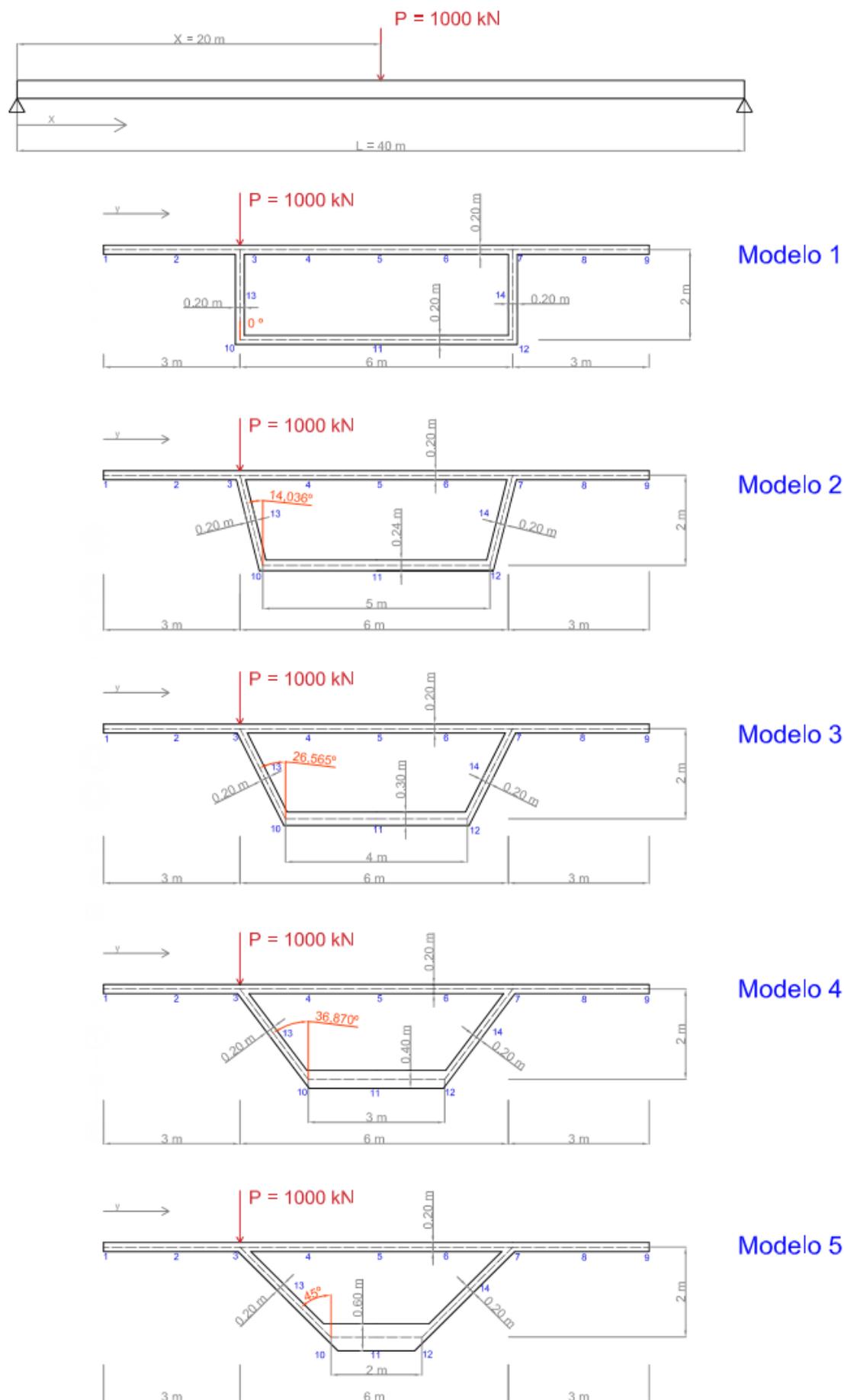


Figura 2.1 – Modelos básicos

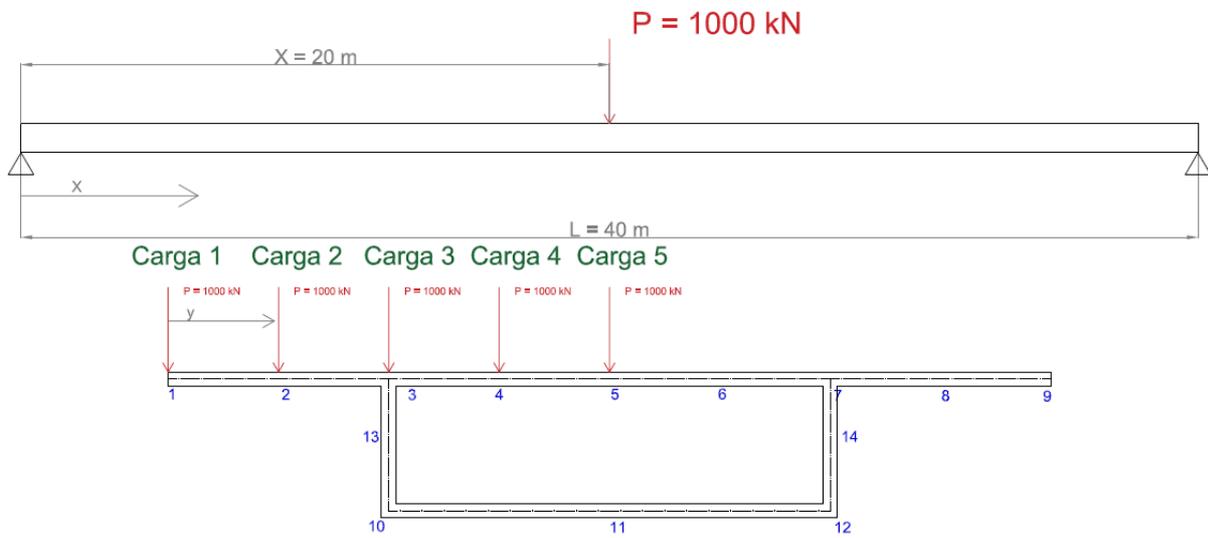


Figura 2.2 – Posición cargas puntuales

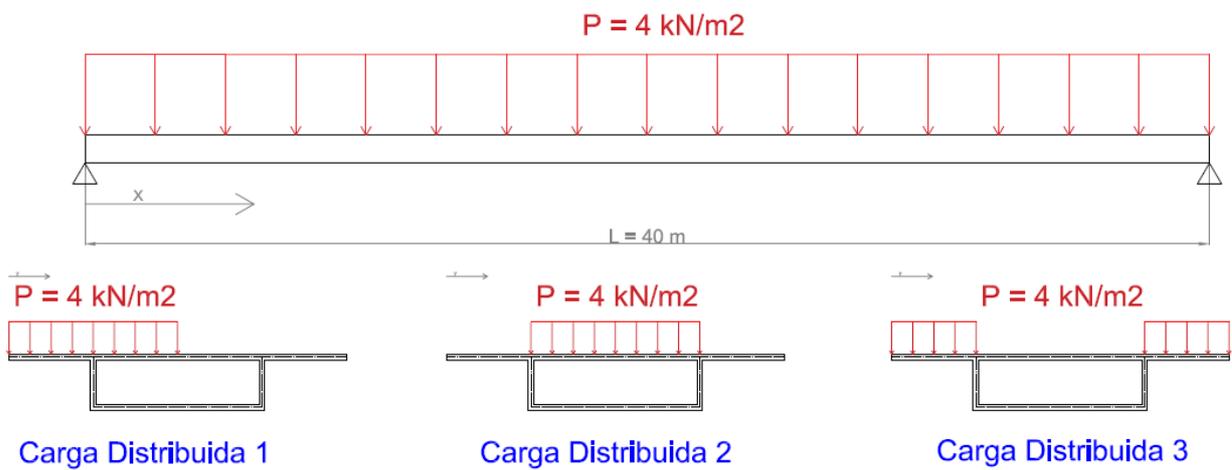


Figura 2.3 – Posición cargas distribuidas

2.2. Características mecánicas

A continuación se muestran las características más importantes de cada modelo seccional:

Modelo 1:

- Área: 4.36 m^2
- Inercia a flexión: 3.538 m^4
- Inercia a torsión: 7.433 m^4
- Centro de gravedad: 0.8340 m desde la fibra superior

Modelo 2:

- Área: 4.39 m^2
- Inercia a flexión: 3.555 m^4
- Inercia a torsión: 7.050 m^4
- Centro de gravedad: 0.8369 m desde la fibra superior

Modelo 3:

- Área: 4.45 m^2
- Inercia a flexión: 3.581 m^4
- Inercia a torsión: 6.391 m^4
- Centro de gravedad: 0.8405 m desde la fibra superior

Modelo 4:

- Área: 4.48 m^2
- Inercia a flexión: 3.615 m^4
- Inercia a torsión: 5.378 m^4
- Centro de gravedad: 0.8483 m desde la fibra superior

Modelo 5:

- Área: 4.67 m^2
- Inercia a flexión: 3.663 m^4
- Inercia a torsión: 4.568 m^4
- Centro de gravedad: 0.8525 m desde la fibra superior

2.3. Consideraciones adicionales

En la Figura 2.1 se han numerado varios nodos de interés de cada sección del modelo aunque en el modelo utilizado tiene más nodos intermedios, cada medio metro en todos los casos excepto en las almas inclinadas, que se han colocado entre 4 o 5 nudos con el fin de que sean similares en magnitud al resto. De tal forma, los modelos constan de los siguientes elementos conectando todos los nodos:

- Modelo 1: 3520 elementos tipo placa, todas ellos de dimensiones 0.50 m x 0.50 m, con un espesor de 0.20 m. Cada sección tiene su alma formada por 4 elementos.
- Modelo 2: 3360 elementos tipo placa; donde 800 placas son 0.50 m x 0.50 m, con un espesor de 0.24 m, que son las correspondientes a la losa inferior; 640 placas correspondientes a las almas y son de 0.50 m x 0.515 m con un espesor de 0.20 m y 1920 placas correspondientes a la losa superior de 0.50 m x 0.50 m x 0.20 m. Cada sección tiene su alma formada por 4 elementos.
- Modelo 3: 3200 elementos tipo placa; donde 640 corresponden a la losa inferior, de 0.50 m x 0.50 m x 0.30 m, 640 placas correspondientes a las almas y son de 0.50 m x 0.559 m con un espesor de 0.20 m y 1920 placas correspondientes a la losa superior de 0.50 m x 0.50 m x 0.20 m. Cada sección tiene su alma formada por 4 elementos.
- Modelo 4: 3040 elementos tipo placa; donde 480 corresponden a la losa inferior, de 0.50 m x 0.50 m x 0.40 m, 640 placas correspondientes a las almas y son de 0.50 m x 0.625 m con un espesor de 0.20 m y 1920 placas correspondientes a la losa superior de 0.50 m x 0.50 m x 0.20 m. Cada sección tiene su alma formada por 4 elementos.
- Modelo 5: 3040 elementos tipo placa; donde 320 corresponden a la losa inferior, de 0.50 m x 0.50 m x 0.60 m, 800 placas correspondientes a las almas y son de 0.50 m x 0.566 m con un espesor de 0.20 m y 1920 placas correspondientes a la losa superior de 0.50 m x 0.50 m x 0.20 m. Cada sección tiene su alma formada por 5 elementos.

El material empleado en todos los casos es el hormigón C 30/37, que tiene las siguientes propiedades:

- Resistencia característica de 30 MPa; $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Módulo de Poisson de 0.2; $\nu = 0.2$
- Módulo de Elasticidad de $3.2836 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$; $E = 3.2836 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$

A continuación se analizarán por detallado los modelos básicos 1 y 4. Mientras que el resto de modelos se analizarán conjuntamente en aquellas magnitudes y datos que resulten de interés, pudiendo obtener conclusiones acerca de la influencia que tiene la inclinación de las almas.

3 COMPORTAMIENTO DE LA VIGA CAJÓN

En el capítulo presente, se procede a estudiar el comportamiento pormenorizado de la viga cajón con almas verticales, que corresponde al modelo básico 1 y al modelo 4, de almas inclinadas. Se estudiará la respuesta ante la carga puntual colocada en la losa superior en la zona del alma izquierda de la sección. Y a continuación se procederá a estudiar varios casos, moviendo dicha carga puntual en diferentes posiciones a lo largo de la losa superior y también de las particularidades cuando son cargas distribuidas.

En cada caso, se detallarán los desplazamientos, distorsión, tensiones longitudinales y tangenciales y esfuerzos más representativos.

3.1 Comportamiento de la viga cajón con almas verticales

El primer modelo utilizado consiste aquel con la sección en cajón con las almas verticales. La geometría es la siguiente:

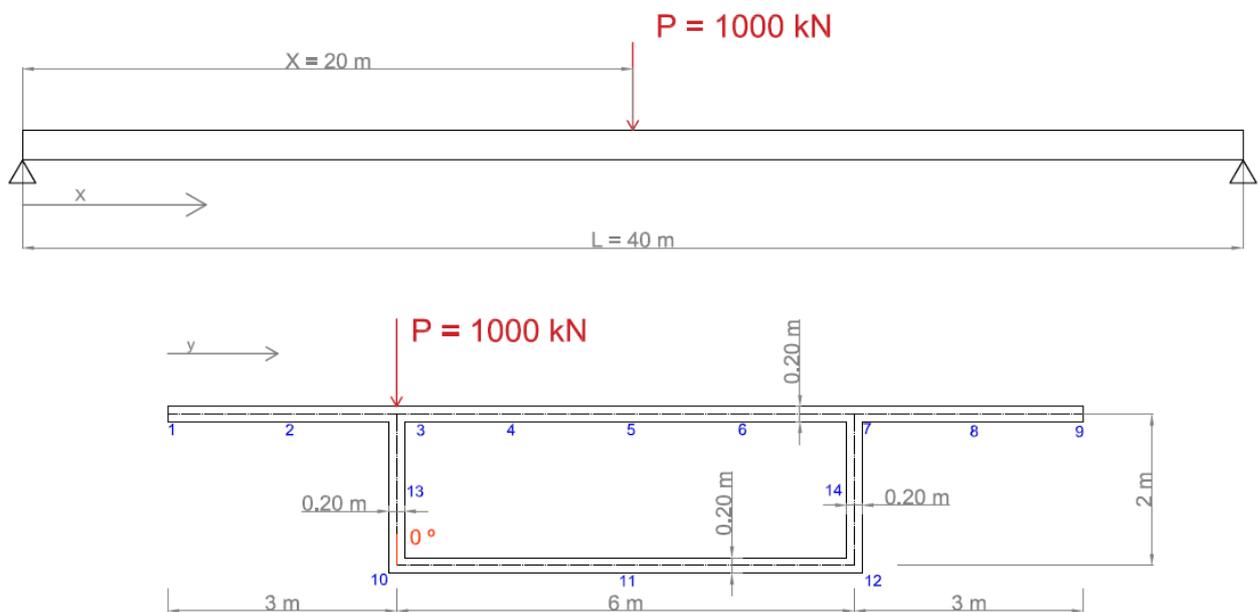


Figura 3.1 – Geometría

Vamos a estudiar la respuesta estructural ante una carga puntual descentrada en primer lugar. Posteriormente, colocaremos la carga en otros puntos de la sección, concretamente en los nudos 1,2, 4 y 5 de la Figura 3.1, y por último cuando se trata de cargas uniformemente repartidas. El método de análisis utilizado es por el Método de los Elementos Finitos (MEF) que se implementa en Midas.

3.1.1 Respuesta ante cargas puntuales

Sea una carga puntual de 1000 kN situada sobre la alma izquierda, como se muestra en la Figura 3.1, la única fuerza actuante; procederemos al estudio de las deformaciones, distorsión, tensión y esfuerzos que provoca.

3.1.1.1 Desplazamientos

Los desplazamientos mayores se concentran en las proximidades de la carga, dispersándose alrededor de la carga. En la Figura 3.2 se muestran los desplazamientos de la sección tanto en dirección 'y' como en dirección 'z'.

En las Figuras 3.3 y 3.4, se detallan dichos desplazamientos en la sección $x = 20$, es decir, en el centro del vano y donde está aplicada la carga; mientras que en la segunda, a una distancia de 5 m de dicha carga mostrándose como se va atenuando a lo largo del tiempo.

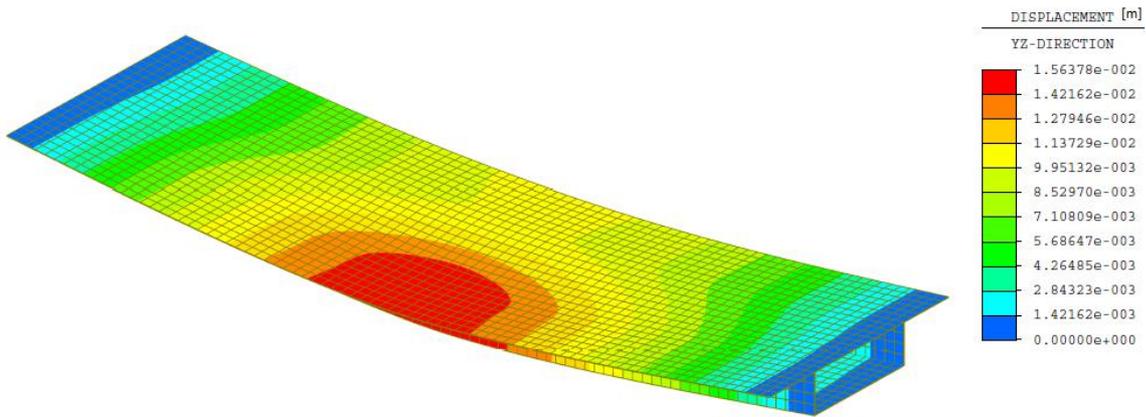


Figura 3.2 – Desplazamientos del modelo [m]

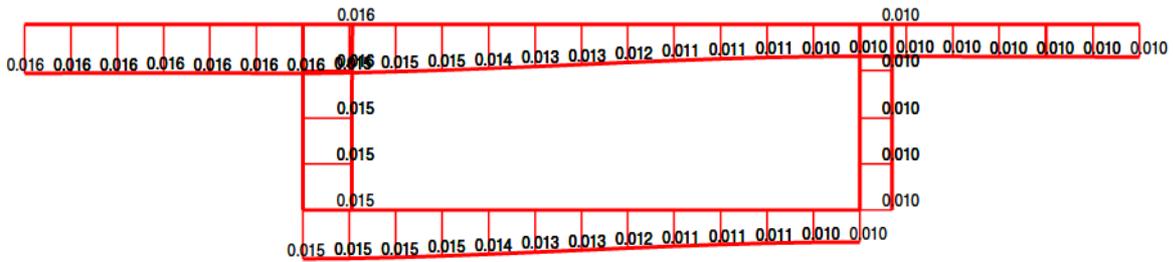


Figura 3.3 – Desplazamientos [m] para $x = 20$ m

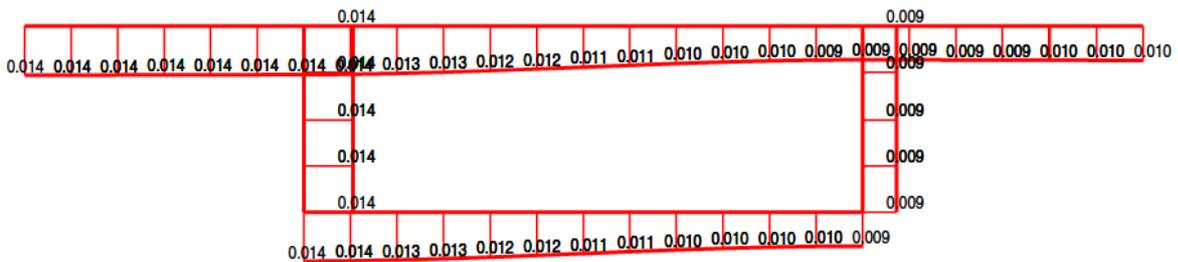


Figura 3.4 – Desplazamientos para $x = 15$ m

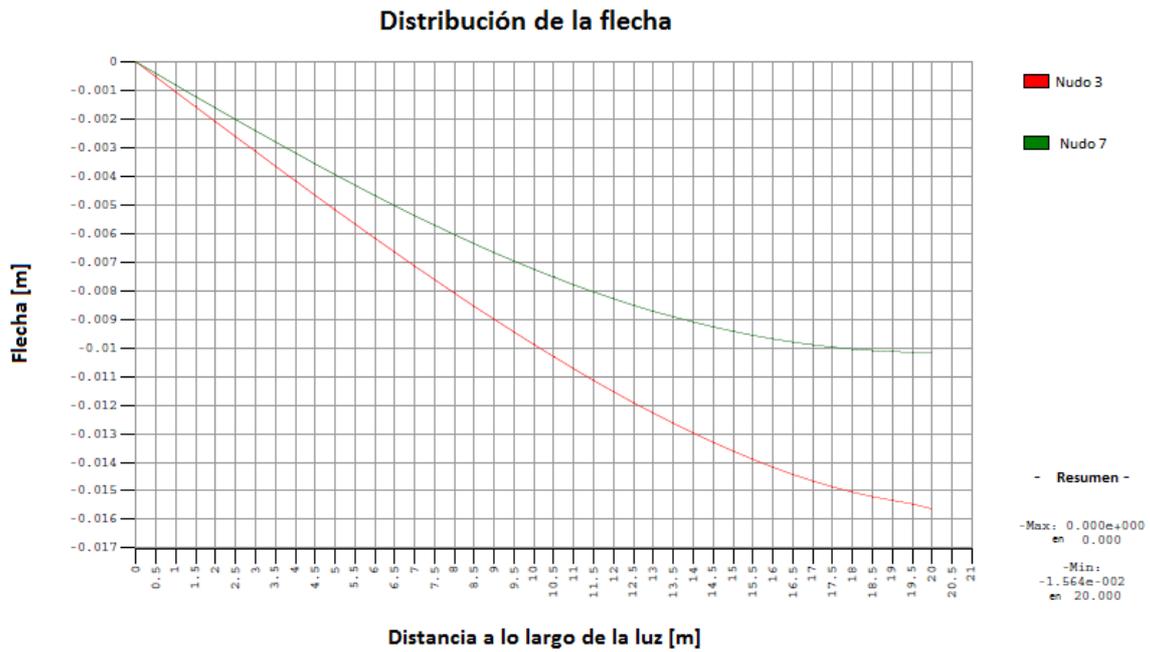


Figura 3.5 – Distribución de las flechas a lo largo de la luz en los nodos 3 y 7

En la figura anterior (Figura 3.5), se representa el desplazamiento en dirección ‘z’ de los nodos 3 y 7 de nuestro modelo a lo largo de la luz del puente (hasta los 20 m, el resto es simétrico). En el nudo 3, en $x = 20$ m, presenta la flecha máxima causada por la aplicación de la carga de 1000 kN, que se atenúa en el nudo 7 (que es el simétrico en la parte superior del alma) y ambos a lo largo de la luz.

3.1.1.2 Distorsión

La distorsión es la deformación que presenta nuestra sección ante las cargas aplicadas. En nuestro caso, para calcular la distorsión hemos calculado la variación que representa sus ángulos opuestos de la sección en cajón, es decir los ángulos que forman respecto a su indeformada de los nudos 7 y 10, como se representa en la Figura 3.6, y posteriormente hemos aplicado la siguiente fórmula, obteniendo la distorsión (en radianes):

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

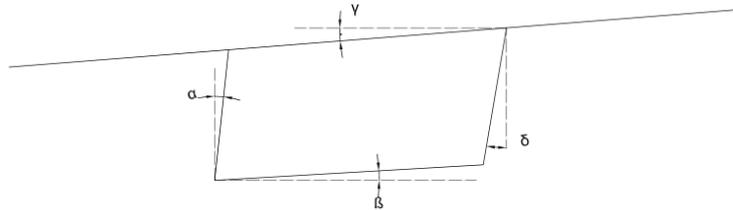


Figura 3.6 – Ángulos de distorsión

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.002206	0.000039	0.011746	0.000205	0.011726	0.000205	0.003667	0.000064	0.000256
10	0.006245	0.000109	0.025153	0.000439	0.025153	0.000439	0.009225	0.000161	0.000574
15	0.012204	0.000213	0.039955	0.000697	0.039992	0.000698	0.016644	0.000291	0.000949
16	0.013379	0.000234	0.042762	0.000746	0.042809	0.000747	0.018048	0.000315	0.001021
17	0.014467	0.000253	0.045369	0.000792	0.045425	0.000793	0.019280	0.000337	0.001087
18	0.015413	0.000269	0.047690	0.000832	0.047755	0.000833	0.020254	0.000354	0.001144
19	0.016215	0.000283	0.049504	0.000864	0.049694	0.000867	0.020884	0.000365	0.001189
20	0.016503	0.000288	0.050259	0.000877	0.052282	0.000912	0.021085	0.000368	0.001223

Tabla 3.1 – Ángulos y distorsión del modelo 1 a lo largo de la luz

Distancia desde el apoyo: Dirección X	Distorsión
0	0.00000000
5	0.00025608
10	0.00057400
15	0.00094942
16	0.00102100
17	0.00108684
18	0.00114417
19	0.00118942
20	0.00122285

Tabla 3.2 – Distorsión modelo 1



Figura 3.7 – Distribución de la distorsión

Como se representa en la Figura 3.7, la carga puntual descentrada provoca una perturbación que distorsiona la sección en la zona de la carga reduciéndose a medida que nos alejamos de la carga.

3.1.1.3 Tensiones

3.1.1.3.1. Tensiones longitudinales

La tensión longitudinal provoca una gran perturbación en el punto de aplicación de la carga que se va atenuando y distribuyendo con el resto de tensiones, sin embargo, en este modelo, la aplicación de dicha carga provoca un gran pico tensional en el nudo 3 en $x = 20$ m, como se muestra en la Figura 3.8, mientras que en resto de la sección y a lo largo del puente se atenúa en gran medida como se observa en el resto de figuras, aproximándose a la teoría de Resistencia de Materiales.

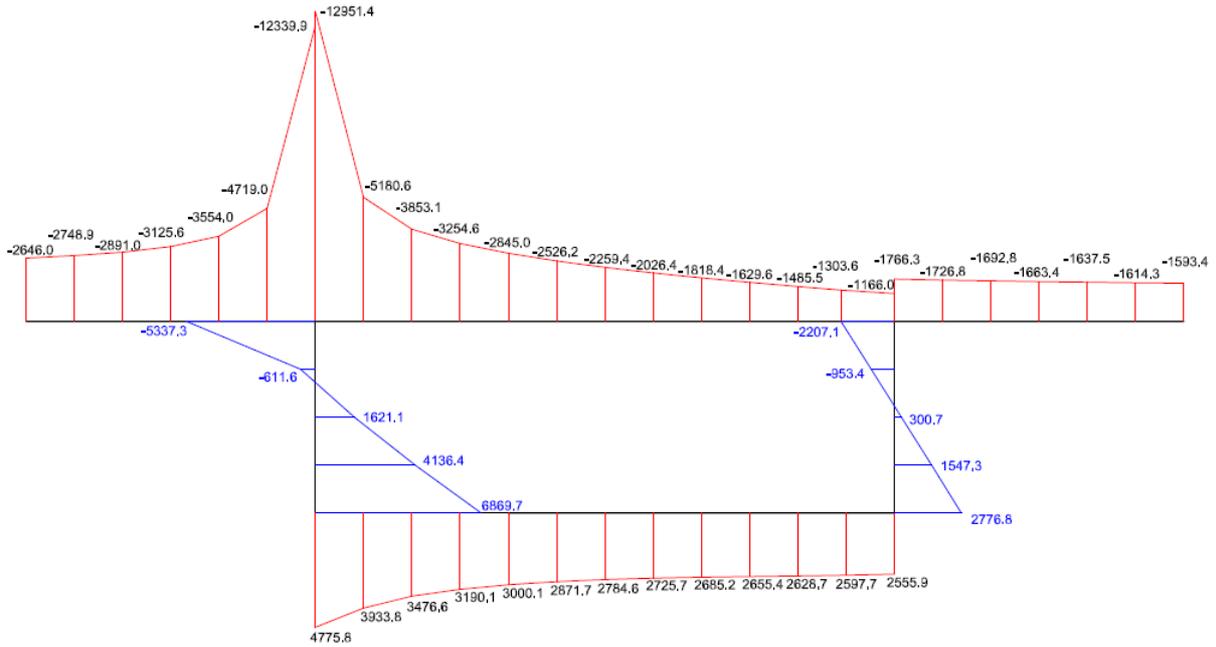


Figura 3.8 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en el centro de la luz ($x = 20$ m)

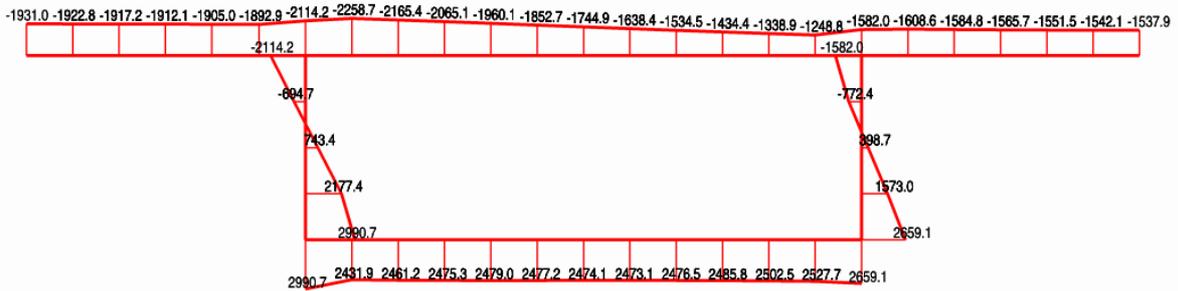


Figura 3.9 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en $x = 15$ m

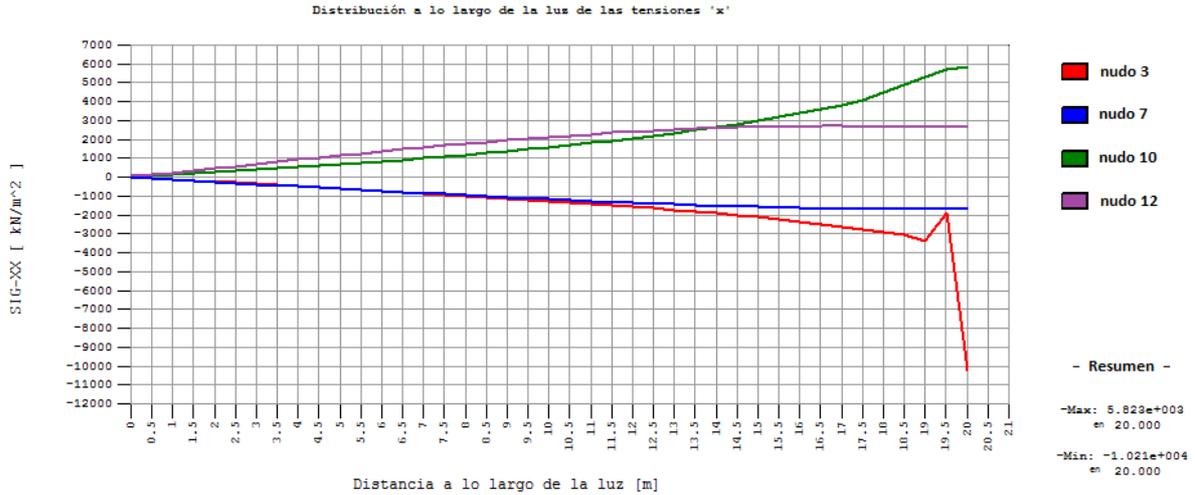


Figura 3.10 – Distribución a lo largo de la luz de σ_{xx} (kN/m²)

3.1.1.3.2. Tensiones tangenciales

Como se muestra en la Figura 3.11, esta redistribución de tensiones se produce en los puntos próximos de la carga, que al tener los elementos de nuestro modelizados de tal forma cada 0.5 m, se encuentra en el punto más cercano que, es decir a 19.5 m de los apoyos (a 0.5 m de la carga). Después de soportar esta redistribución se atenúa hasta un valor pseudoconstante donde ya se normaliza esta distribución tras paliar la perturbación que provoca la carga.

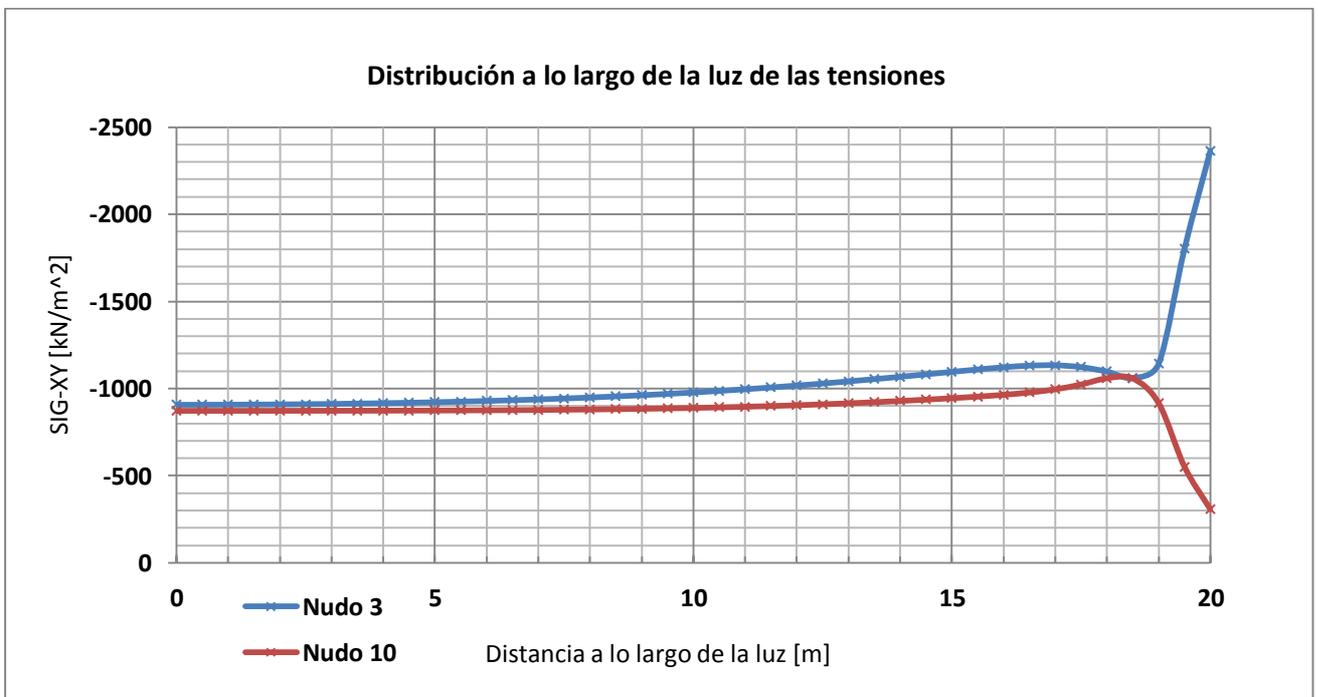
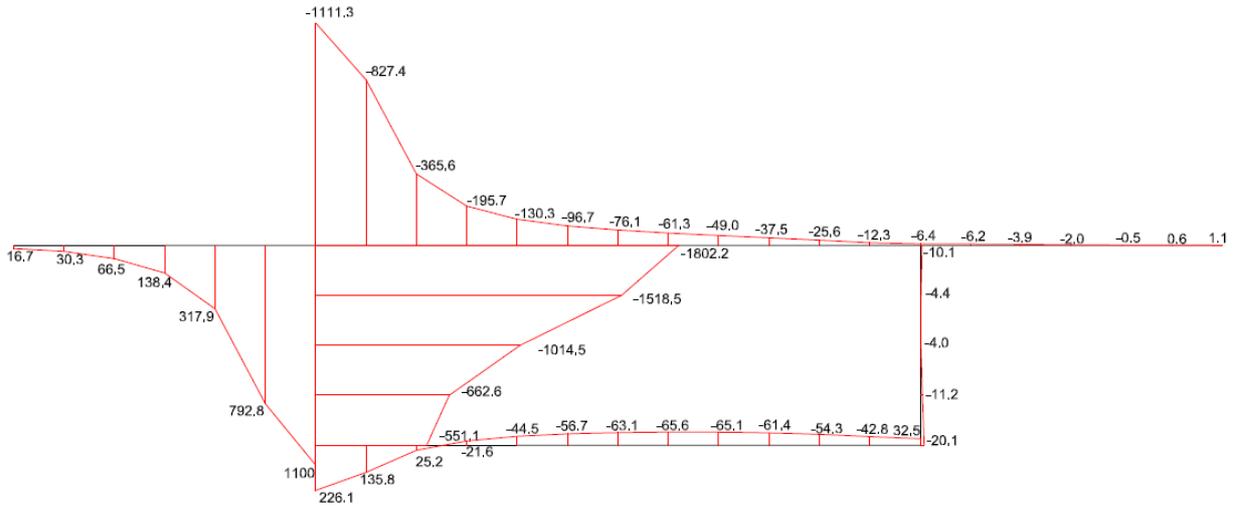


Figura 3.11 – Distribución a lo largo de la luz de τ_{xy} (kN/m²)

En la Figura 3.11, se establecen las tensiones de los nudos 3 y 10 del modelo, en las caras pertenecientes a las almas, observándose como se van compensando en su parte superior e inferior.

En las Figuras 3.12 y 3.13, se muestra la distribución de las tensiones tangenciales en las dos secciones con más interés, las siguientes más próximas a la carga (a 19.5 m y 19 m respectivamente).



3.1.1.4 Esfuerzos

3.1.1.4.1 Momentos flectores transversales

Esta concentración de tensiones se traduce a la generación de esfuerzos siguiendo la ley de comportamiento del material. Podemos destacar el momento flector y los esfuerzos cortantes N_{xy} en la losa superior ya que tiene acción directa a las tensiones previamente mencionadas.

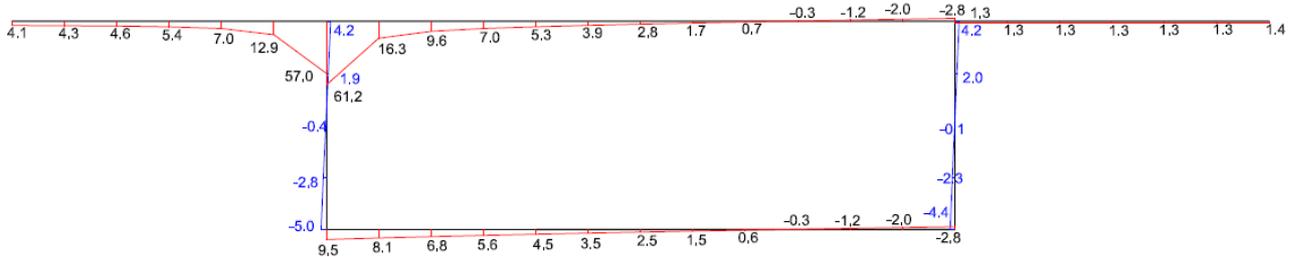


Figura 3.14 – Momento flector M_y ($kN \cdot m/m$) en la sección central ($x = 20$ m)

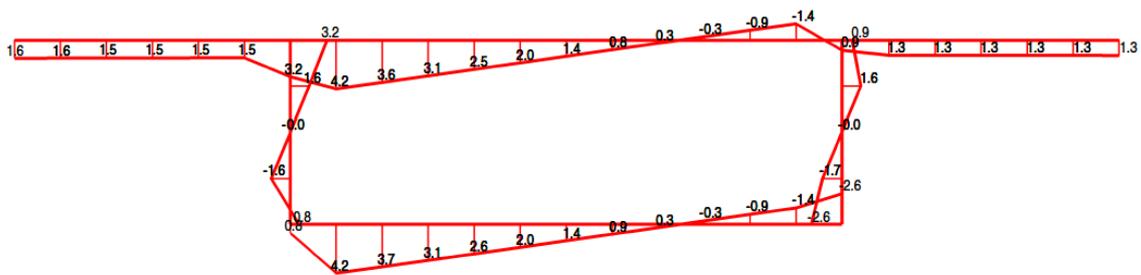


Figura 3.15 – Momento flector M_y ($kN \cdot m/m$) en la sección de $x = 15$ m

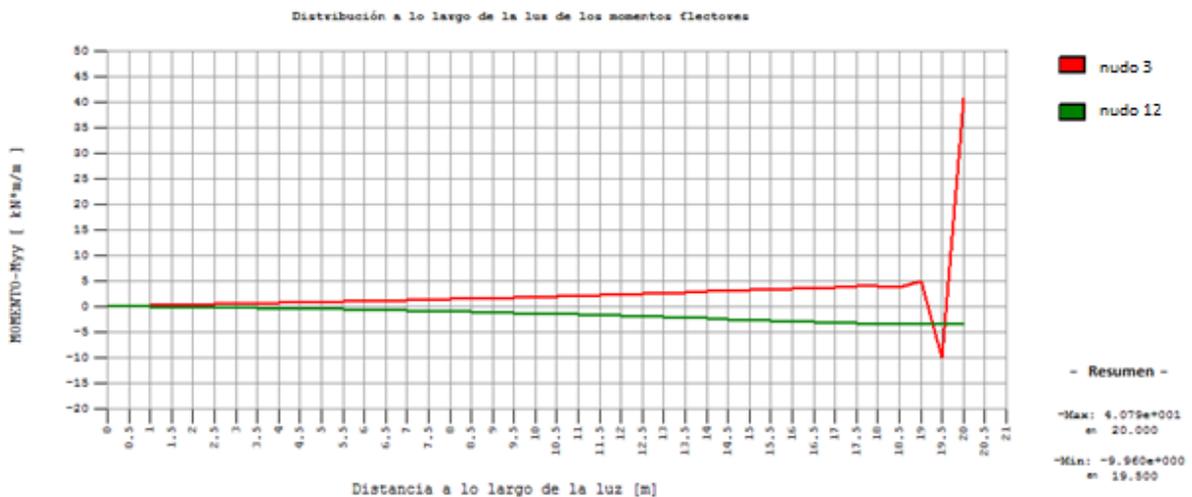


Figura 3.16 – Distribución del Momento flector M_y ($kN \cdot m/m$) a lo largo de la luz

3.1.1.4.2. Esfuerzos cortantes N_{xy}

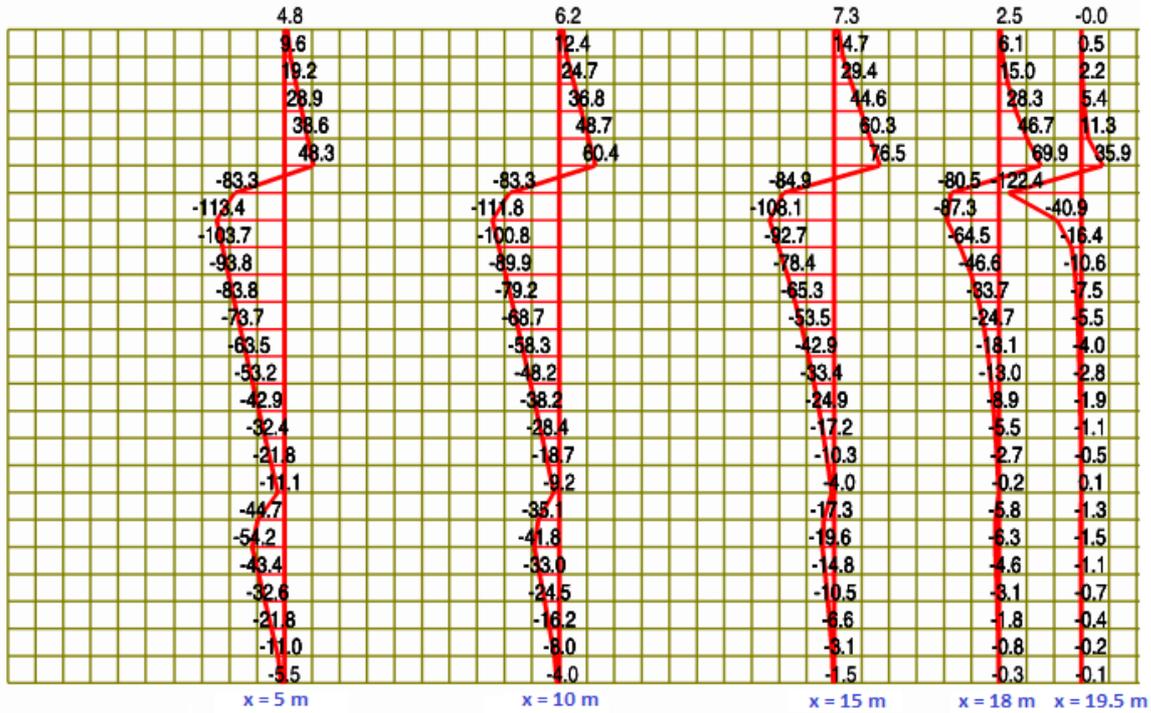


Figura 3.17 – Distribución de los esfuerzos cortantes N_{xy} [kN/m] en la losa superior

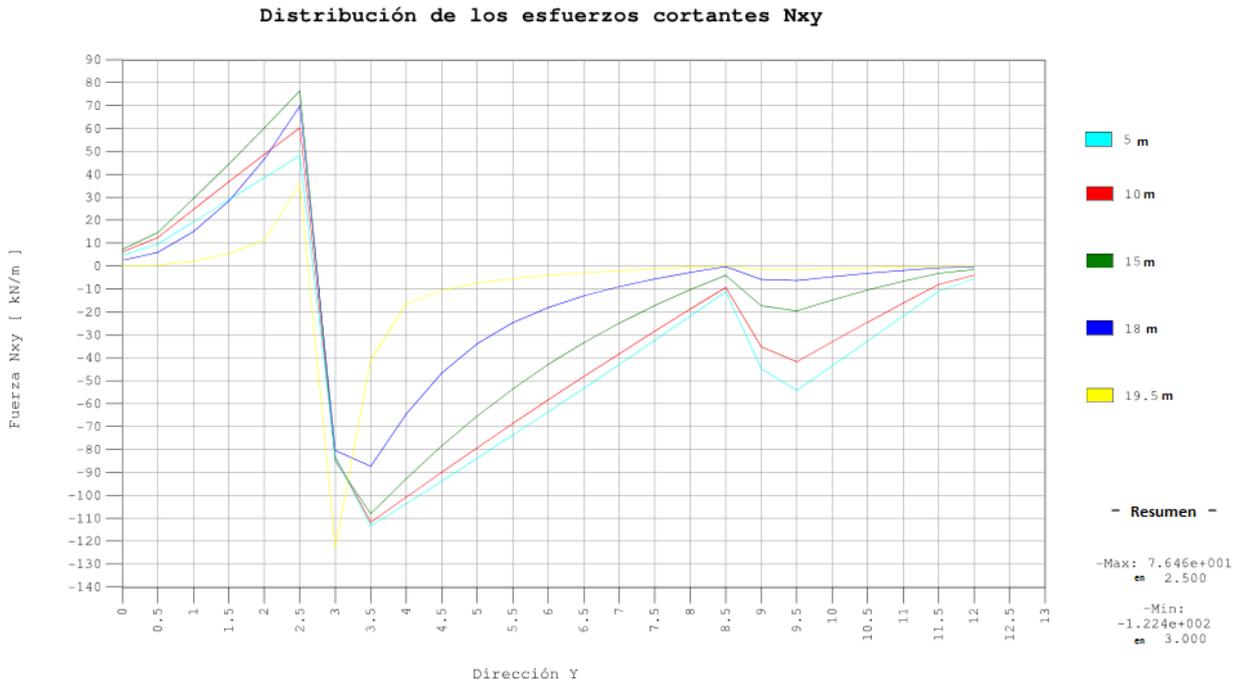


Figura 3.18 – Distribución de los esfuerzos cortantes N_{xy} [kN/m] en la losa superior

La dirección ‘y’ de la Figura 3.18, empieza por el ala de la izquierda, es decir, empezando por el nudo 1 y acabando en el nudo 9. Realmente en $y = 3$, se produce picos en dichos esfuerzos (siendo de signos contrarios), aunque Midas hace el promedio apareciendo menores sus valores, aunque se observa perfectamente la tendencia que sigue dichas distribuciones. En $y = 9$ ocurre lo mismo pero al estar más alejada de la carga no es tan determinante.

3.1.1.5 Influencia de la situación de la carga

Procedemos a analizar la influencia que tiene la situación de la carga puntual anterior cuando la situamos en diferentes puntos de la sección, es decir, cuando se pasea por dicha sección. Compararemos la variación que se produce en las deformaciones y esfuerzos generados ya que experimentan cambios importantes.

Para ello, se procede aplicar una carga 1000 kN como anteriormente en los puntos 1, 2, 3 (caso anterior), 4 y 5 en el centro del vano, es decir, en la sección de $x = 20$ m. Si se sitúa en los puntos 6, 7, 8 y 9 suponen los mismos casos anteriores por la condición de simetría que posee el modelo.

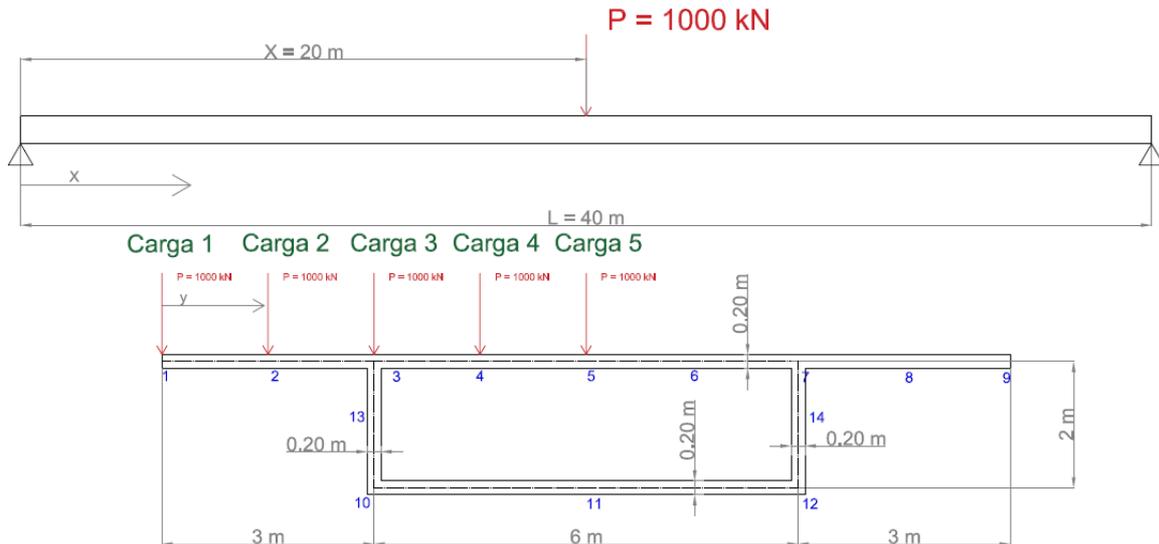


Figura 3.19 – Situación de las cargas puntuales

3.1.1.5.1. Variación en los desplazamientos

De todos los desplazamientos, interesa conocer especialmente el desplazamiento en dirección 'z' (la flecha) que se produce en los nodos 3 y 7 de la sección a 20 m cuando la carga se va desplazando.

En la siguiente tabla se representa los desplazamientos que tienen dichos nodos en la sección, tomando valores positivos la dirección global de los ejes cartesianos.

Nodo	Carga	DY	DZ
3	1	0.000486	-0.015580
7		0.000342	-0.010367
3	2	0.000292	-0.015516
7		0.000176	-0.010254
3	3	0.000080	-0.015638
7		0.000003	-0.010163
3	4	-0.000026	-0.014597
7		-0.000068	-0.010937
3	5	0.000018	-0.012733
7		-0.000018	-0.012733

Tabla 3.3 – Desplazamientos de los nodos 3 y 7 en la sección central [m]

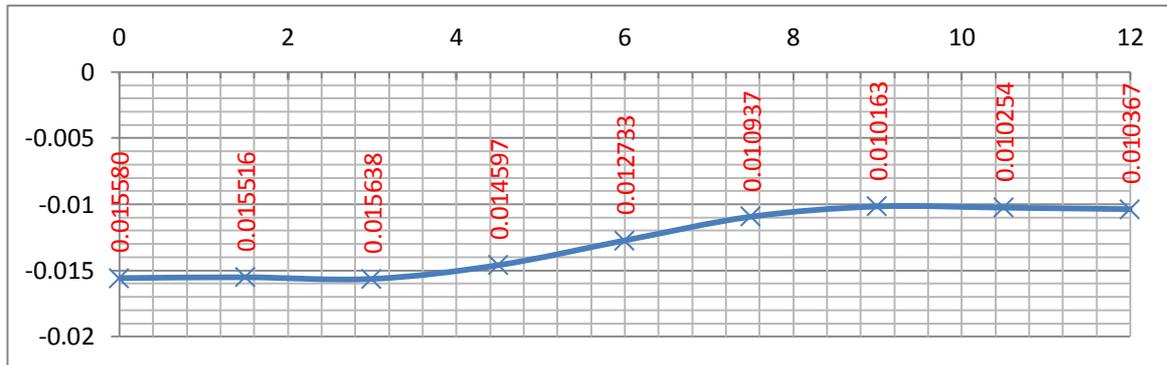


Figura 3.20 – Desplazamiento del nodo 3 según la situación de la carga [m]

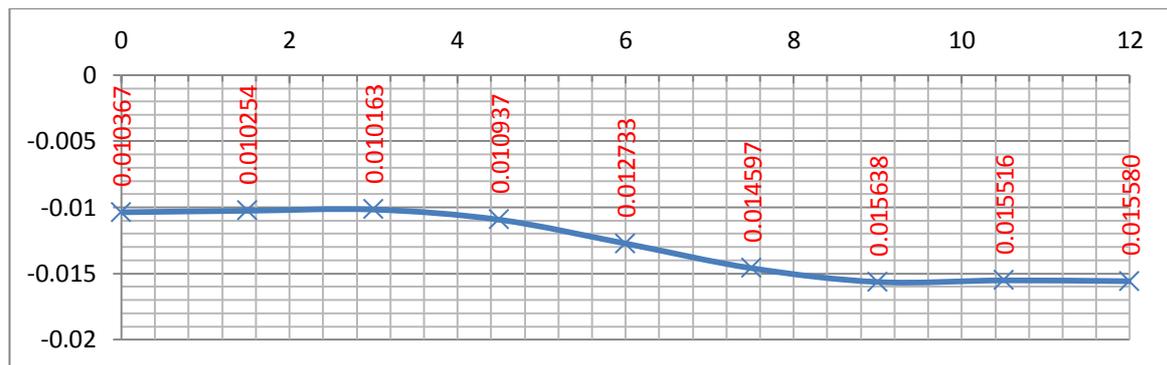


Figura 3.21 – Desplazamiento del nodo 7 según la situación de la carga [m]

En las figuras anteriores, se representa la flecha que tienen los nodos 3 y 7 según la posición de la carga, tomando la dirección y de la sección empezando por el nodo 1 (nodo 1 = 0 m; nodo 2 = 1.5 m... y así progresivamente hasta llegar la carga al nodo 9 = 12 m).

Al ser nodos simétricos, al moverse la carga, sus desplazamientos serán simétricos, es decir, cuando la carga esté en el nodo 1, el nodo 3 y 7 presentarán los desplazamientos alternados que cuando se encuentra en el nodo 9 dicha carga.

Se presenta el mayor desplazamiento cuando las cargas se encuentran sobre las almas, variando muy poco cuando se encuentra en las alas (aunque es algo menor); mientras que cuando se sitúa sobre el cajón los desplazamientos descienden notablemente en toda la sección.

3.1.1.5.2. Variación en la distorsión

Para analizar cómo cambia la distorsión, nos centraremos en la sección central donde está colocada la carga ya que presenta la mayor distorsión posible de todo el modelo. Como en el caso anterior, representaremos en la siguiente Figura 3.22, la línea de influencia de la distorsión para la sección $x = 20$ m cuando la carga se desplaza transversalmente de un lado a otro del tablero, comenzando desde el nodo 1 (= 0 m) hasta el nodo 9 (= 12 m).

Carga	Distorsión [rad]
1	0.00108709
2	0.00093292
3	0.00122285
4	0.00094067
5	0.00000000

Tabla 3.4 – Distorsión de la sección central

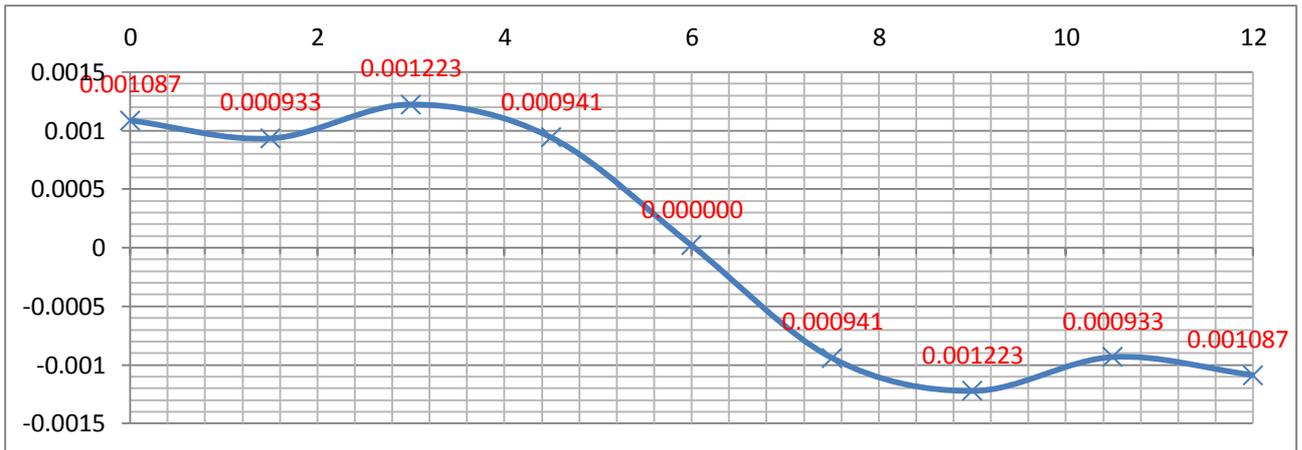


Figura 3.22 – Distorsión de la sección central

En la Figura 3.22, se muestra en el eje x, la posición de la carga mientras que en eje y, se muestra el valor de la distorsión en dichas posiciones.

Como se puede apreciar, la mayor distorsión se sufre cuando se encuentra en el ala de la sección amortiguándose levemente en las alas y cayendo bruscamente cuando la carga está pseudocentrada. En el centro de la sección, la distorsión generada es 0, por la condición de simetría.

3.1.1.5.3. Variación en las tensiones

Los valores de las tensiones vienen expresados en kN/m^2 . En las figuras aparecen las líneas de influencia de las tensiones longitudinales de la sección central en los nodos 3 y 10 de la losa superior e inferior cuando se desplaza la carga puntual de 1000 kN a través de la sección central.

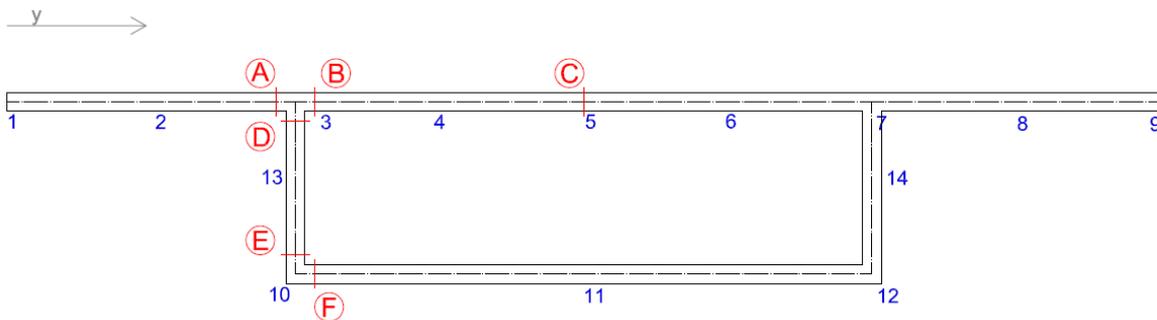


Figura 3.23 – Puntos significativos

En la Figura 3.23 se muestran aquellas secciones de interés para observar la variación que se produce en las tensiones y esfuerzos. Concretamente en el estudio de la variación en las tensiones longitudinales nos centraremos en los nodos 3 y 10 como hemos dicho previamente observando la variación en la sección 'B' y 'F' respectivamente.

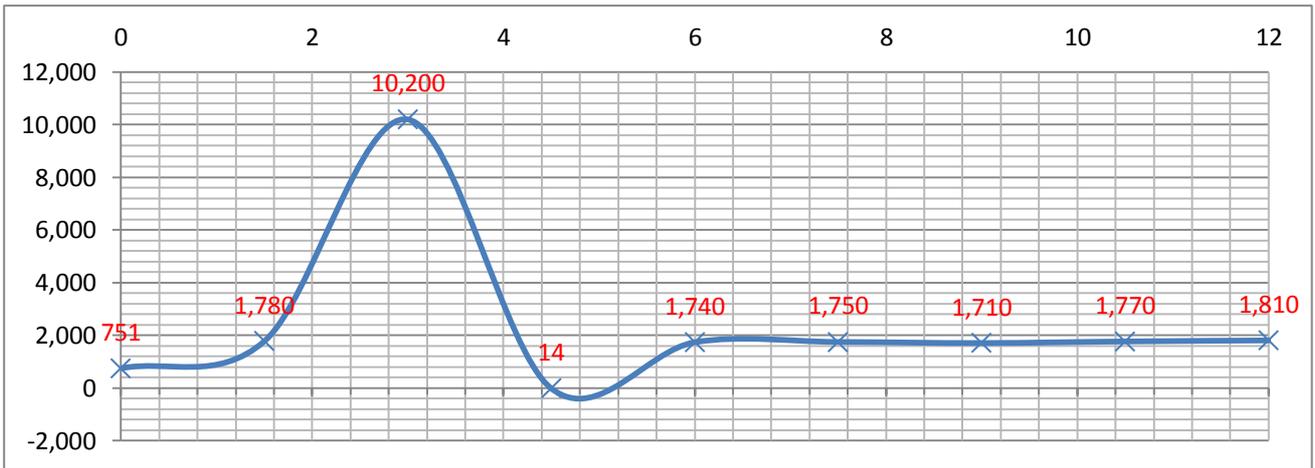


Figura 3.24 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 3 para la sección central

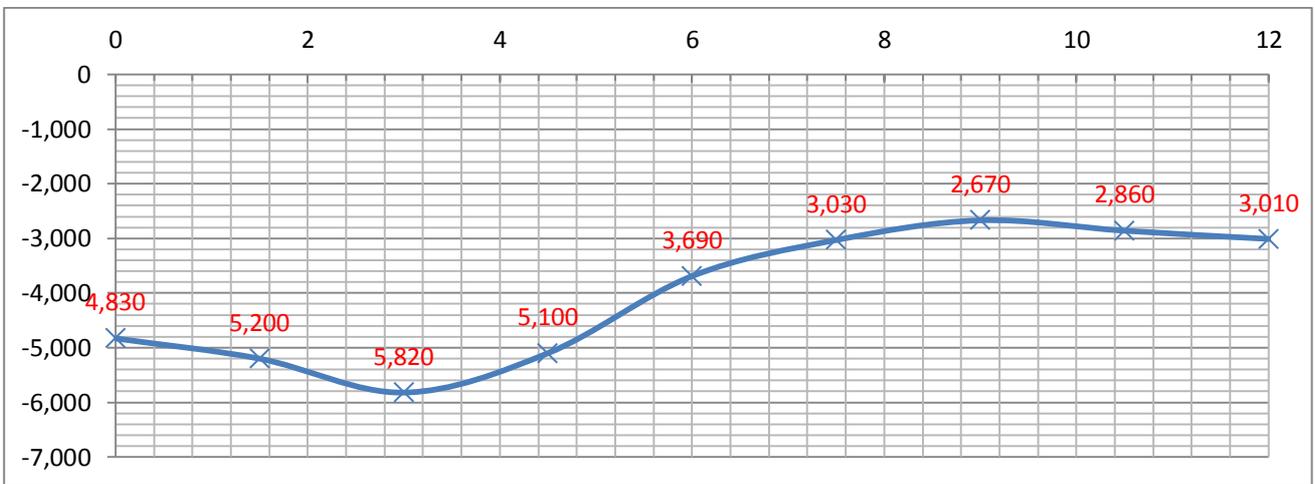


Figura 3.25 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 10 para la sección central

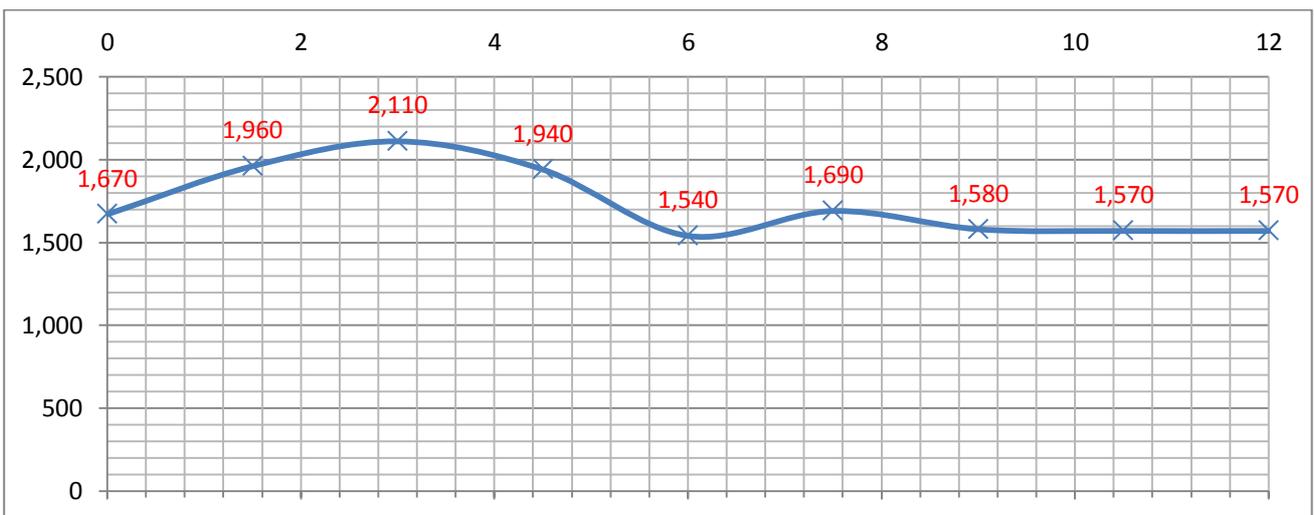


Figura 3.26 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 3 para la sección $x = 15$ m

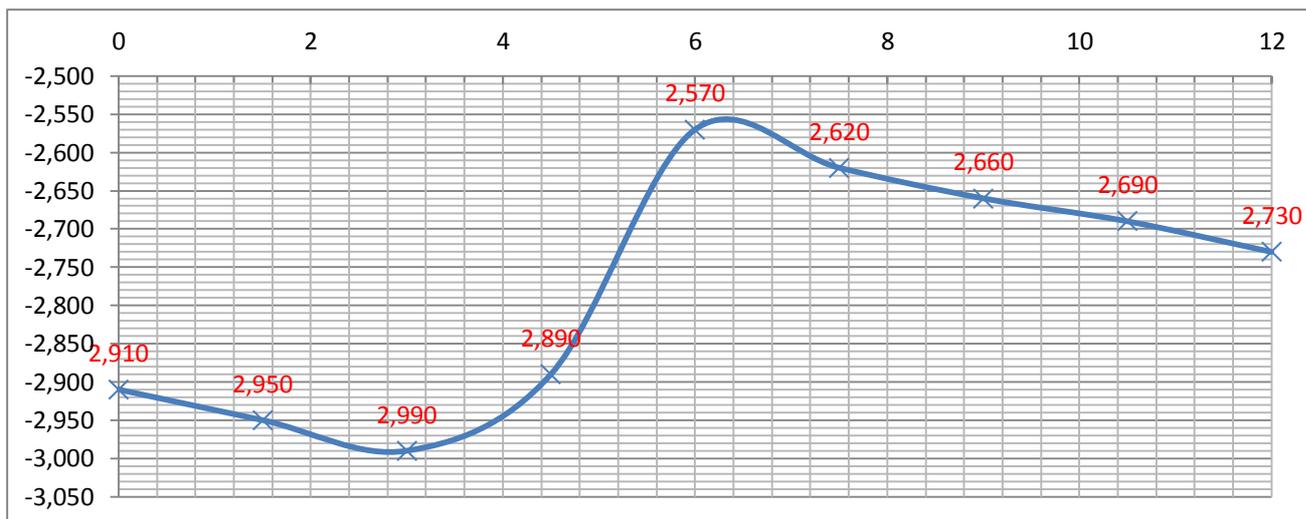


Figura 3.27 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 10 para la sección $x = 15$ m

3.1.1.5.4. Variación en los esfuerzos

En la Figura 3.23, se han señalado aquellas secciones de interés para observar la variación que se produce en los esfuerzos provocados por la carga móvil a lo largo de la sección central. Estos puntos de interés en los esfuerzos son los correspondientes a los nodos 3, 5 y 10 (el resto de interés se deduce por simetría), sin embargo, en estos puntos interesa conocer el desarrollo que se produce si la sección pertenece al ala, losa o alma.

Para ello se han seleccionado los elementos placas contiguos a dichos nodos, representados por A, B, C, D, E y F, donde se observará las líneas de influencia debidos al movimiento de la carga en diferentes posiciones.

- Momentos flectores:

Los momentos flectores transversales se deben a la distorsión de la sección y a la flexión transversal provocada a la carga. Al desplazarse la carga a lo largo de la sección, interesa conocer las líneas de influencia en las secciones A, B, C, D y E, cuya variación nos proporciona ideas básicas sobre el funcionamiento de dicha sección.

A continuación en la Figura 3.28, se detallan las líneas de influencia de M_y en la sección central para la carga puntual de 1000 kN desplazándose por la losa superior. Son esfuerzos lineales, es decir, los esfuerzos están expresados en kN·m/m.

Como podemos observar, hay una gran diferencia en los valores de las secciones D y E del alma, lo que conduce a dimensionar las secciones cajón con almas de espesor variable, siendo su valor máximo en la parte superior y decreciendo hasta la losa inferior. Esto también se debe a las tensiones tangenciales que son mucho mayores en la parte superior.

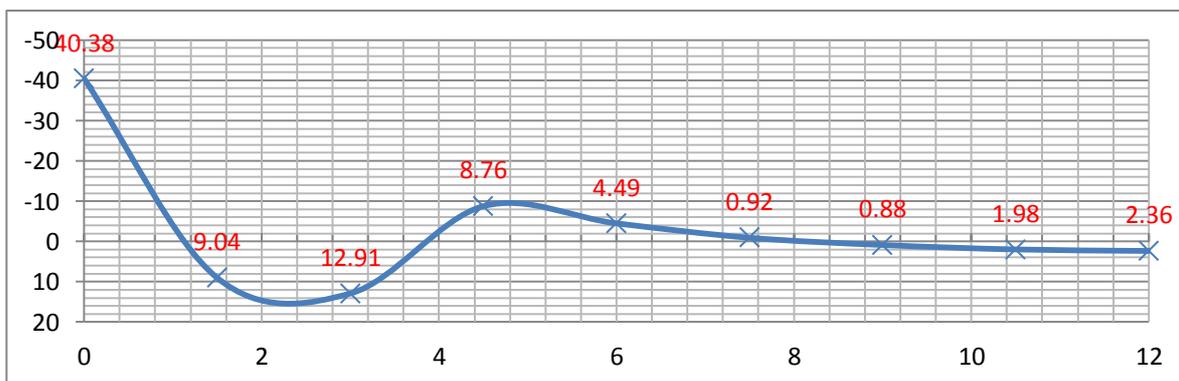


Figura 3.28 – M_y Sección A

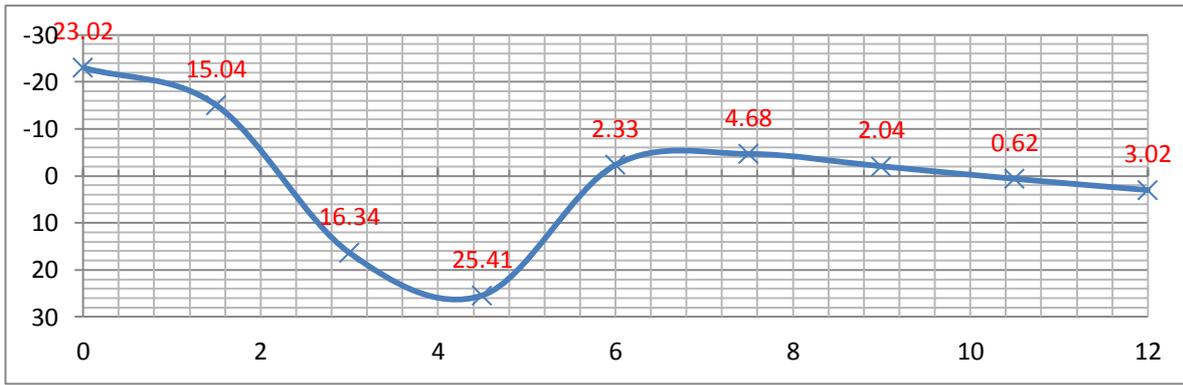


Figura 3.29 – My Sección B

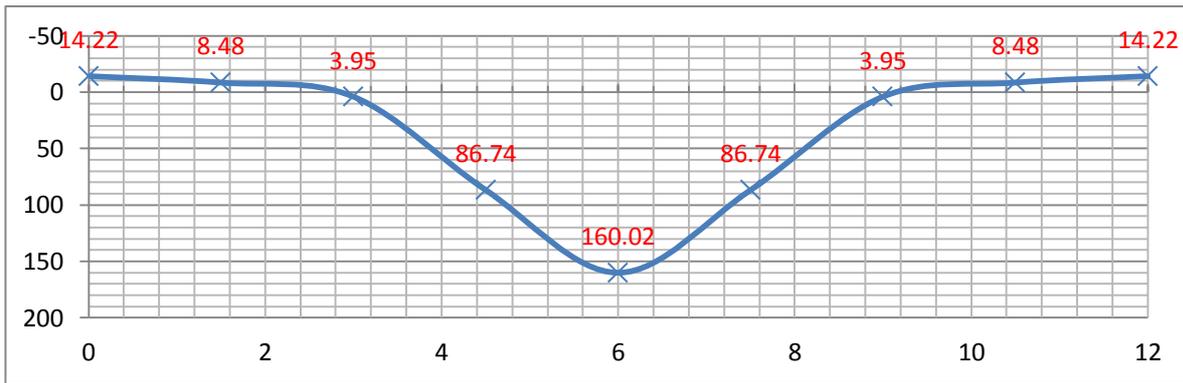


Figura 3.30 – My Sección C

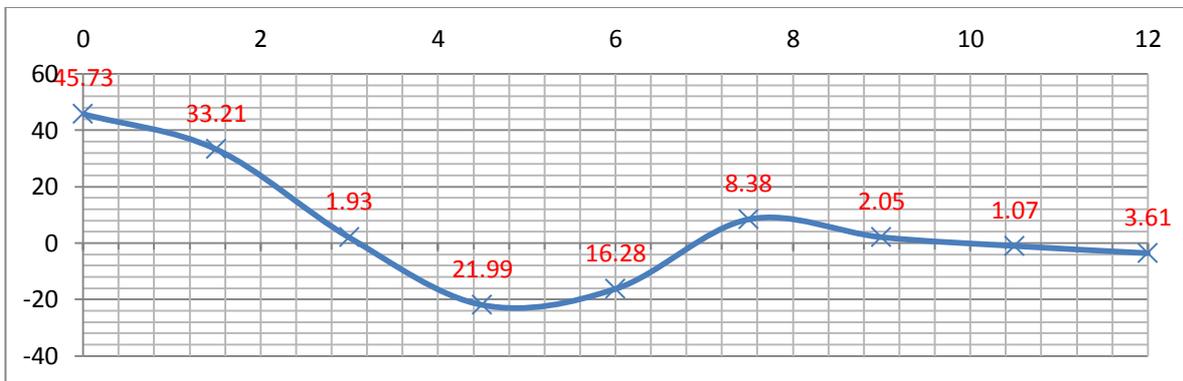


Figura 3.31 – My Sección D

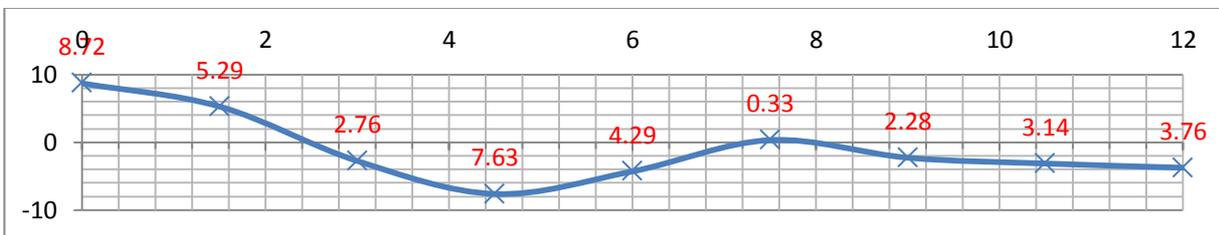


Figura 3.32 – My Sección E

- Esfuerzos axiales:

Los esfuerzos axiales N_y [kN/m], en las secciones A, B, C y F de la Figura 3.27 son los siguientes, que como puede observarse, son en general, mayores cuando la carga está sobre el alma.

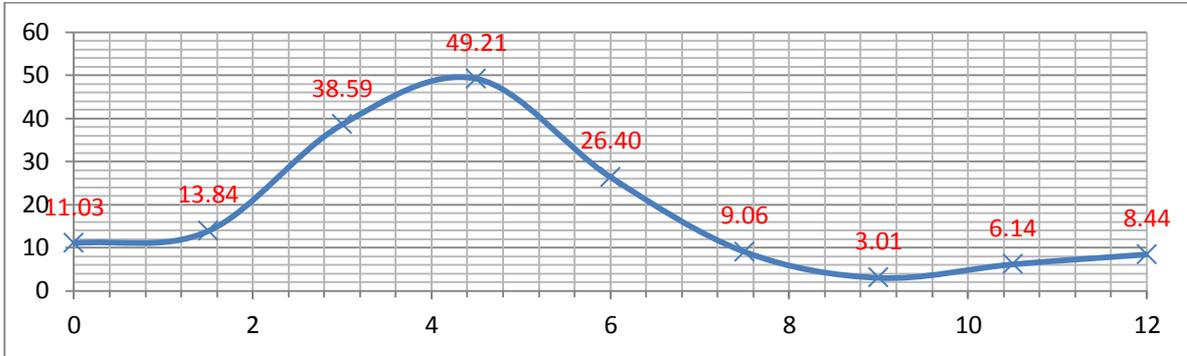


Figura 3.33 – N_y Sección A

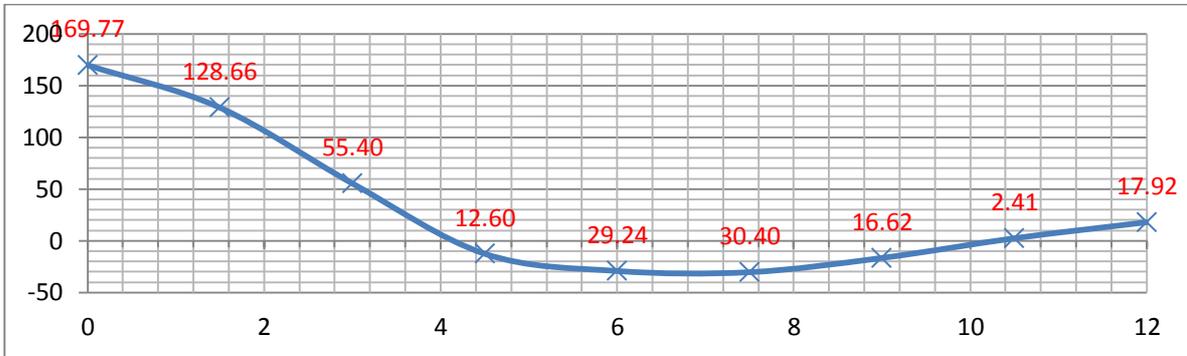


Figura 3.34 – N_y Sección B

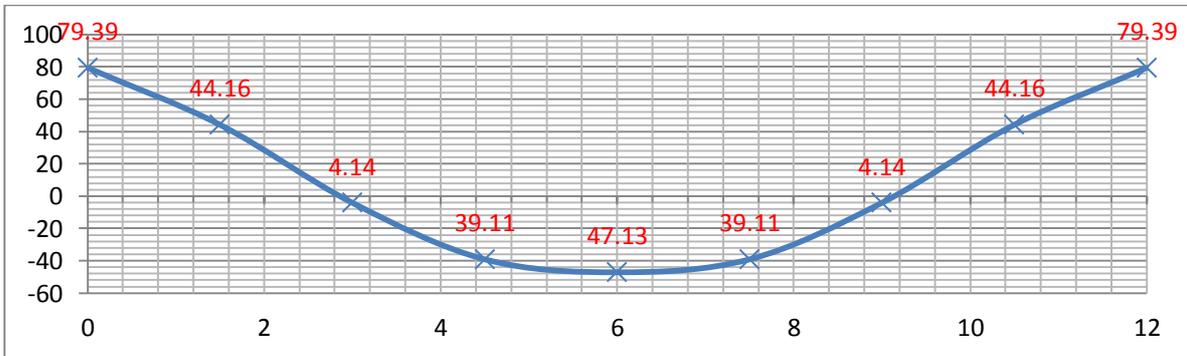


Figura 3.35 – N_y Sección C

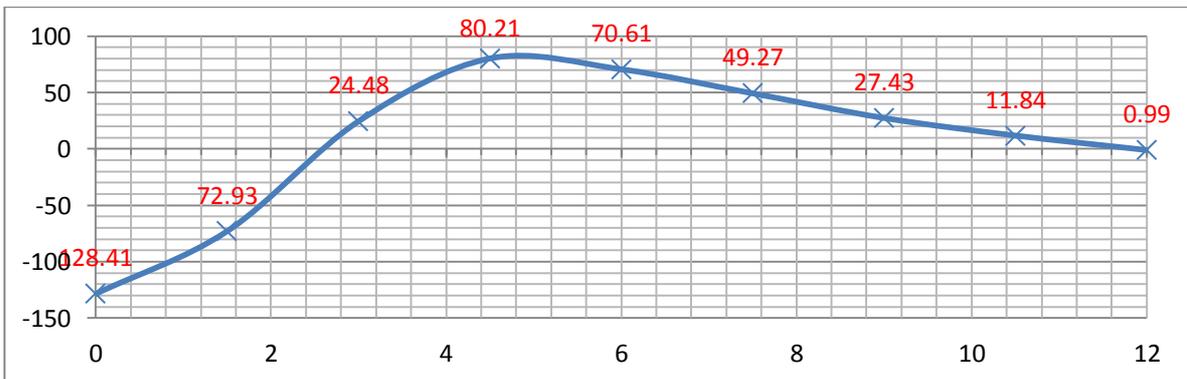


Figura 3.36 – N_y Sección F

3.1.2 Respuesta ante cargas distribuidas

Para el estudio de la viga ante cargas distribuidas hemos modelado tres tipos de cargas en la sección del modelo básico 1, como aparecían en la Figura 2.2 (es igual a Figura 3.37):

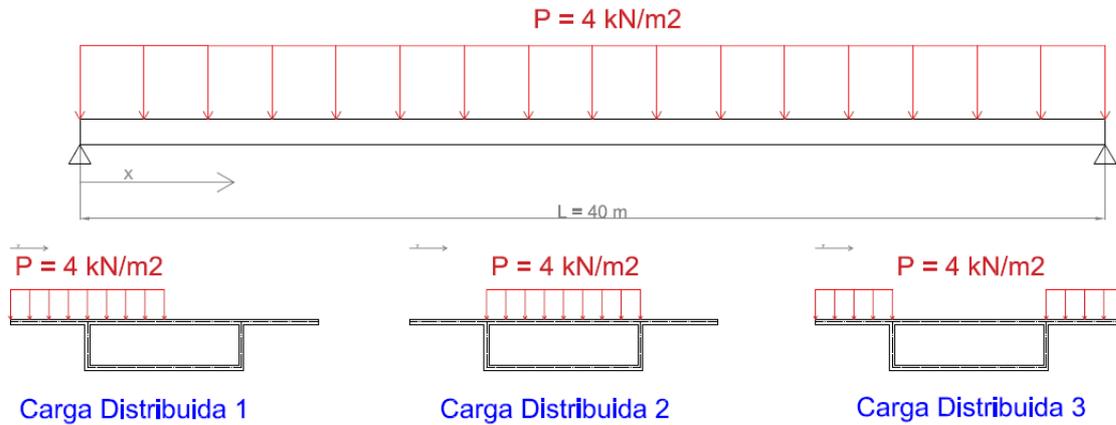


Figura 3.37 – Modelos de cargas distribuidas

Para poder correlacionar los valores ante las cargas puntuales y distribuidas, se han aplicado los tres tipos de cargas en 1 m de ancho sobre el eje longitudinal (eje x) y a lo largo de los 6 metros en la sección, tanto el la carga distribuida 1, 2 o 3, por lo que su equivalente es de 4 kN/m^2 .

La carga distribuida 1, se aplica desde el ala izquierda hasta la mitad de la sección, la carga distribuida 2, se aplica en el centro de la losa de la sección, mientras que la carga distribuida 3 se aplica en las 2 alas de la sección siendo su componente resultante la misma en los tres casos.

3.1.2.1 Desplazamientos

En el estudio de los desplazamientos, la carga distribuida 1 presenta mayor interés en el comportamiento de la sección en cajón, pues el resto son simétricas y deformarán menos la sección provocando menor distorsión ocasionando solo deformaciones longitudinales y no deformaciones transversales. Además este tipo de carga provoca además de momentos flectores, momentos torsores.

Como se puede apreciar en las Figuras 3.38, 3.39 y 3.40, los desplazamientos son aunque menores, similares a los producidos por la carga puntual 1, exceptuando la deformación del extremo del ala que al tener dicha carga aplicada se produce mayor desplazamiento en dicha zona (aunque menor respecto a la puntual).

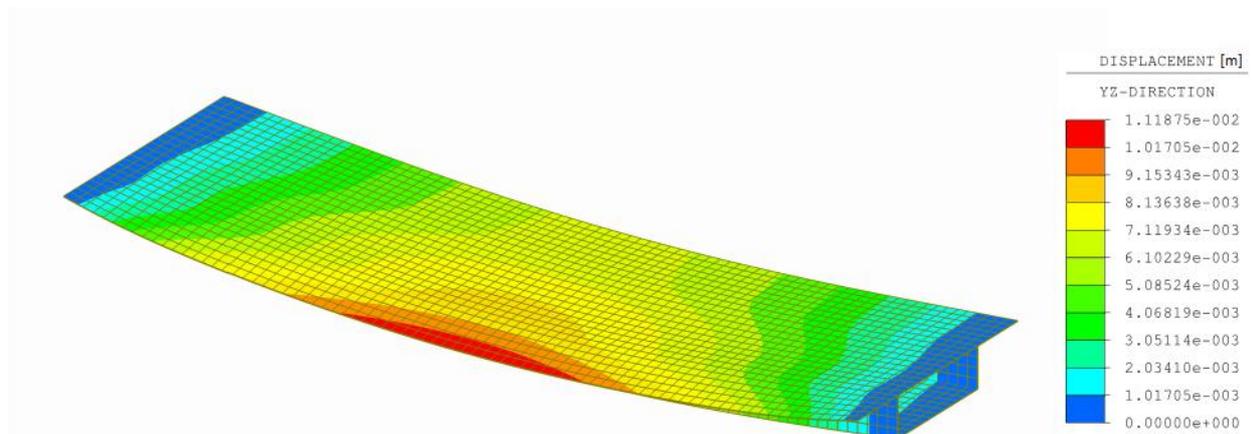


Figura 3.38 – Desplazamientos del modelo

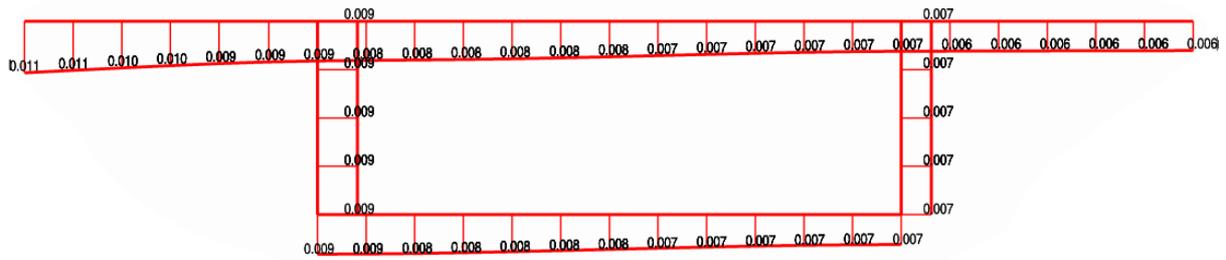


Figura 3.39 – Desplazamientos [m] para $x = 20$ m

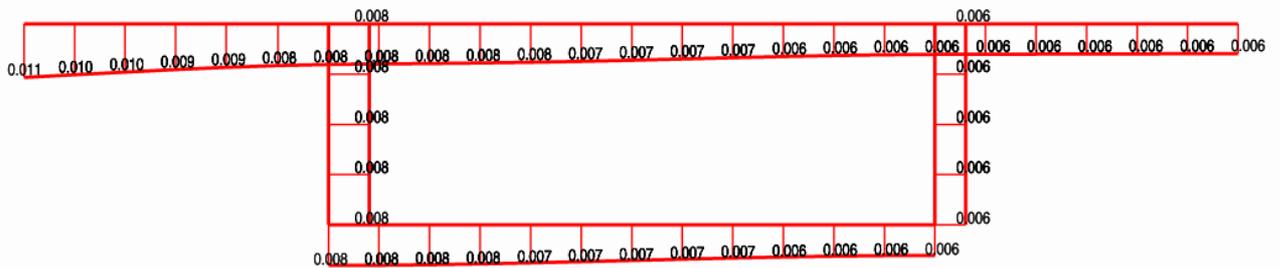


Figura 3.40 – Desplazamientos [m] para $x = 15$ m

Los desplazamientos entre la secciones para $x = 20$ m y $x = 15$ m son muy similares ya que actúan sobre ambas la carga distribuida y la influencia de las condiciones de contorno no son tan importantes hasta que no nos acercamos al apoyo.

En la Figura 3.41, se aprecia las flechas de los nudos 3 y 7 de la sección que por comparación con los obtenidos en la Figura 3.5, son aproximadamente la mitad de los alcanzados ante la carga puntual.

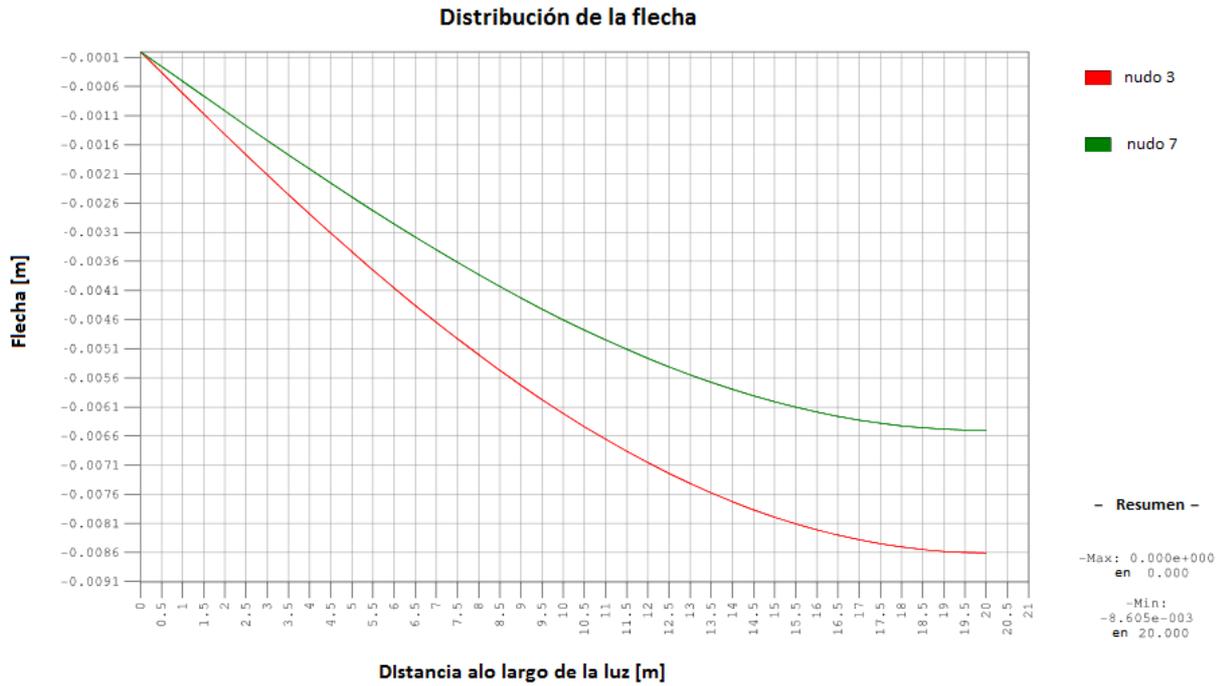


Figura 3.41 – Distribución de las flechas a lo largo de la luz en los nodos 3 y 7

3.1.2.2 Distorsión

Como se ha dicho anteriormente, la carga distribuida 1 es la que tiene mayor interés en la distorsión puesto que el resto de cargas son simétricas.

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.001404	0.000025	0.008948	0.000156	0.008986	0.000157	0.002578	0.000045	0.000191
10	0.002120	0.000037	0.015298	0.000267	0.015336	0.000268	0.004211	0.000074	0.000323
15	0.002292	0.000040	0.018879	0.000330	0.018917	0.000330	0.004899	0.000086	0.000393
16	0.002292	0.000040	0.019290	0.000337	0.019337	0.000337	0.004985	0.000087	0.000401
17	0.002292	0.000040	0.019614	0.000342	0.019652	0.000343	0.005042	0.000088	0.000407
18	0.002292	0.000040	0.019844	0.000346	0.019882	0.000347	0.005071	0.000089	0.000411
19	0.002292	0.000040	0.019968	0.000349	0.020015	0.000349	0.005071	0.000089	0.000413
20	0.002292	0.000040	0.020016	0.000349	0.020063	0.000350	0.005071	0.000089	0.000414

Tabla 3.5 – Ángulos y distorsión del modelo 1 con carga distribuida 1 a lo largo de la luz

Distancia desde el apoyo: Dirección X	Distorsión
0	0.00000000
5	0.00019125
10	0.00032258
15	0.00039258
16	0.00040058
17	0.00040667
18	0.00041092
19	0.00041317
20	0.00041400

Tabla 3.6 – Distorsión modelo 1 con carga distribuida 1

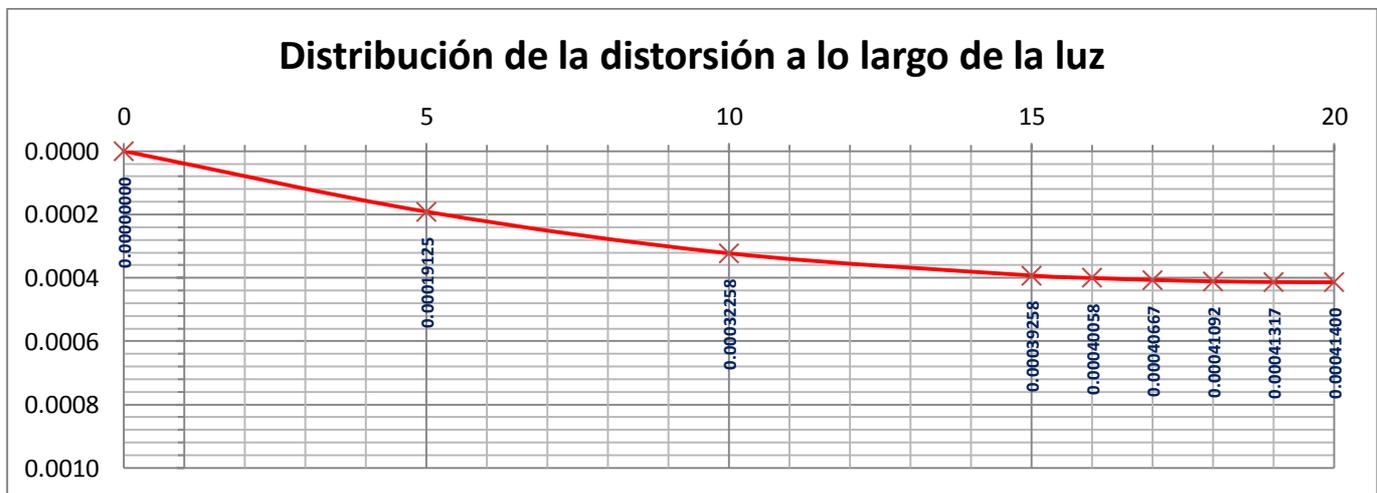


Figura 3.42 – Distribución de la distorsión bajo la carga distribuida 1

Como se puede observar en la Figura 3.43, la distorsión que se produce la carga distribuida respecto a la que produce la misma carga puntual, es aproximadamente un tercio. Se deduce por lo tanto, que la sección se comporta peor ante las cargas puntuales y de manera más acentuada en las proximidades de la carga, sin embargo, cuando se trata de cargas distribuidas la sección es capaz de absorber mejor los desplazamientos a lo largo de la sección. Además, su distribución a lo largo de la viga es más uniforme que cuando son perturbaciones puntuales.

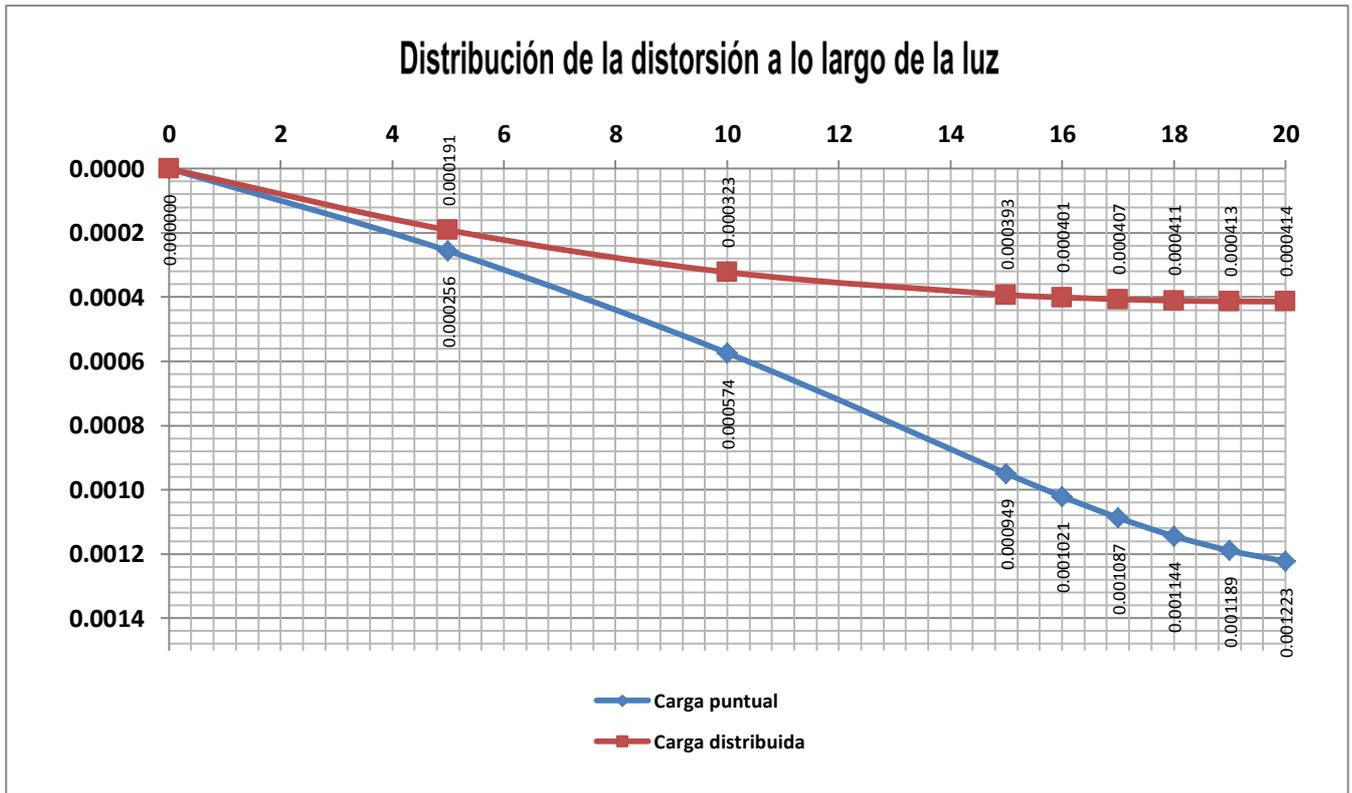


Figura 3.43 – Comparativa de cargas

3.1.2.3 Tensiones

3.1.2.3.1. Tensiones longitudinales

Para comprobar la influencia que tiene en las tensiones longitudinales, la acción de la carga distribuida, distorsión y los esfuerzos cortantes, podemos observarlo en las cargas distribuidas 1 y 2 principalmente. A continuación se detallan en las Figuras 3.44, 3.45 y 3.46 la distribución de tensiones longitudinales en los casos de carga distribuidas 1, 2 y 3 respectivamente.

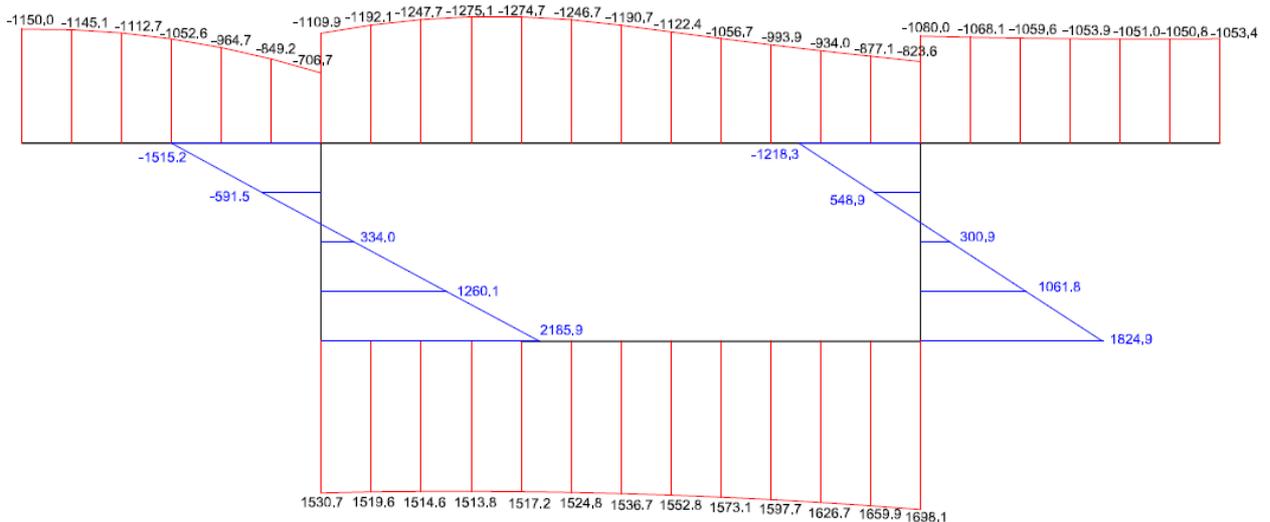


Figura 3.44 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) para Carga Dist. 1 en el centro de la luz (x = 20 m)

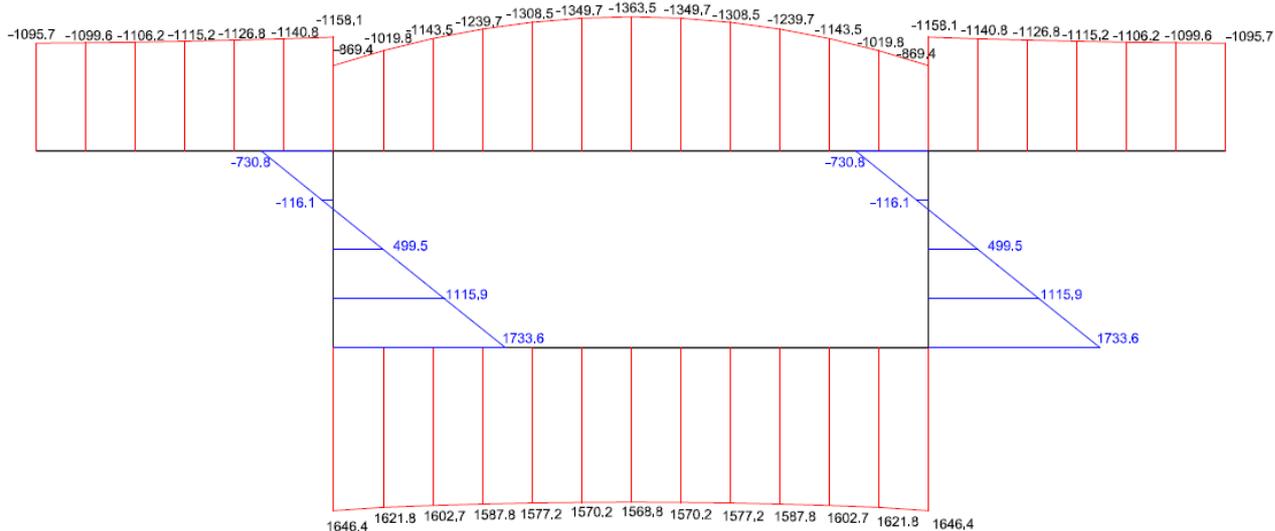


Figura 3.45 – Distribución de σ_{xx} (kN/m^2) para Carga Dist. 2 en el centro de la luz ($x = 20$ m)

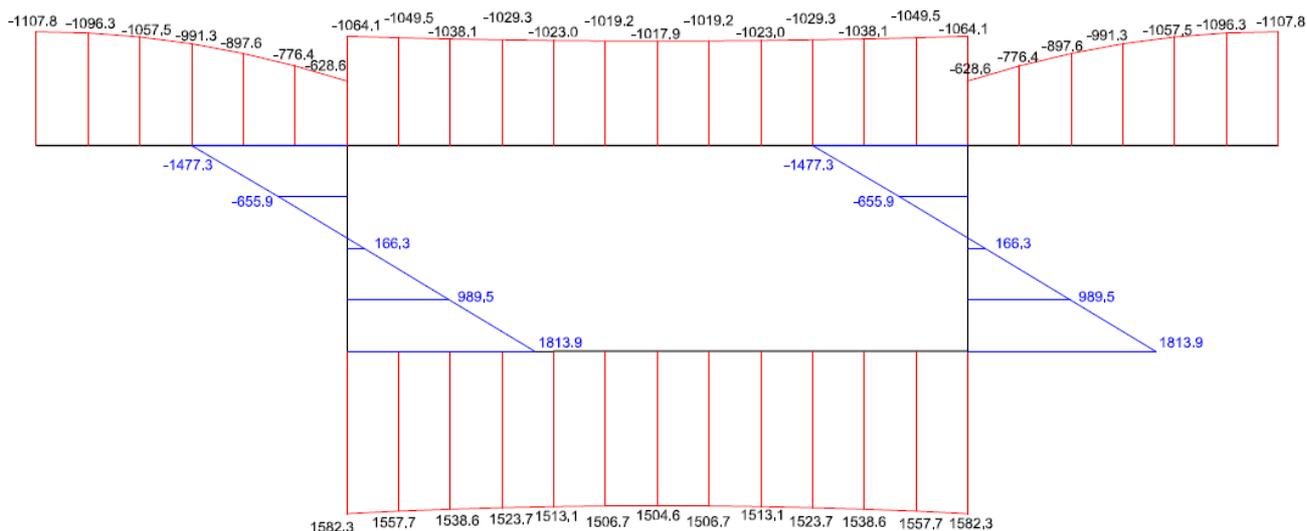


Figura 3.46 – Distribución de σ_{xx} (kN/m^2) para Carga Dist. 3 en el centro de la luz ($x = 20$ m)

Como podemos observar en la Figura 3.45 y la Figura 3.46, al no existir una concentración de cortantes en ningún punto del modelo, además al ser la distorsión muy pequeña, casi despreciable (solo causada por la flexión del puente), presenta una distribución de tensiones longitudinales con leyes lineales y cuadradas, que se asemejan a las que se obtendría por la teoría de Resistencia de Materiales.

Sin embargo, en la Figura 3.44, al existir mayor distorsión, se aleja de los valores y forma que obtendríamos mediante teoría de Resistencia de Materiales aunque siguen siendo similares.

3.1.2.3.2. Tensiones tangenciales

Los valores de las tensiones tangenciales ante las cargas distribuidas son menores que las obtenidas con las cargas puntuales, ya que no necesita una redistribución de la concentración de las cargas. Observaremos los valores para la misma sección anterior, $x = 19.5$ m; donde cómo se puede observar en la Figura 3.47, los valores son despreciables respecto a los obtenidos en las tensiones longitudinales.

Sin embargo, debido a la carga distribuida, las tensiones tangenciales máximas se encuentra en la sección del apoyo, siguiendo la misma distribución de la Figura 3.47 pero con valores mayores, tal y como se muestra en la Figura 3.48. Dichos valores máximos son menores a los máximos que obtuvimos por la carga puntual.

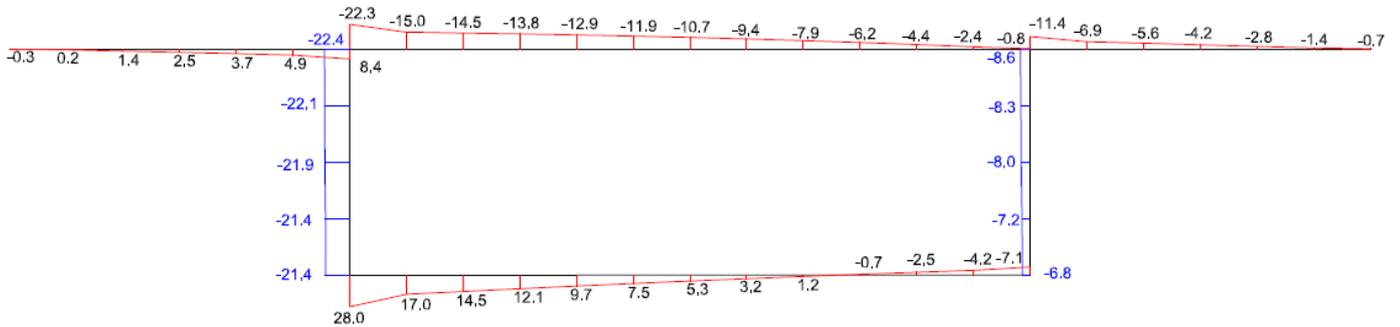


Figura 3.47 – Distribución de τ_{xy} (kN/m^2) para Carga Dist. 1 en la sección $x = 19.5$ m

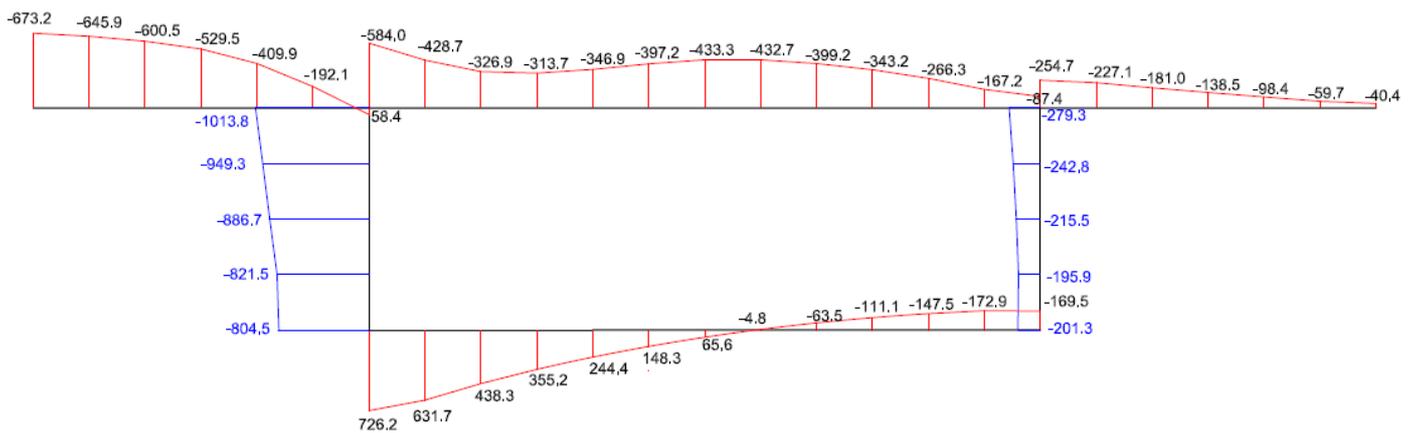


Figura 3.48 – Distribución de τ_{xy} (kN/m^2) para Carga Dist. 1 en la sección $x = 0$ m

3.1.2.4 Esfuerzos

3.1.2.4.1 Momentos flectores transversales

La distribución de los momentos flectores transversales M_y para la carga distribuida 1, 2 y 3 en la sección central y la sección $x = 15$ m, se representan a continuación. Como puede observarse en todos los casos la ley de momentos es más uniforme y con valores más homogéneos debido a la carga distribuida.

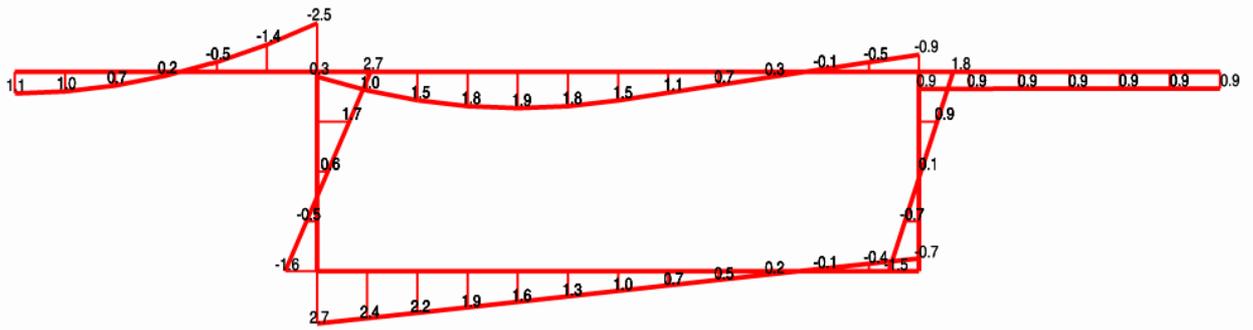


Figura 3.49 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 1

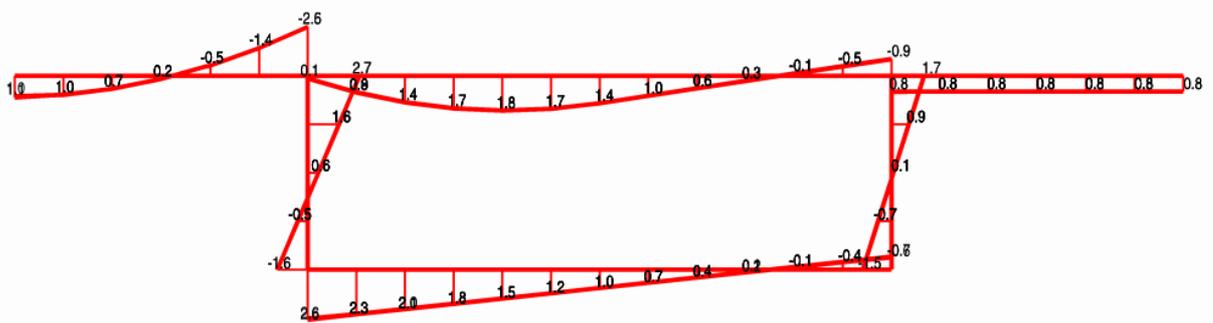


Figura 3.50 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 1

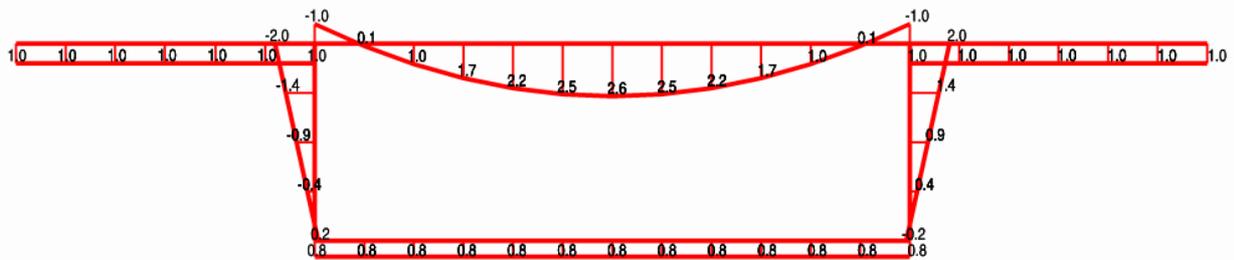


Figura 3.51 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 2

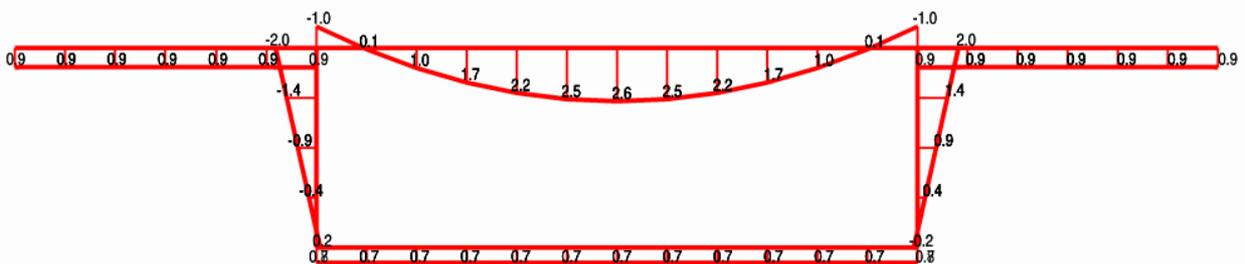


Figura 3.52 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 2

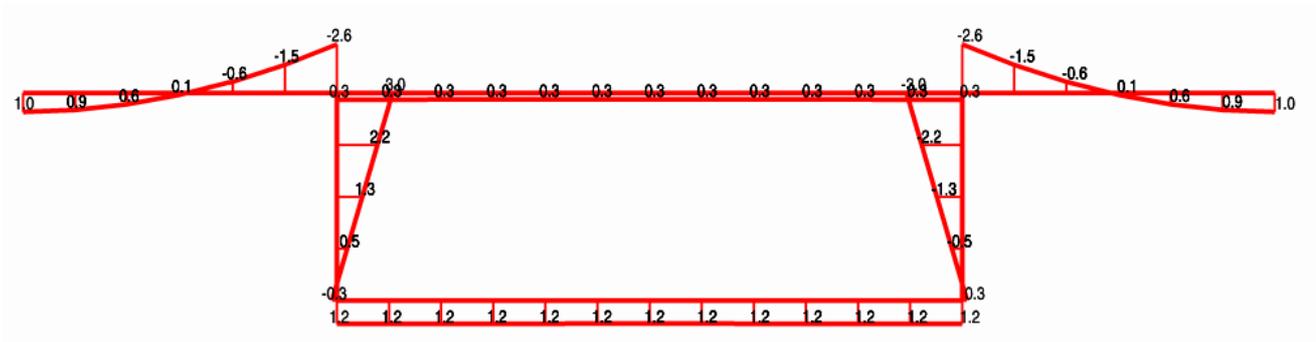


Figura 3.53 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 3

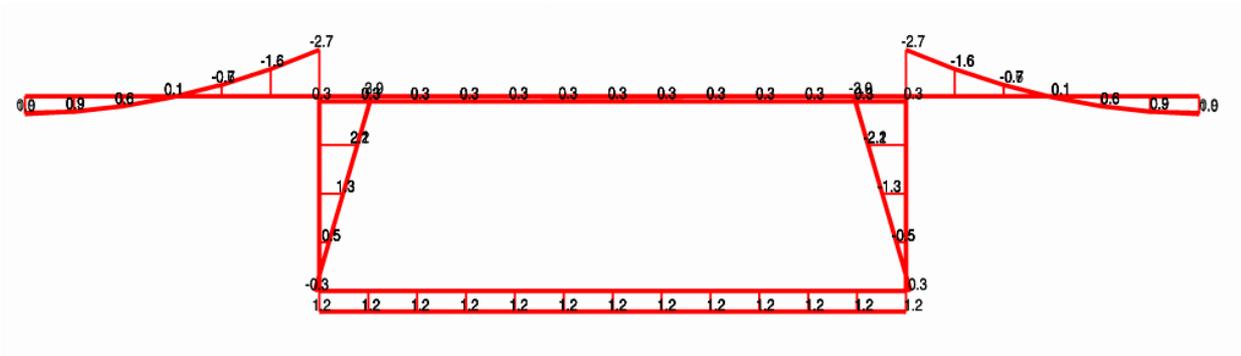


Figura 3.54 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 3

Para las tres cargas, se muestra la distribución a lo largo de la luz de los momentos flectores en los nodos de interés (nodo 3, 7, 10 y 12). Como puede observarse son valores muy bajos respecto a los obtenidos con cargas puntuales.

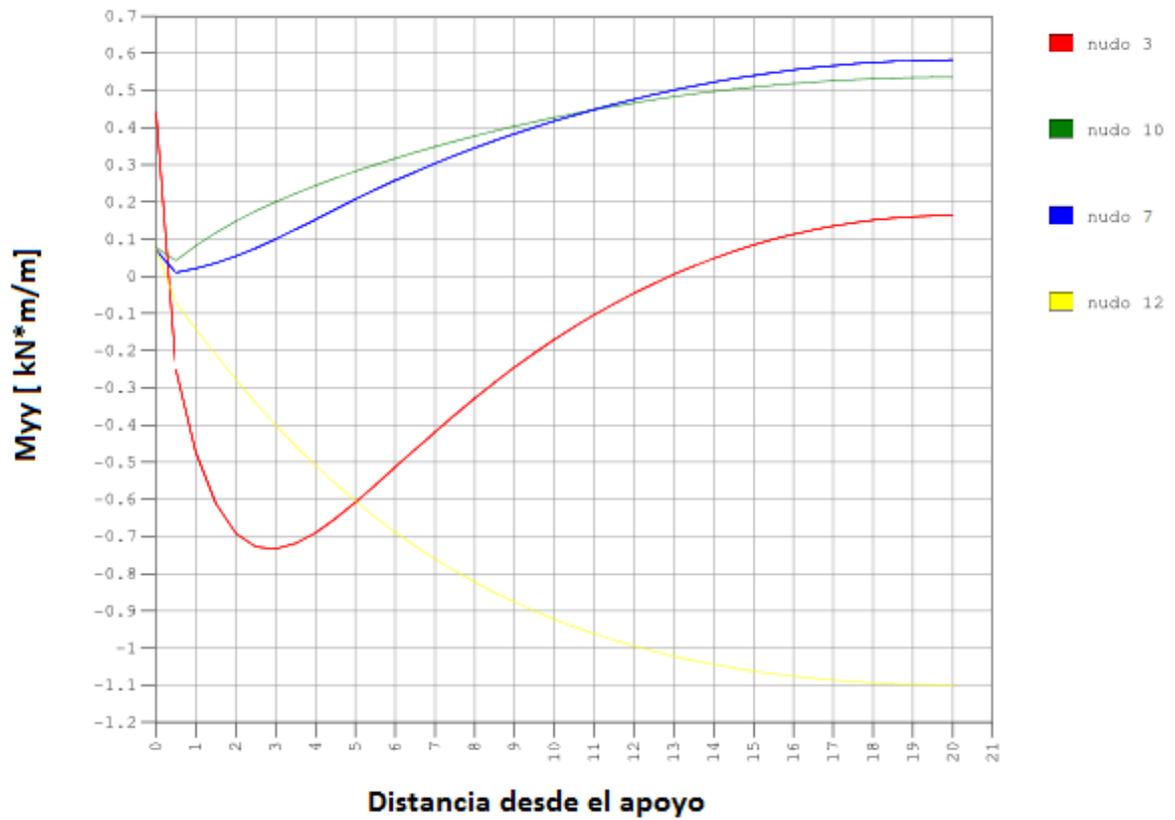


Figura 3.55 – Distribución del Momento flector M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) para la C. Dist. 1

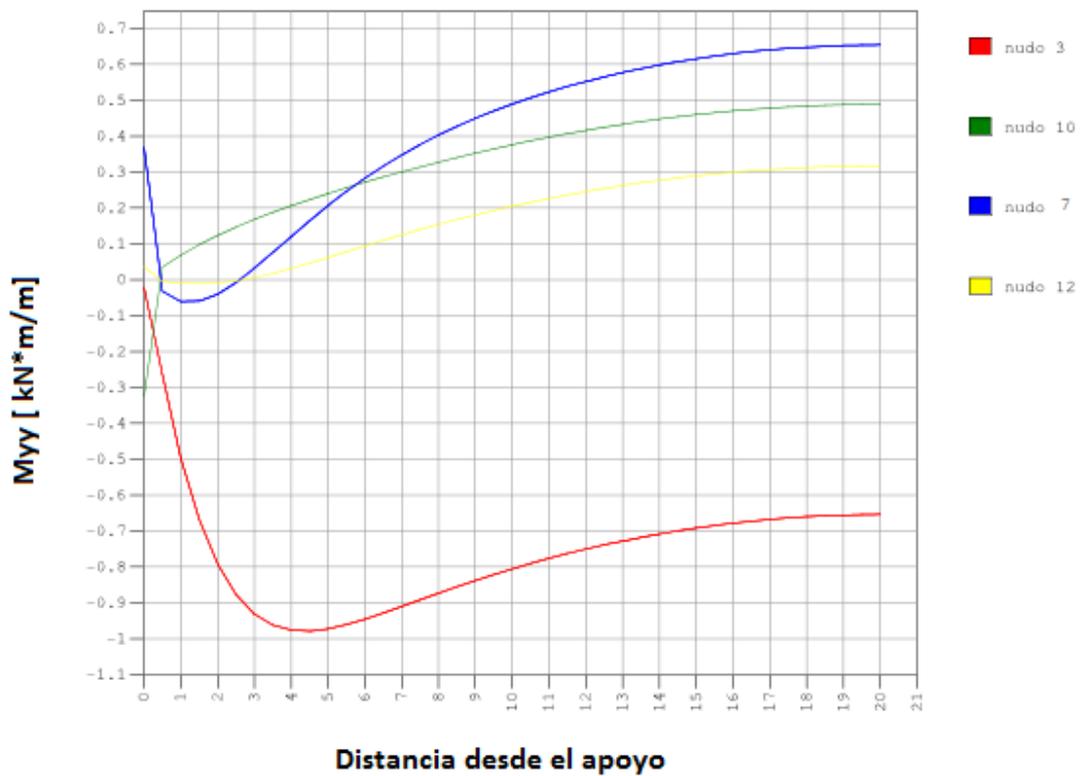


Figura 3.56 – Distribución del Momento flector M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) para la C. Dist. 2

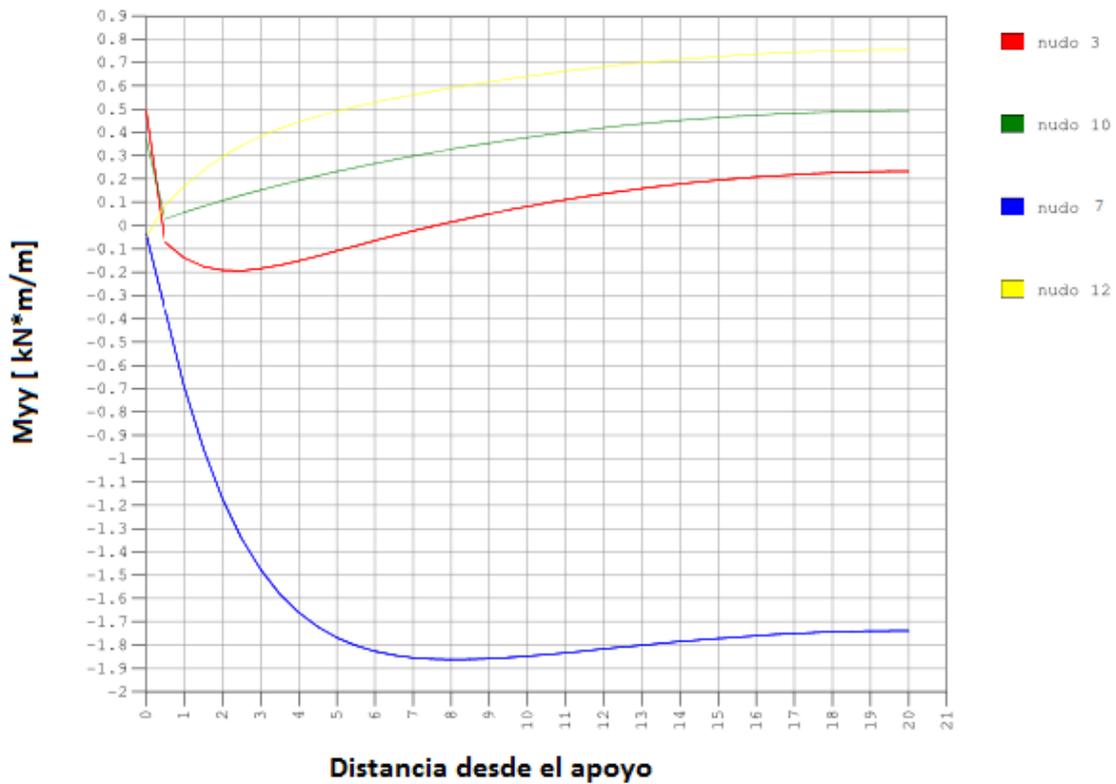


Figura 3.57 – Distribución del Momento flector M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) para la C. Dist. 3

3.1.2.4.2. Esfuerzos cortantes

En las cargas distribuidas la influencia de los esfuerzos cortantes es prácticamente nula ya que sus valores son obtenidos a partir de las tensiones tangenciales, que como hemos observado en los tres casos de cargas distribuidas eran valores despreciables respecto a las tensiones longitudinales.

En la Figura 3.58, se muestra la sección $x = 0$ m, es decir, en el apoyo, donde el cortante alcanza el valor máximo para la carga distribuida 1. En el resto de casos y secciones sus valores son aún más bajos.

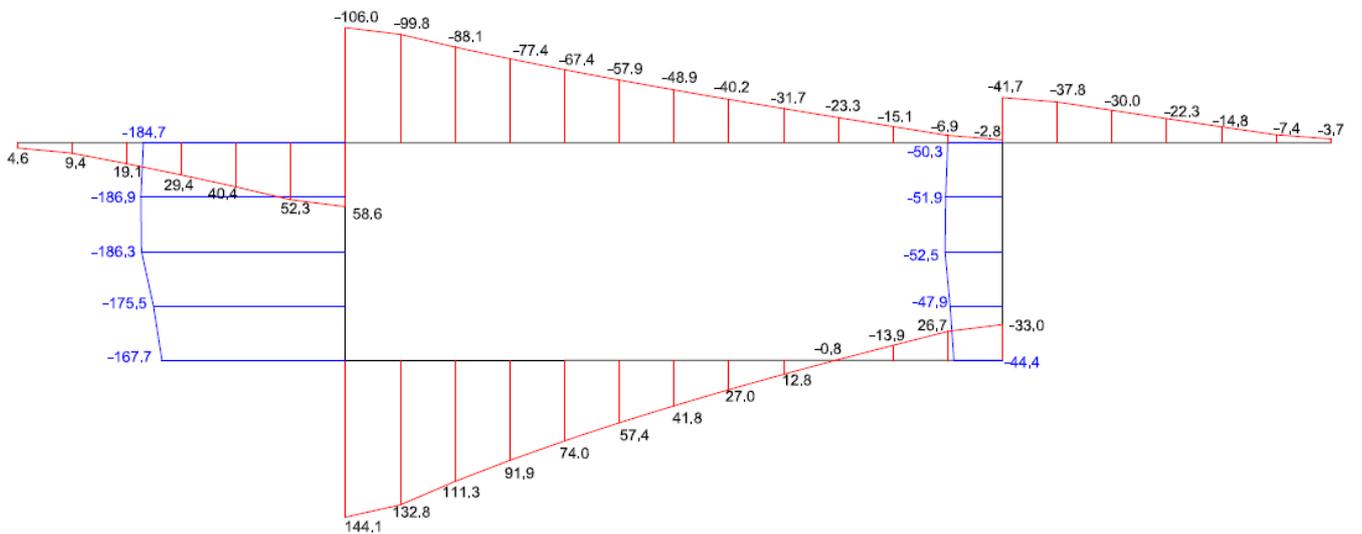


Figura 3.58 – Distribución del Cortante N_{xy} en la sección del apoyo ($x = 0$ m) para la C. Dist. 1

3.2 Comportamiento de la viga cajón con almas inclinadas

Para el estudio del caso de la viga cajón con almas inclinadas nos centraremos en el modelo básico 4, que es el que se representa en la Figura 3.59, del mismo modo que para el caso con las almas rectas. Hemos optado por este modelo por ser el elegido por Javier Manterola y poder corroborar sus resultados, además de ser un caso intermedio entre ambos que muestra las diferencias existentes entre ambos modelos.

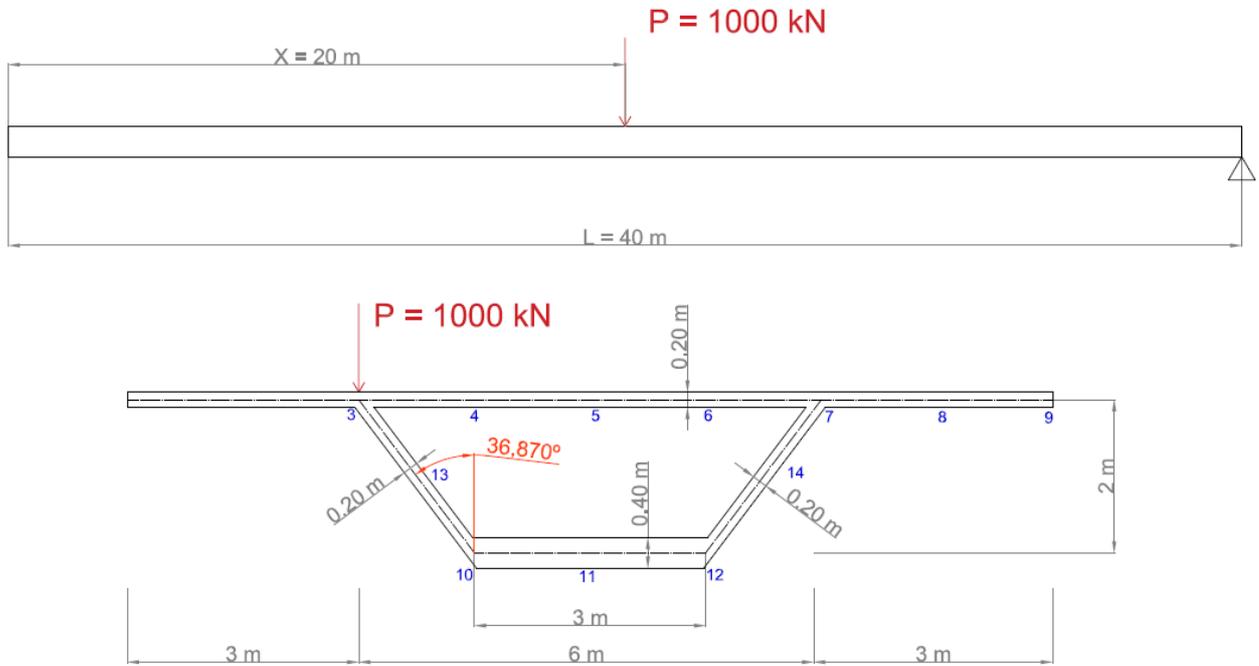


Figura 3.59 – Geometría

3.2.1 Respuesta ante cargas puntuales

Como el caso anterior procedemos al estudio de una carga puntual descentralizada colocada en la parte superior del alma izquierda, con un valor de 1000 kN.

3.2.1.1 Desplazamientos

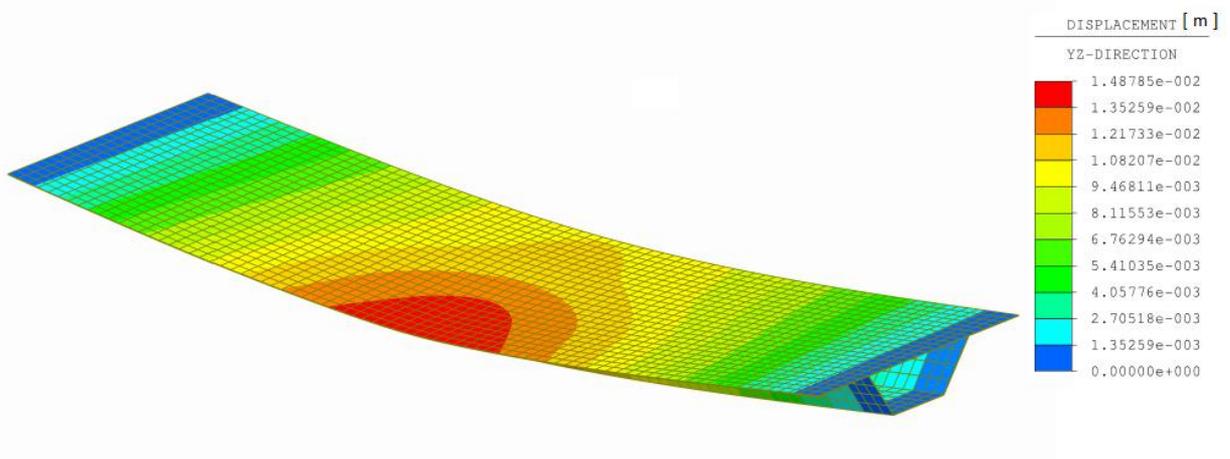


Figura 3.60 – Desplazamientos del modelo

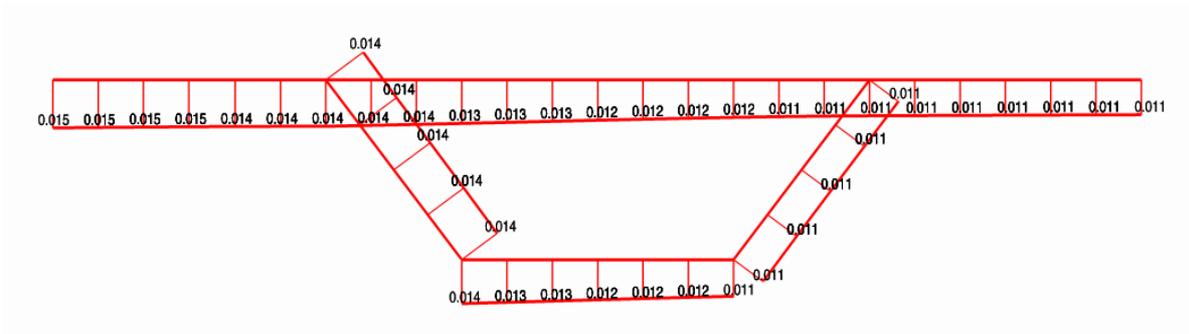


Figura 3.61 – Desplazamientos para x = 20 m

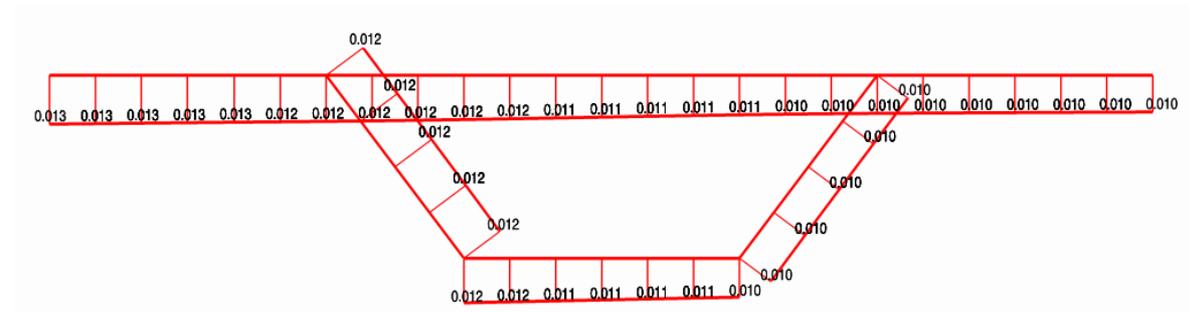


Figura 3.62 – Desplazamientos para x = 15 m

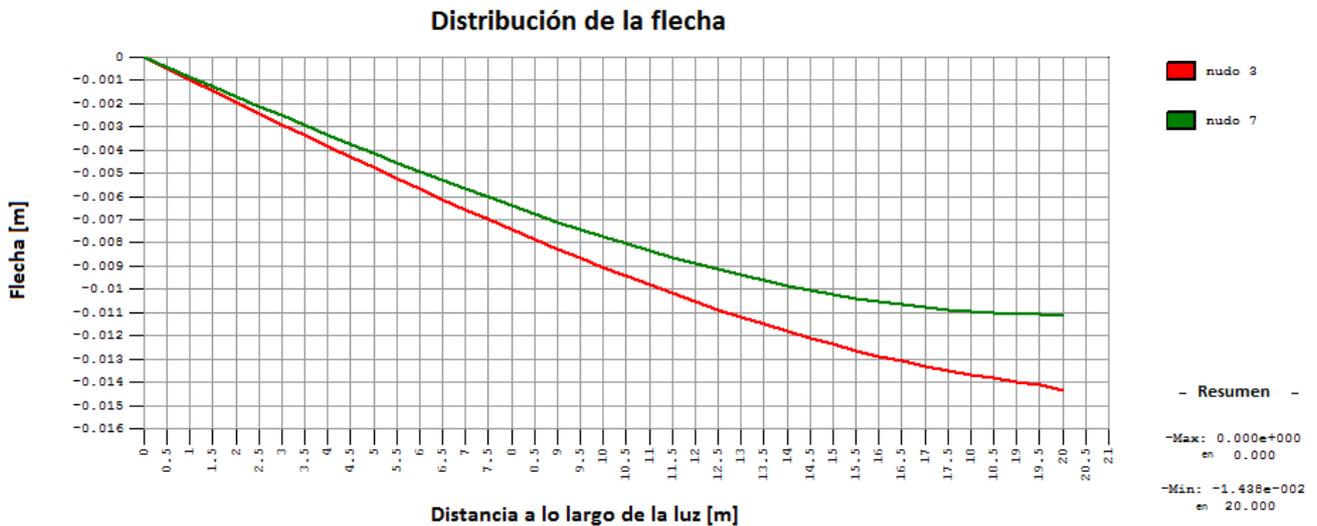


Figura 3.63 – Distribución de las flechas a lo largo de la luz en los nodos 3 y 7

Comparando los desplazamientos obtenidos de las dos secciones tipo cajón estudiadas obtenemos que las flechas medias así como los desplazamientos en la sección son similares. Esto se debe principalmente a que la inercia a flexión son similares, sin embargo, podemos observar que a pesar de tener una inercia a torsión notablemente menor (aproximadamente un 25% menor en el modelo de almas inclinadas), la tendencia a la inclinación de las almas favorece la atenuación de cargas, especialmente cuando se trata de cargas excéntricas.

3.2.1.2 Distorsión

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.006229	0.000109	0.006264	0.000109	0.005978	0.000104	0.005166	0.000090	0.000206
10	0.011230	0.000196	0.015012	0.000262	0.012586	0.000220	0.009122	0.000159	0.000418
15	0.013687	0.000239	0.029107	0.000508	0.020559	0.000359	0.010235	0.000179	0.000642
16	0.013884	0.000242	0.032602	0.000569	0.022326	0.000390	0.010084	0.000176	0.000688
17	0.014049	0.000245	0.036192	0.000632	0.024102	0.000421	0.009800	0.000171	0.000734
18	0.014287	0.000249	0.039688	0.000693	0.025859	0.000451	0.009520	0.000166	0.000780
19	0.015323	0.000267	0.042476	0.000741	0.027721	0.000484	0.009305	0.000162	0.000828
20	0.020693	0.000361	0.043603	0.000761	0.031254	0.000545	0.009186	0.000160	0.000914

Tabla 3.7 – Ángulos y distorsión del modelo 4 a lo largo de la luz

Distancia desde el apoyo: Dirección X	Distorsión
0	0.00000000
5	0.00020627
10	0.00041843
15	0.00064218
16	0.00068850
17	0.00073429
18	0.00077976
19	0.00082751
20	0.00091399

Tabla 3.8 – Distorsión modelo 4

En las tablas 3.7 y 3.8, se obtienen los valores de los ángulos y distorsión de varias secciones a lo largo del puente. A continuación, en la Figura 3.64 se refleja la distribución de la distorsión a lo largo de la luz del puente modelo.

Si comparamos ambas distribuciones, véase Figura 3.65, puede observarse que la sección con almas inclinadas tiene menor distorsión, aproximadamente un tercio menor que si fuese con almas rectas.

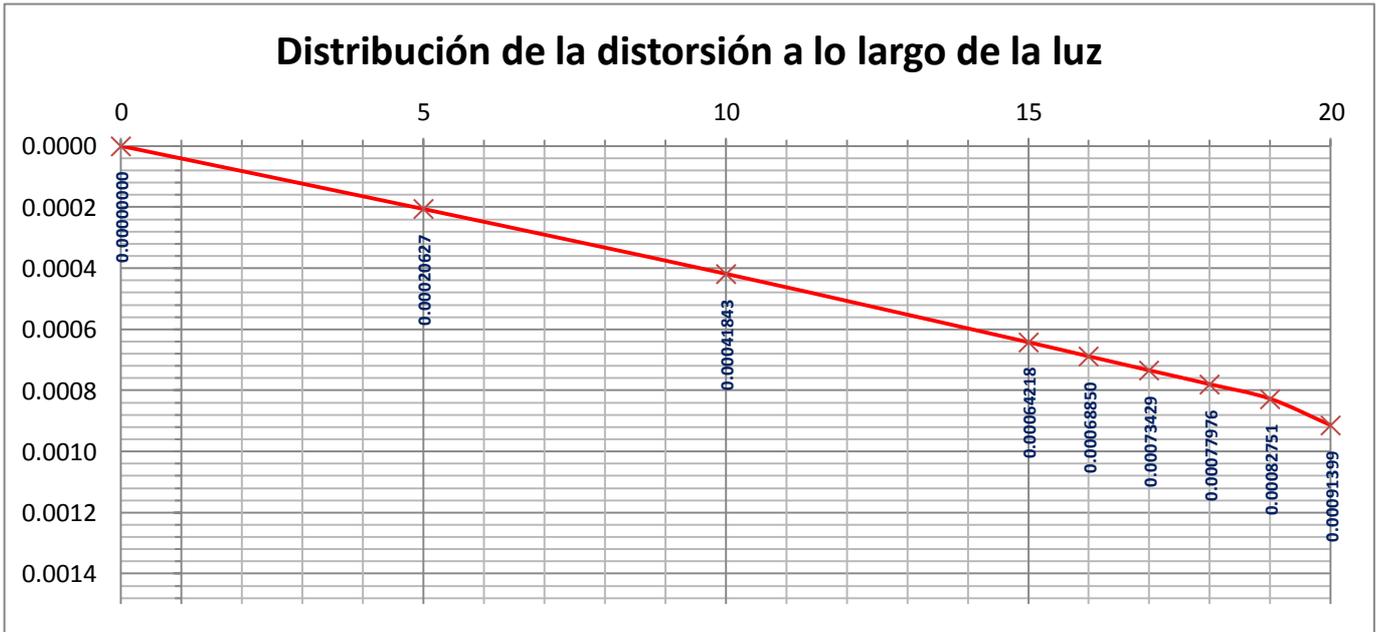


Figura 3.64 – Distribución de la distorsión

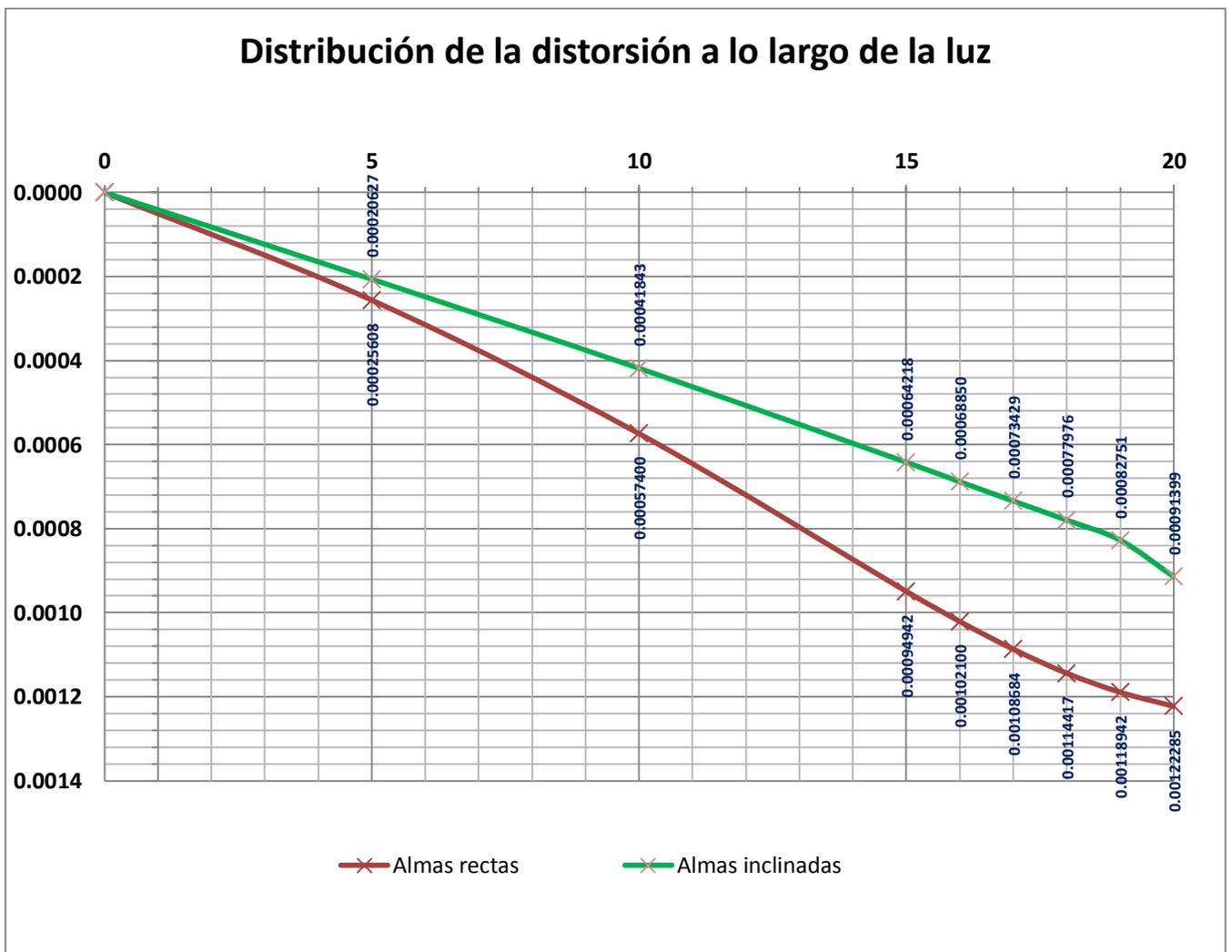


Figura 3.65 – Comparativa de distorsión de ambos modelos

3.2.1.3 Tensiones

3.1.1.3.1. Tensiones longitudinales

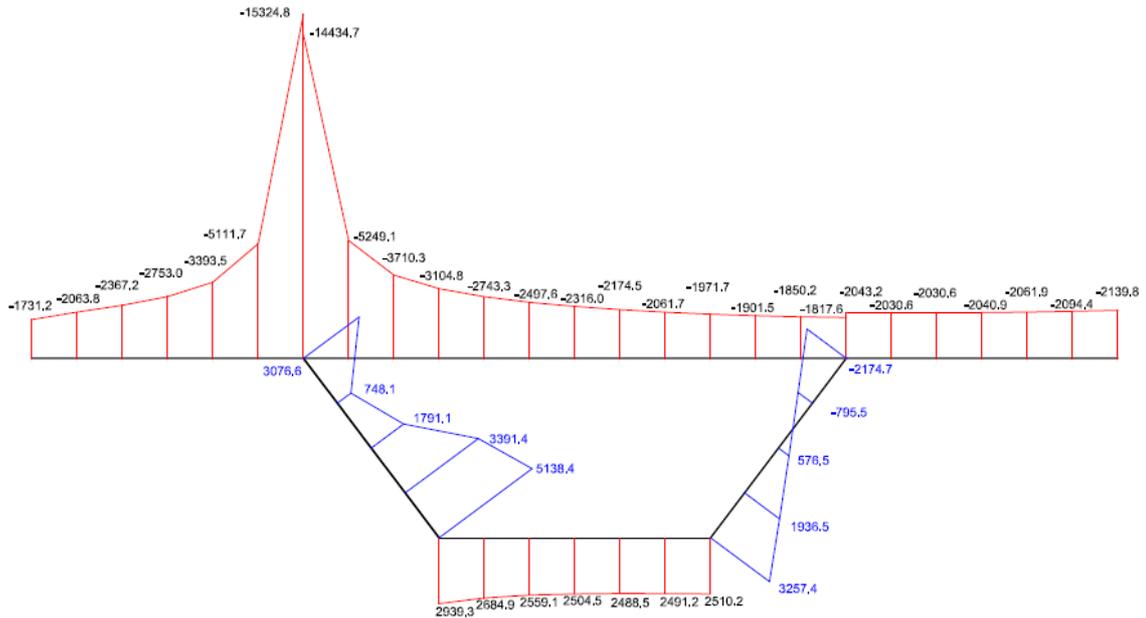


Figura 3.66 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en el centro de la luz ($x = 20$ m)

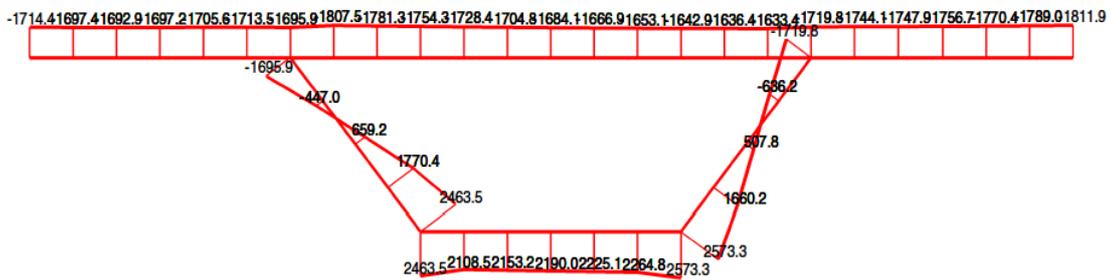


Figura 3.67 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en $x = 15$ m

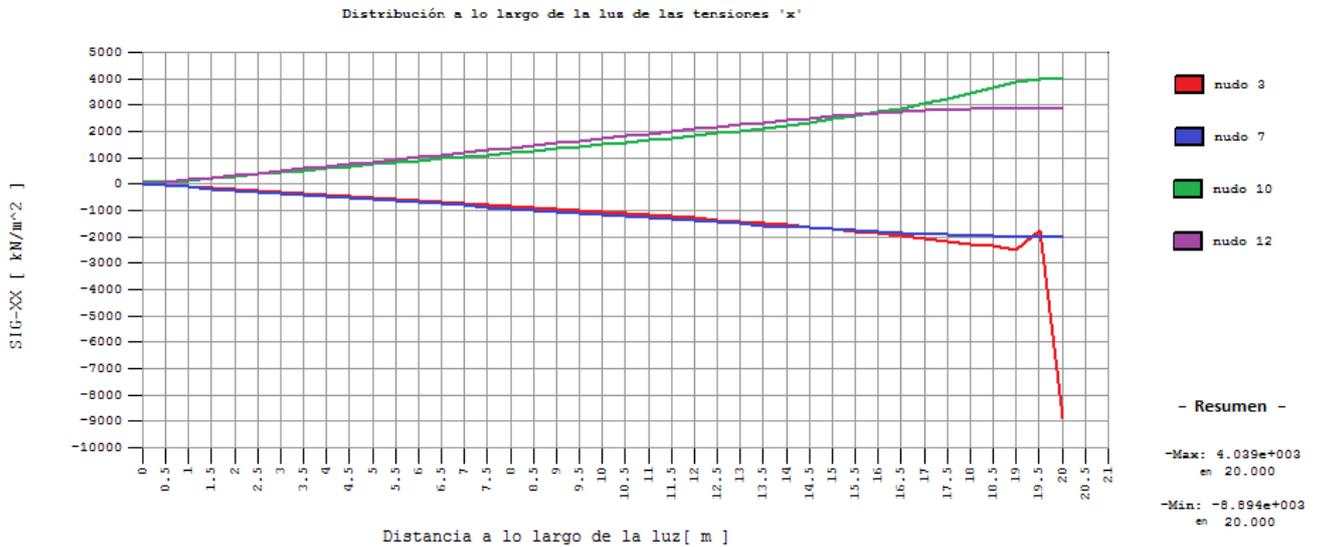


Figura 3.68 – Distribución a lo largo de la luz de σ_{xx} (kN/m²)

La distribución de las tensiones longitudinales es similar al caso de la sección en cajón con almas rectas, produce los mismos cambios y la perturbación bajo la carga aplicada en el nudo 3, atenuándose a medida de que nos alejamos de la carga. Sin embargo, dichos valores son ligeramente menores (exceptuando en el nudo 3 perteneciente al ala superior, tiene un pico tensional de -15324.8 kN/m^2 respecto a los -12951.4 kN/m^2 obtenidos en el caso anterior). En general son menores ya que tiene una inercia a flexión ligeramente mayor como puede comprobarse en el apartado 2.2, y especialmente a que sufre una distribución más homogénea entre tensiones longitudinales y tangenciales debido a la inclinación del alma como veremos en el siguiente apartado de tensiones tangenciales.

3.1.1.3.2. Tensiones tangenciales

La distribución de las tensiones a lo largo de las secciones, $x = 19.5 \text{ m}$ y $x = 19 \text{ m}$ desde el apoyo, además de los valores que tiene a lo largo de la luz en los nudos 3 y 10 en las zonas pertenecientes al alma se muestran en las siguientes figuras:

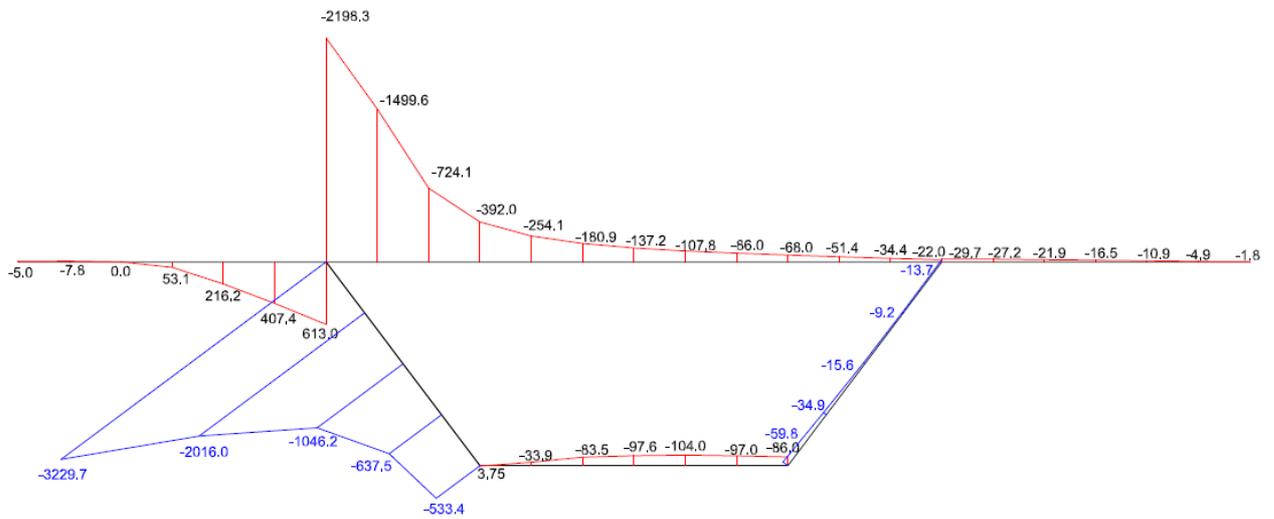


Figura 3.69 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²) en la sección de $x = 19.5 \text{ m}$

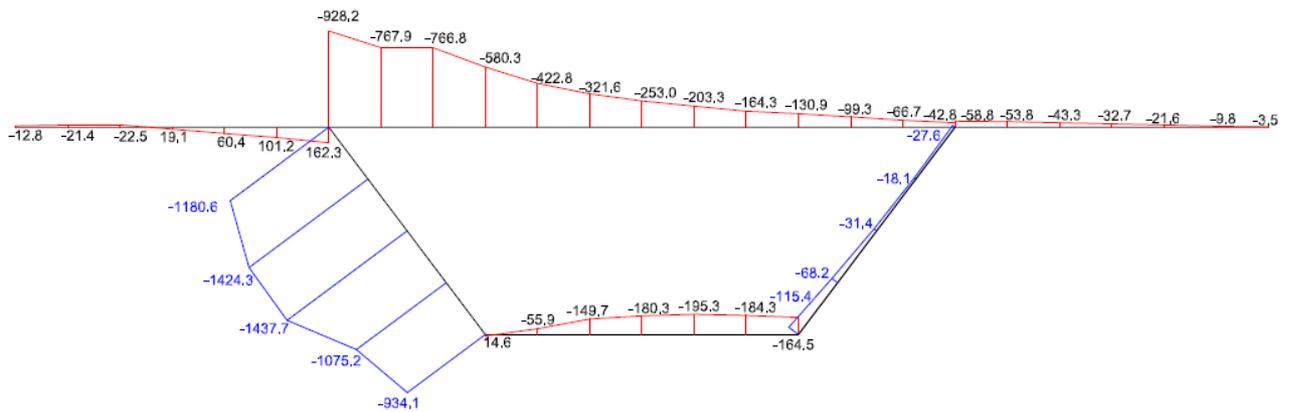


Figura 3.70 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²) en la sección de $x = 19 \text{ m}$

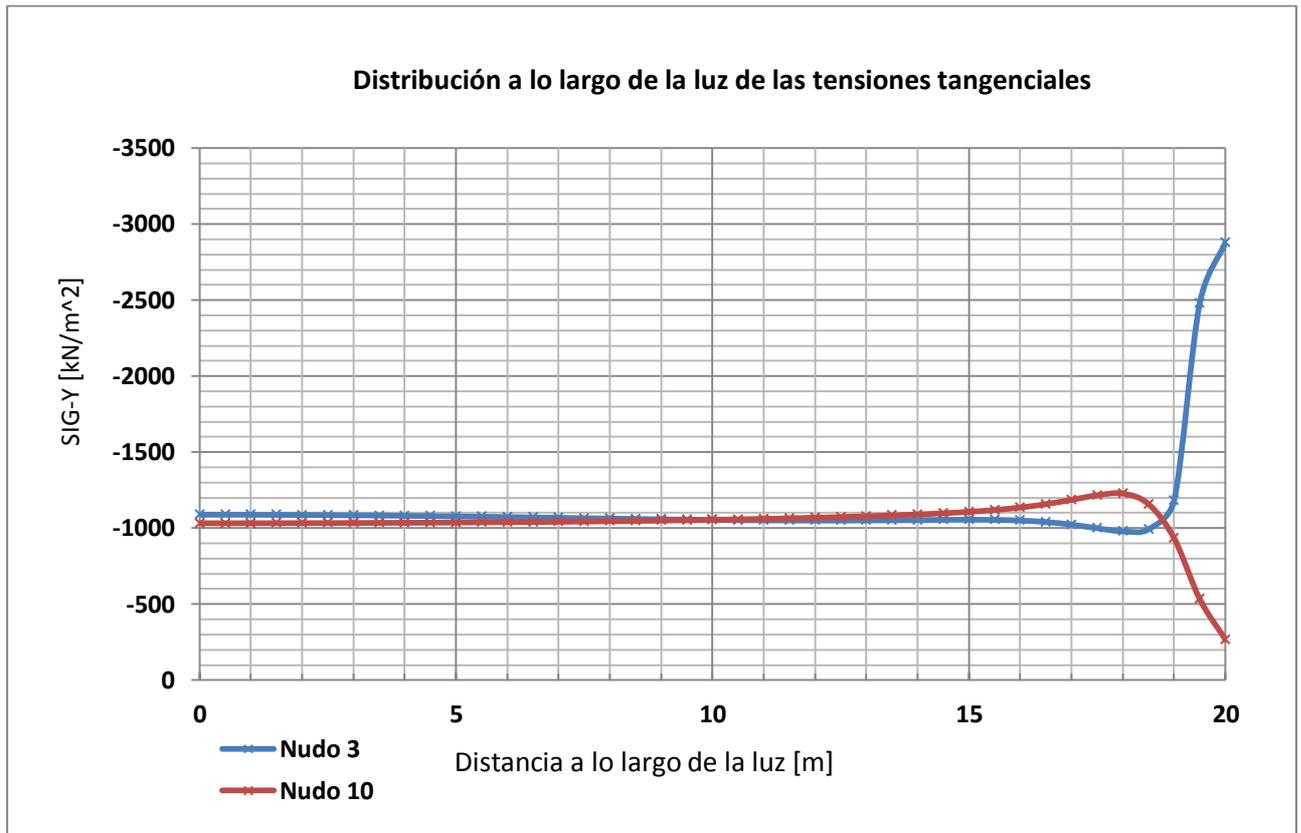


Figura 3.71 – Distribución a lo largo de la luz de τ_{xy} (kN/m²)

Como se puede observar en estas tres figuras, su forma es análoga a la obtenida en el caso de almas rectas, sin embargo, los valores obtenidos son superiores ya que se redistribuyen más homogéneamente los tipos de tensiones debido a la inclinación que tiene las almas.

3.2.1.4 Esfuerzos

Análogamente al caso anterior, la concentración de tensiones se traduce a la generación de esfuerzos, donde podemos observar que los valores en los momentos flectores siguen la misma distribución aunque sus valores son menores ya que las tensiones longitudinales obtenidas eran menores.

De tal forma que los esfuerzos cortantes N_{xy} obtenidos son superiores ya que las tensiones tangenciales así lo eran.

3.1.1.4.1 Momentos flectores transversales

A continuación se detallan los diagramas de los momentos flectores en la sección central, a 15 metros del apoyo (y por tanto 5 metros de la carga) y la distribución del momento flector en los nodos 3 y 12 a lo largo de la luz en las Figuras 3.72, 3.73 y 3.74 respectivamente.

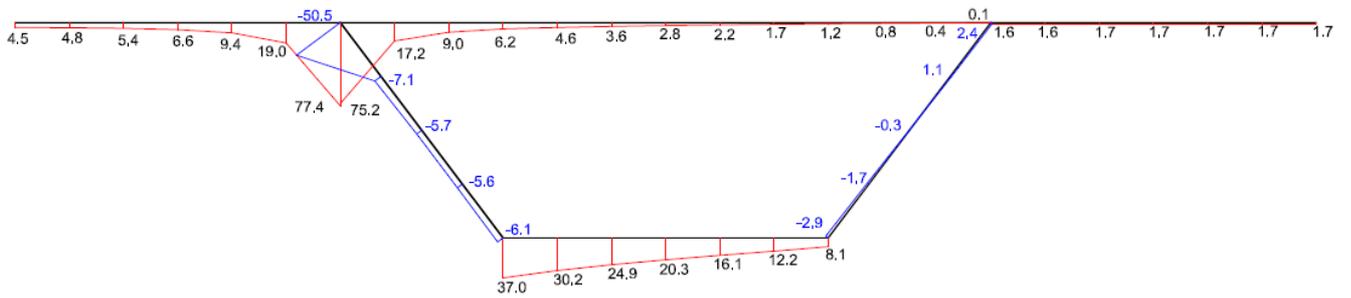


Figura 3.72 – Momento flector M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) en la sección central ($x = 20$ m)



Figura 3.73 – Momento flector M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) en la sección de $x = 15$ m

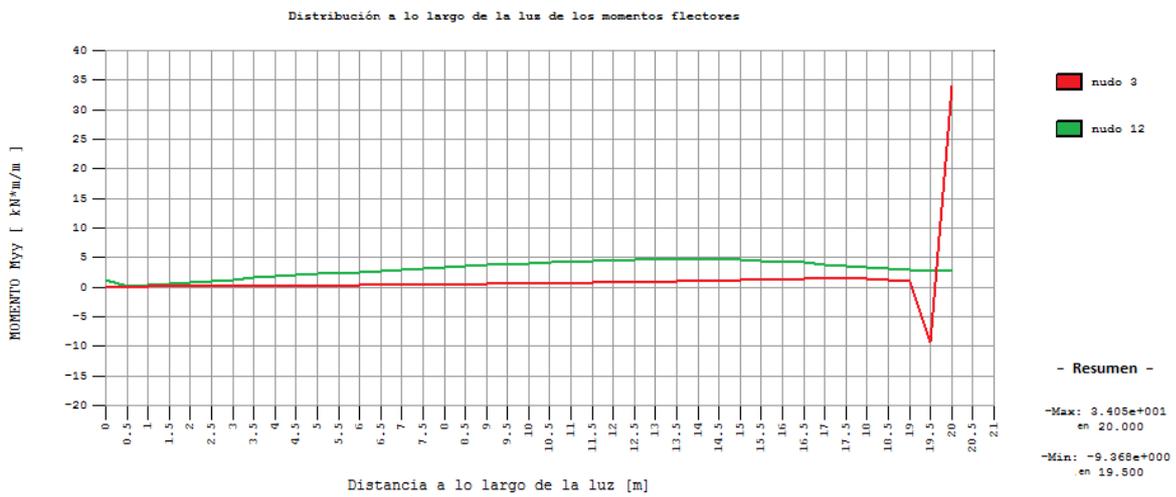


Figura 3.74 – Distribución del Momento flector M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) a lo largo de la luz

3.1.1.4.2. Esfuerzos cortantes Nxy

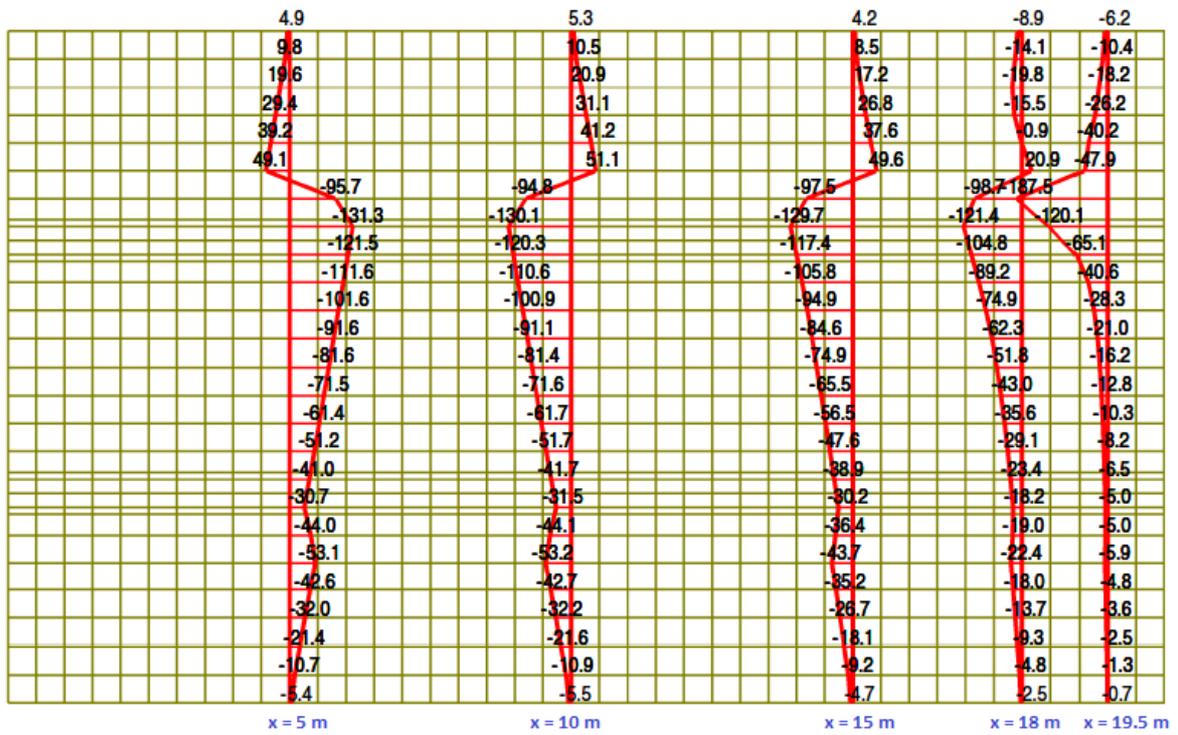


Figura 3.75 – Distribución de los esfuerzos cortantes N_{xy} [kN/m] en la losa superior

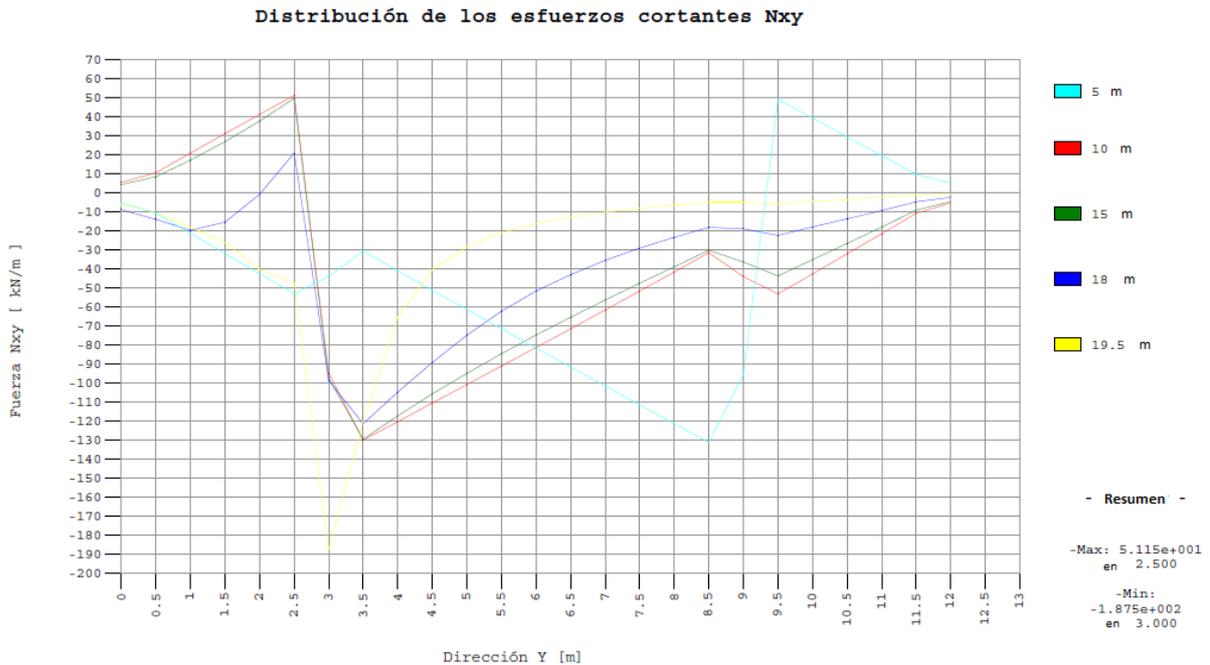


Figura 3.76 – Distribución de los esfuerzos cortantes N_{xy} [kN/m] en la losa superior

De la misma forma que el caso anterior, la dirección ‘y’ de la Figura 3.73, empieza por el ala de la izquierda, es decir, empezando por el nudo 1 (y = 0 m) y acabando en el nudo 9 (y = 12 m). Realmente en y = 3, se produce picos en dicho esfuerzos (siendo de signos contrarios), aunque Midas hace el promedio apareciendo menores sus valores, aunque se observa perfectamente la tendencia que sigue dichas distribuciones. En y = 9 ocurre lo mismo pero al estar más alejada de la carga no es tan determinante.

3.2.1.5 Influencia de la situación de la carga

A continuación se detallan los cambios producidos cuando situamos la carga puntual de 1000 kN en diferentes puntos de la sección central, produciendo variaciones en los desplazamientos, distorsión, tensiones y esfuerzos generados.

Se procede a aplicar dicha carga en los nodos 1, 2, 3, 4 y 5 (del nudo 6 al 9 se obtienen por simetría) tal y como muestra la Figura 3.77:

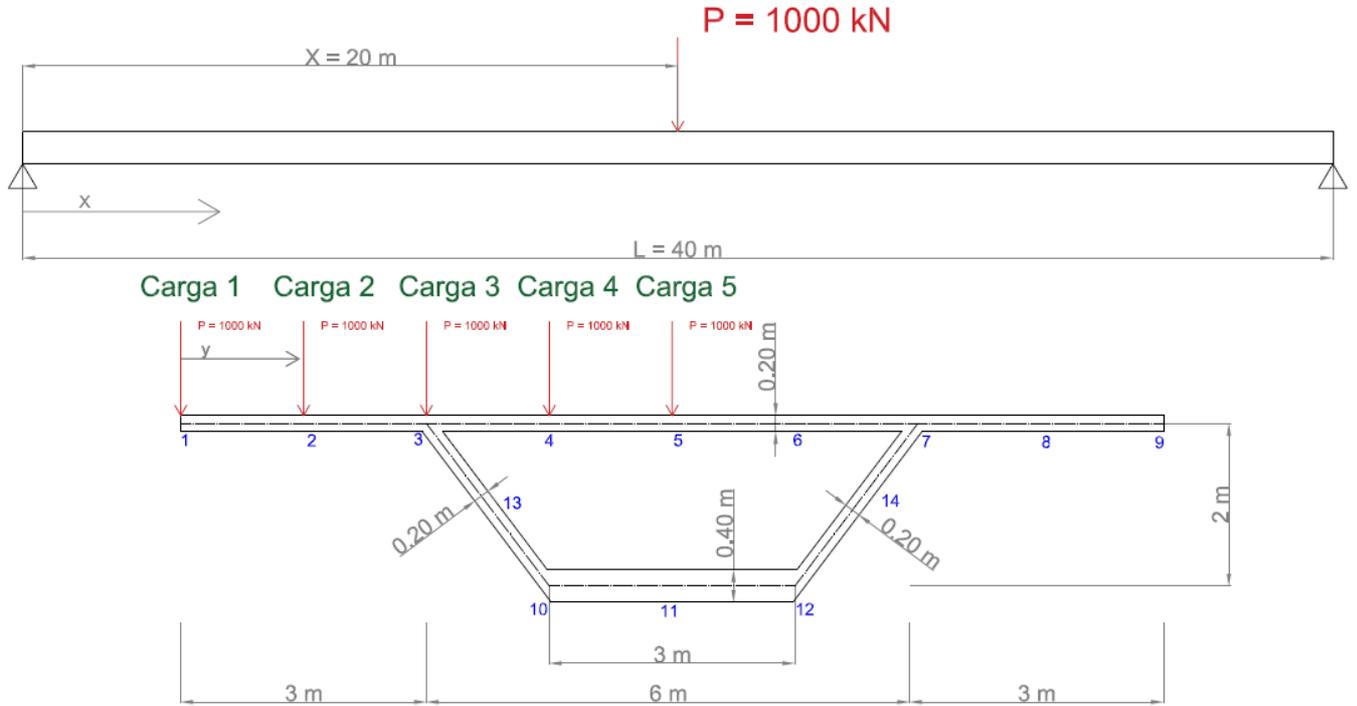


Figura 3.77 – Situación de las cargas puntuales

3.2.1.5.1. Variación en los desplazamientos

La influencia que tiene la carga cuando se mueve transversalmente en la losa superior se aprecia especialmente en la flecha que produce en los nodos 3 y 7 de la sección central.

En la Tabla 3.9 se representan los desplazamientos (en metros) que tienen dichos nodos cuando se aplican las diferentes cargas. El criterio de signos, se toma como positivos la dirección global de los ejes cartesianos:

Nodo	Carga	DY	DZ
3	1	0.000955	-0.01487
7		0.000734	-0.010775
3	2	0.000730	-0.014516
7		0.000534	-0.010928
3	3	0.000516	-0.014377
7		0.000326	-0.011104
3	4	0.000238	-0.013476
7		0.000132	-0.011603
3	5	0.000044	-0.012493
7		-0.000044	-0.012493

Tabla 3.9 – Desplazamientos de los nodos 3 y 7 en la sección central [m]

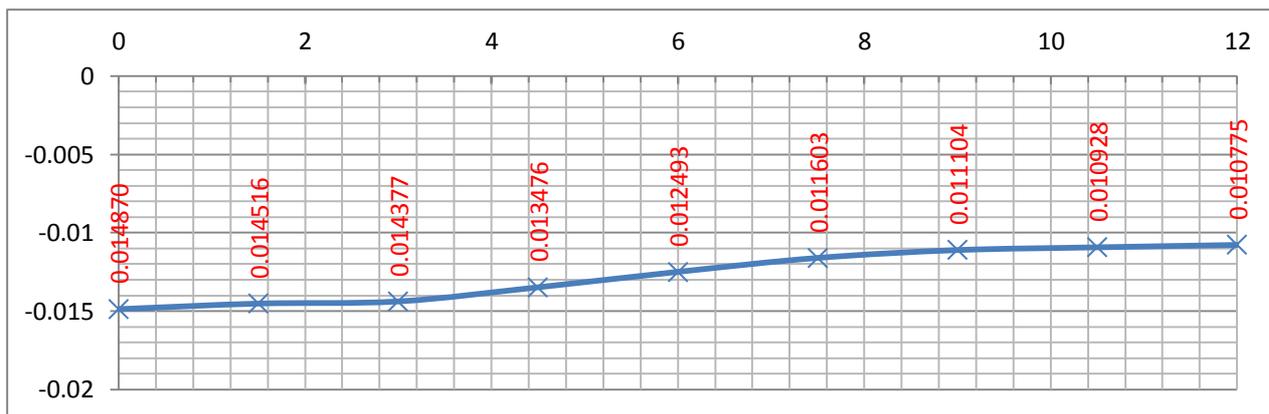


Figura 3.78 – Desplazamiento del nodo 3 según la situación de la carga [m]

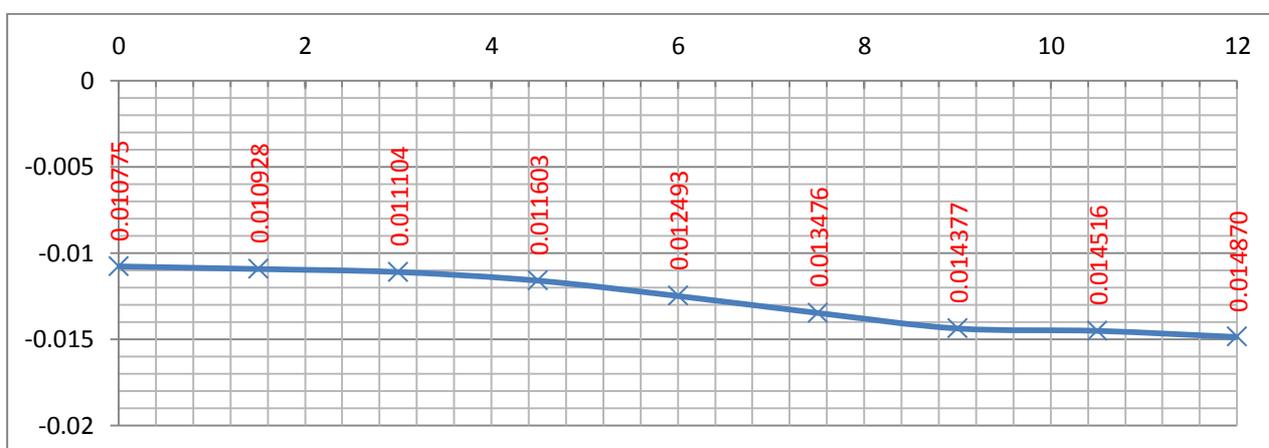


Figura 3.79 – Desplazamiento del nodo 7 según la situación de la carga [m]

En las figuras anteriores, están representadas las flechas que presentan los nodos 3 y 7 cuando la carga se va desplazando transversalmente desde el nodo 1 hasta el nodo 9 (de los 0 a los 12 metros en el gráfico).

Como son nodos simétricos, sus desplazamientos son simétricos.

Los desplazamientos obtenidos son similares a los obtenidos en el caso anterior, pero, el máximo no se presenta cuando la carga se encuentra sobre el alma, sino que se presenta en este caso cuando se encuentra en el extremo del ala más próxima. Esta pequeña diferencia se debe a la mayor rigidez que presenta la sección cerrada al ser inclinada.

3.2.1.5.2. Variación de la distorsión

Estudiaremos la cómo cambia la distorsión según la posición de la carga en la sección más desfavorable, donde se produce la mayor distorsión, que es la sección central.

Carga	Distorsión [rad]
1	0.00148453
2	0.00118350
3	0.00091399
4	0.00050449
5	0.00000000

Tabla 3.10 – Distorsión de la sección central

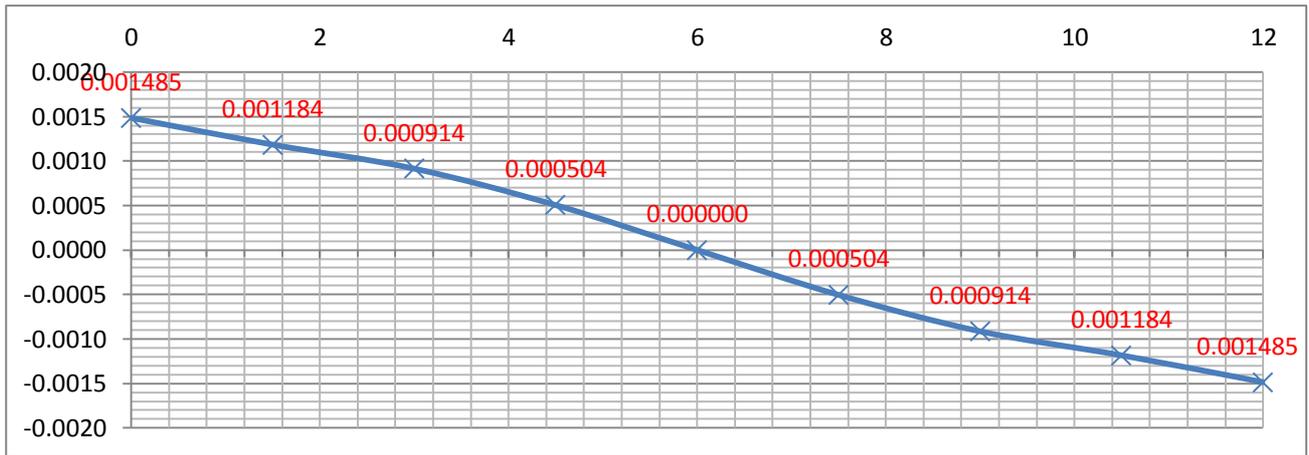


Figura 3.80 – Distorsión de la sección central

La evolución que presenta la distorsión, mostrado en la Figura 3.80, se puede observar como es lineal con la excentricidad de la carga. Esta supone una gran diferencia respecto al caso anterior cuya distorsión mayor se presentaba cuando la carga estaba sobre las almas siendo luego casi constante en sus alas al variar la carga.

3.2.1.5.3. Variación en las tensiones

Los valores de las tensiones vienen expresados en kN/m^2 . En las siguientes figuras aparecen las líneas de influencia de las tensiones longitudinales de la sección central en los nodos 3 y 10 pertenecientes a la losa superior e inferior cuando se desplaza la carga puntual de 1000 kN a través de la sección central.

Análogamente al caso anterior se ha seleccionado las secciones de interés para el estudio de la variación de las tensiones y esfuerzos, como puede observarse en la Figura 3.81. Concretamente, para las tensiones longitudinales nos interesan las secciones B y F (cuyos nodos afines son los nodos 3 y 10 respectivamente).

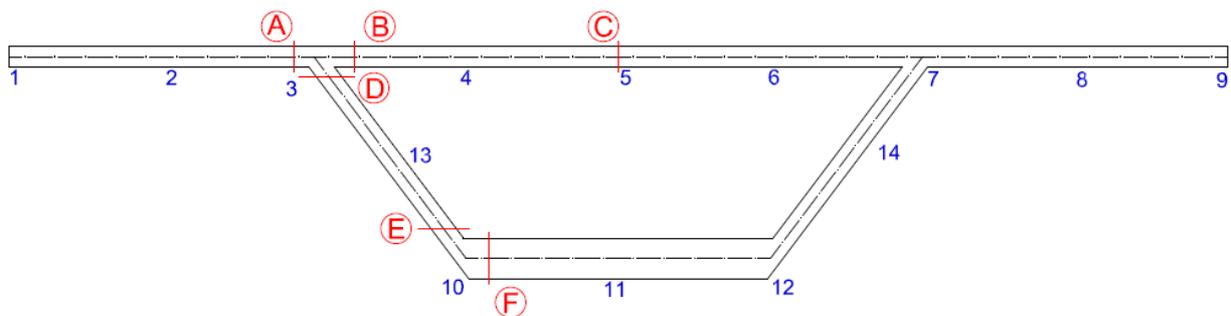


Figura 3.81 – Puntos significativos

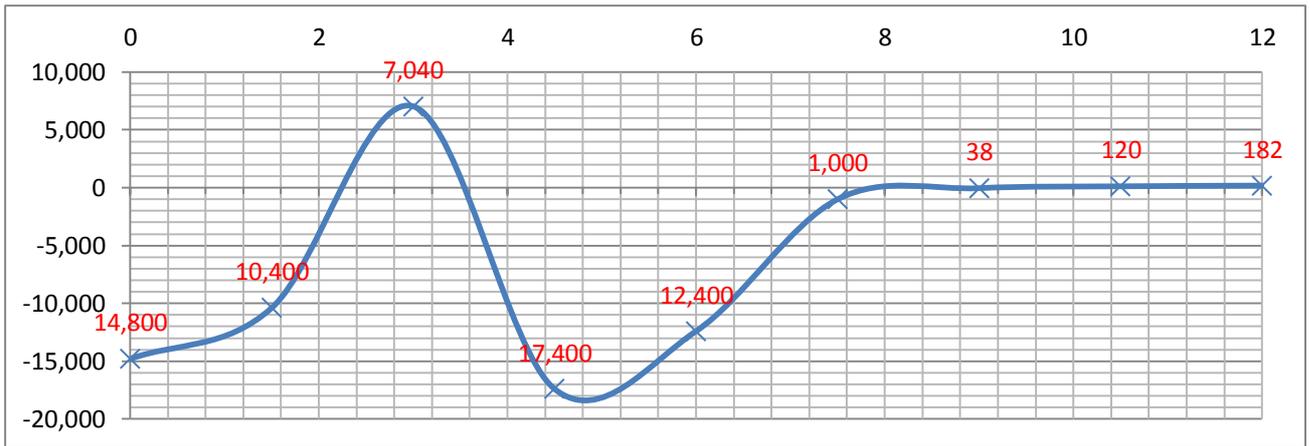


Figura 3.82 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 3 para la sección central

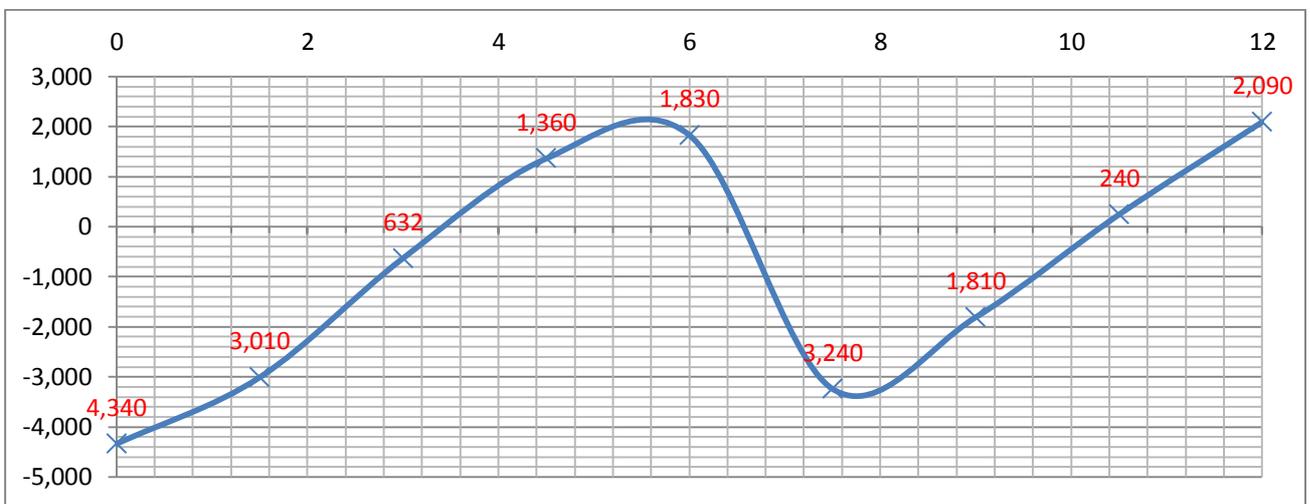


Figura 3.83 - Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 10 para la sección central

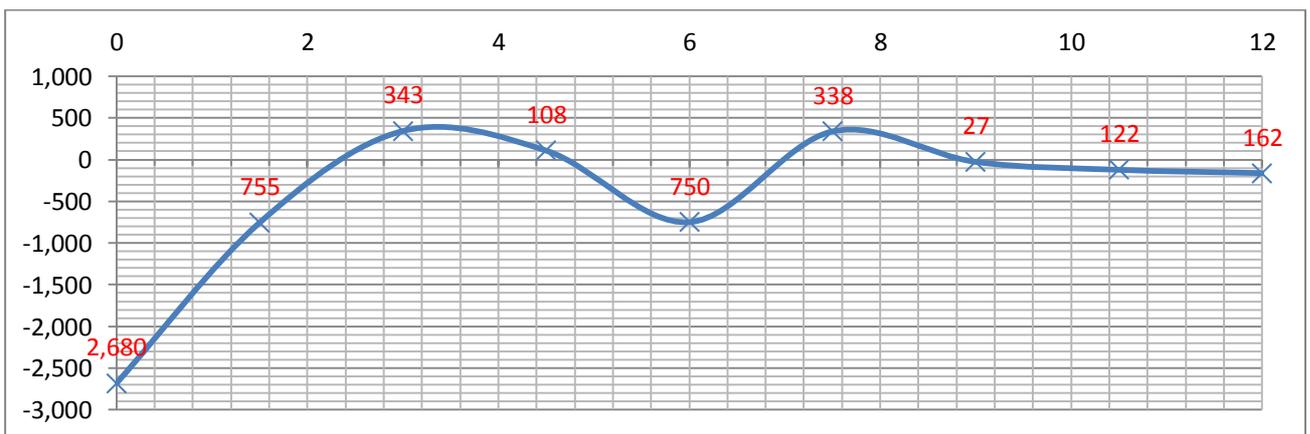


Figura 3.84 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 3 para la sección $x = 15$ m

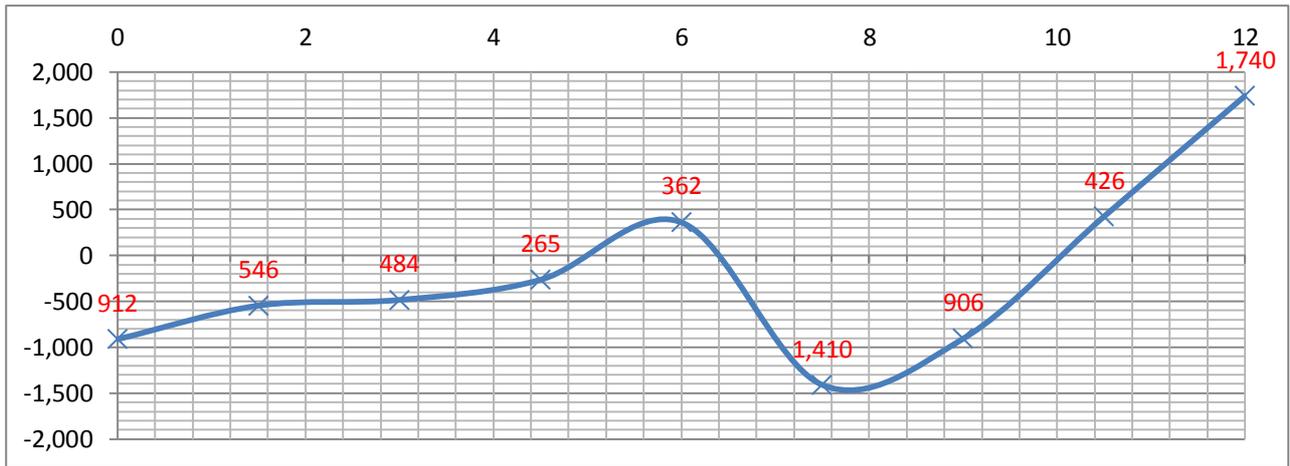


Figura 3.85 – Tensiones longitudinales σ_{xx} en el nudo 10 para la sección $x = 15$ m

Comparando sendos modelos, no hay gran diferencia cualitativa pues los gráficos son similares en forma, exceptuando algunas leves variaciones debido a la redistribución de esfuerzos (causada por la diferencia geométrica de los modelos). A nivel cuantitativo, el modelo con la sección de almas inclinadas presentan, en general, valores menores.

3.2.1.5.4. Variación en los esfuerzos

A continuación se muestran las líneas de influencia tras mover la carga transversalmente, para ello observaremos el cambio que se produce especialmente en los momentos flectores y en los esfuerzos cortantes, en aquellos puntos con mayor interés: nodos 3, 5 y 10 (el resto se obtiene por simetría del modelo). En dichos nodos, observaremos su influencia en las secciones contiguas, tal y como muestra la Figura 3.81 (sección A, B, C, D, E y F).

- Momentos flectores:

En la sección central se observa con mayor precisión la variación que produce el movimiento de la carga, por lo que en las secciones A, B, C, D y E, se mostrarán las líneas de influencia para las cargas de 1000 kN. Los esfuerzos están expresados en kN·m/m.

Los valores obtenidos son prácticamente igual que en el caso anterior. También se aprecia la gran diferencia de los valores de las secciones D y E del alma, lo que se traduce a que es conveniente dimensionar las almas con espesor variable teniendo mayor espesor en su parte superior (la más cercana a la losa superior).

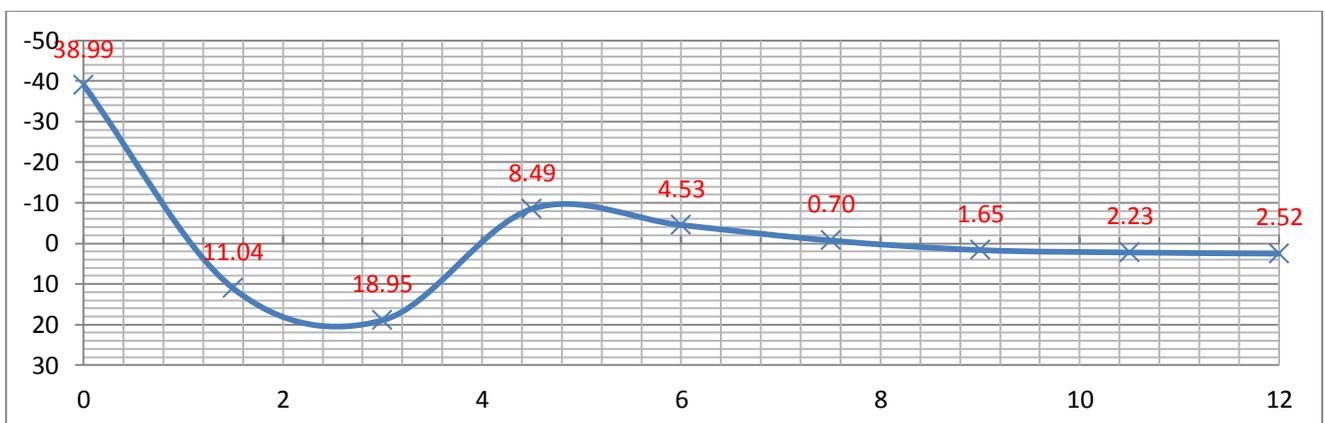


Figura 3.86 – M_y Sección A

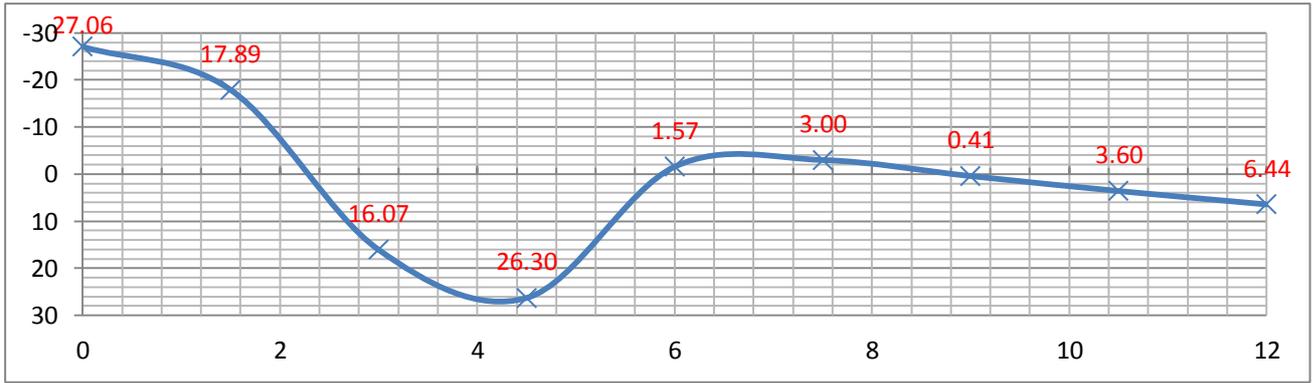


Figura 3.87 – My Sección B

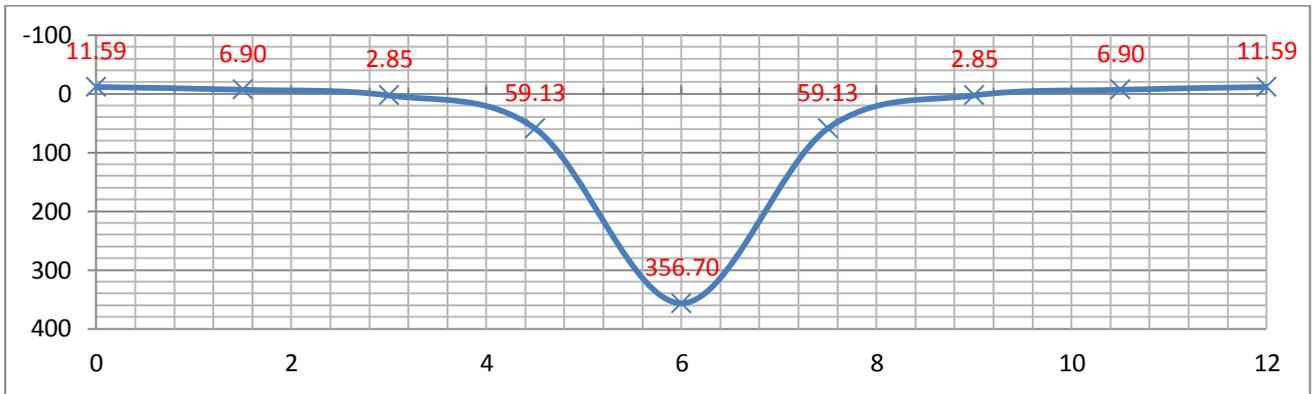


Figura 3.88 – My Sección C

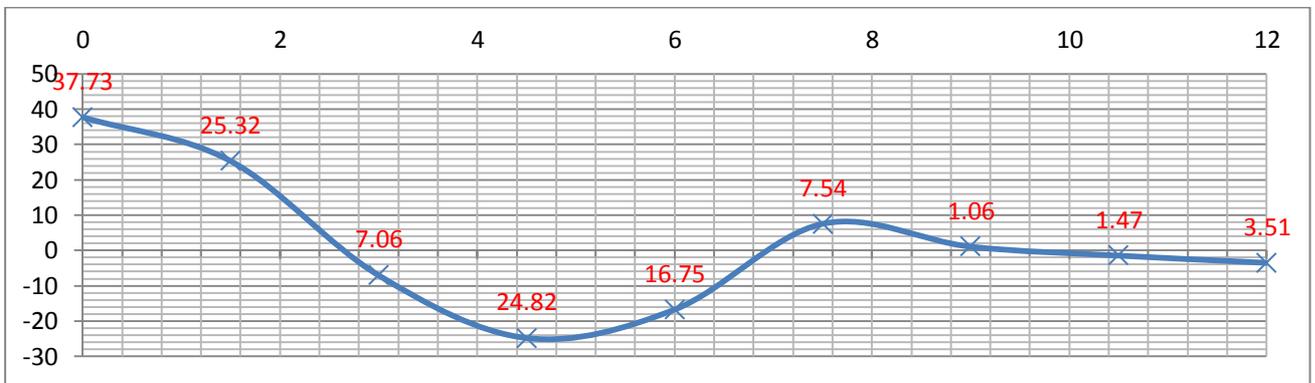


Figura 3.89 – My Sección D

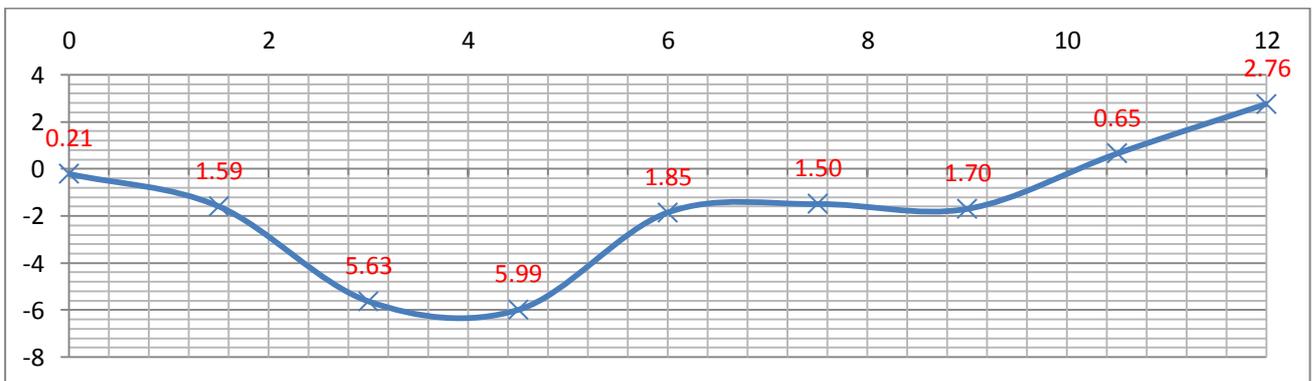


Figura 3.90 – My Sección E

- Esfuerzos axiales:

Los esfuerzos axiales, N_y , están expresados en kN/m. Se han obtenido en las secciones A, B, C y F de la Figura 3.81. Sigue la misma tendencia que anteriormente, obteniéndose los mayores valores cuando la carga está aplicada sobre el alma; sin embargo, la diferencia no es muy alta.

Los valores obtenidos son mucho mayores en este caso. Además, debido a la inclinación del alma, en este caso, en la losa superior es donde se concentran los esfuerzos, donde anteriormente eran prácticamente despreciables y más altos en la losa inferior.

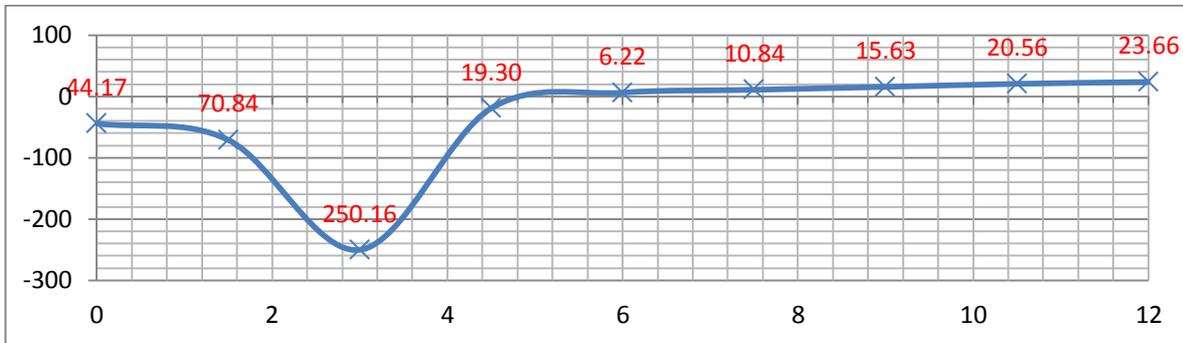


Figura 3.91 – N_y Sección A

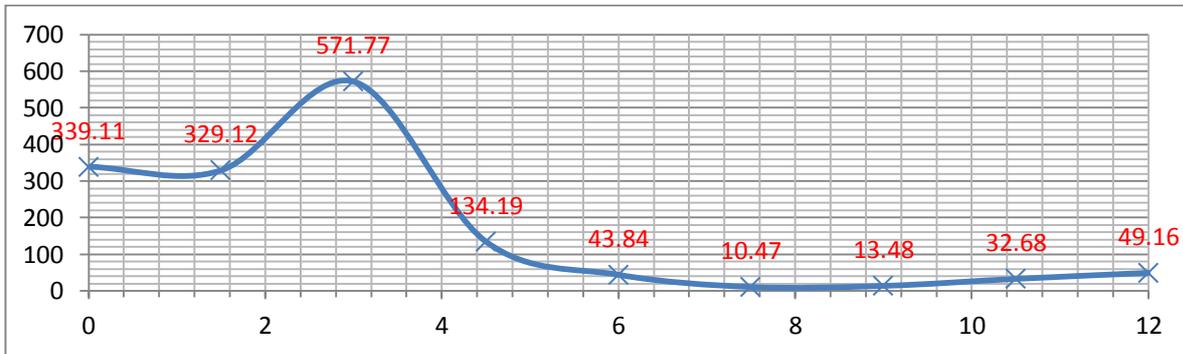


Figura 3.92 – N_y Sección B

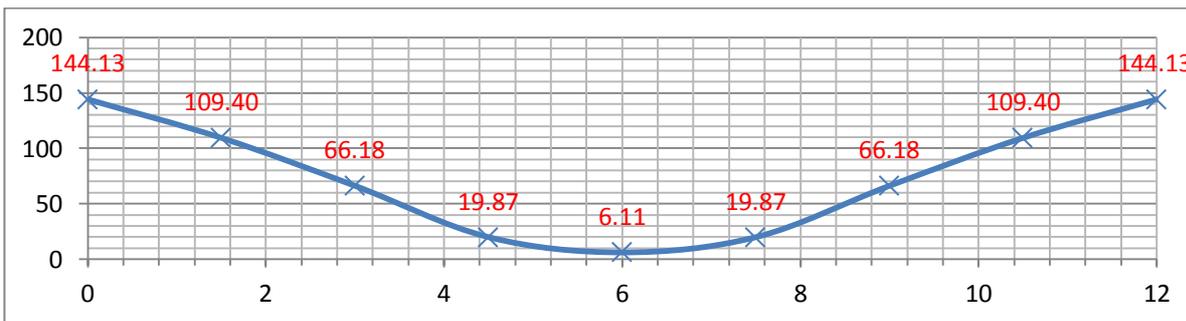


Figura 3.93 – N_y Sección C

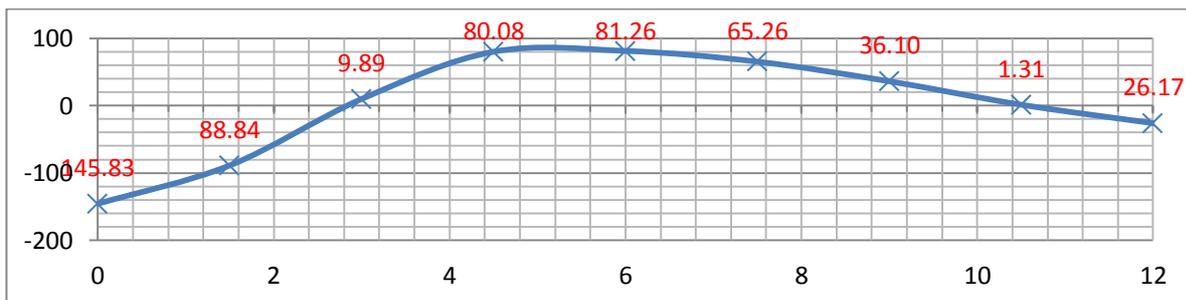


Figura 3.94 – N_y Sección F

3.2.2 Respuesta ante cargas distribuidas

Para el modelo básico 4, se colocan las mismas cargas distribuidas estudiadas anteriormente, de 4 kN/m^2 a lo largo de todo el puente y en 6 metro a lo ancho de la losa superior tal y como aparece en la Figura 3.95.

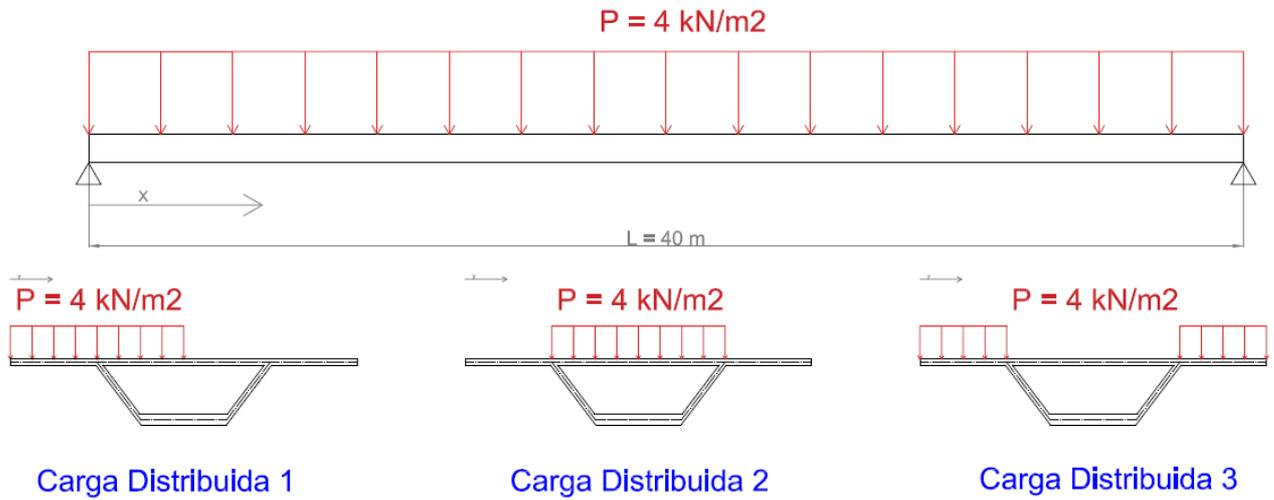


Figura 3.95 – Modelos de cargas distribuidas

3.2.2.1 Desplazamientos

Los desplazamientos más importantes se producen a través de la carga distribuida 1. Como se observa en las Figuras 3.96, 3.97 y 3.98, los desplazamientos son casi iguales a los que provocaba la carga puntual (si bien un poco menores pero repartidos más homogéneamente por la sección).

Respecto al modelo básico 1 con la misma carga distribuida 1, los desplazamientos producidos que se producen son prácticamente los mismos.

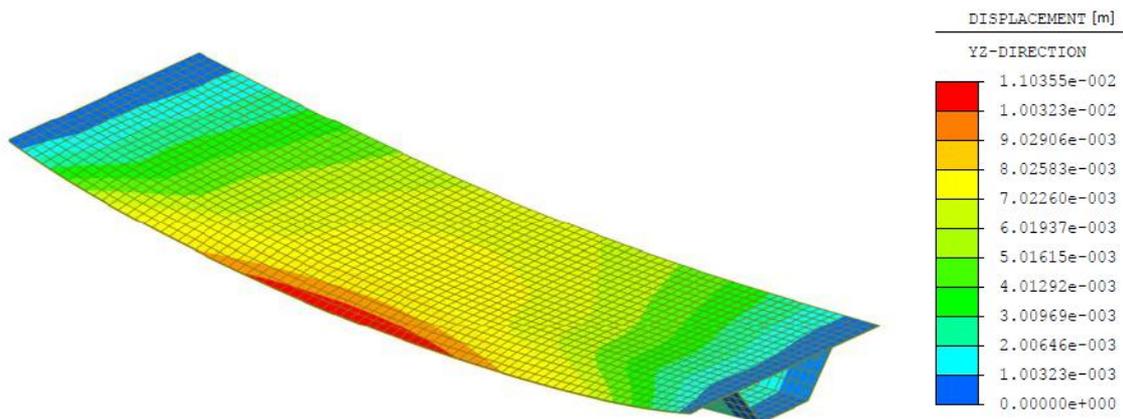


Figura 3.96 – Desplazamientos del modelo

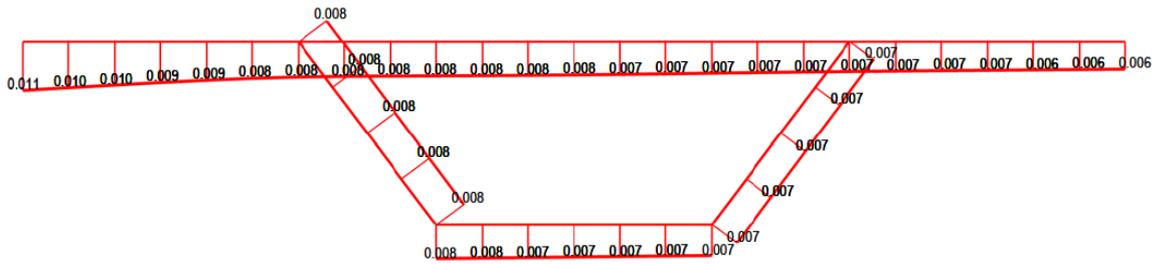


Figura 3.97 – Desplazamientos [m] para x = 20 m

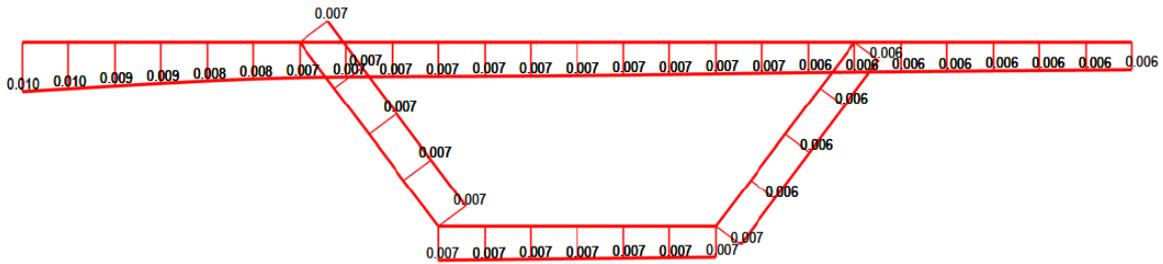


Figura 3.98 – Desplazamientos [m] para x = 15 m

En la Figura 3.99 aparece las flechas de los nodos 3 y 7 a lo largo de la luz que comparándolos con los alcanzados cuando actúa la carga puntual en dichos nodos el desplazamiento, es casi la mitad más bajos. Por otra parte, si lo comparamos con las flechas del modelo básico 1 para el mismo caso de carga distribuida, los valores obtenidos son prácticamente iguales.

Podemos concluir como primera aproximación, que la influencia de la inclinación de las almas apenas afecta en los desplazamientos que se producen. Dicha afirmación se desarrollará en el Capítulo 4 corroborándolo.

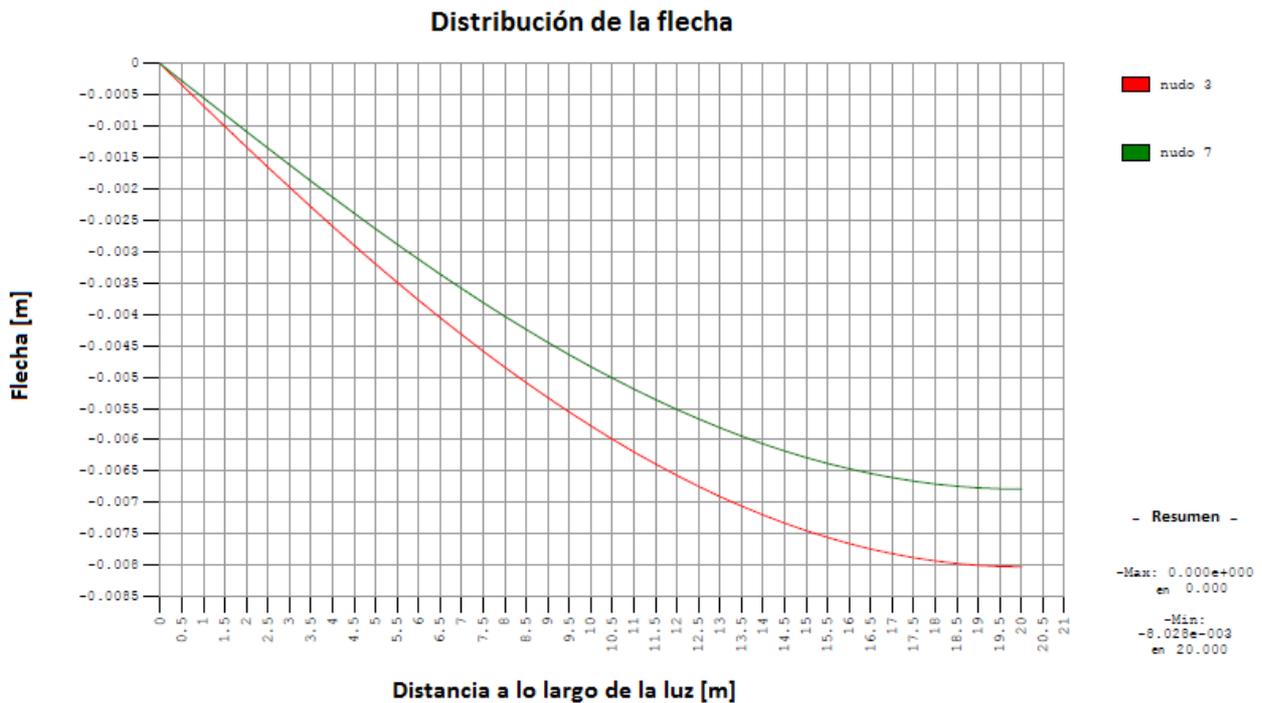


Figura 3.99 – Distribución de las flechas a lo largo de la luz en los nodos 3 y 7

3.2.2.2 Distorsión

Bajo las cargas distribuidas propuestas, la carga distribuida 1 es la única que tiene distorsión notable ya que el resto son simétricas. Los valores obtenidos son los siguientes:

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.004785	0.000084	0.006494	0.000113	0.005367	0.000094	0.003493	0.000061	0.000176
10	0.008448	0.000147	0.010466	0.000183	0.009024	0.000157	0.006490	0.000113	0.000300
15	0.010799	0.000188	0.012567	0.000219	0.011144	0.000194	0.008448	0.000147	0.000375
16	0.011079	0.000193	0.012796	0.000223	0.011392	0.000199	0.008691	0.000152	0.000384
17	0.011290	0.000197	0.012987	0.000227	0.011593	0.000202	0.008869	0.000155	0.000390
18	0.011455	0.000200	0.013121	0.000229	0.011726	0.000205	0.009002	0.000157	0.000395
19	0.011569	0.000202	0.013197	0.000230	0.011812	0.000206	0.009066	0.000158	0.000398
20	0.011569	0.000202	0.013235	0.000231	0.011841	0.000207	0.009117	0.000159	0.000399

Tabla 3.11 – Ángulos y distorsión del modelo 4 con carga distribuida 1 a lo largo de la luz

Distancia desde el apoyo: Dirección X	Distorsión
0	0.00000000
5	0.00017574
10	0.00030044
15	0.00037488
16	0.00038360
17	0.00039042
18	0.00039535
19	0.00039833
20	0.00039935

Tabla 3.12 – Distorsión modelo 4 con carga distribuida 1



Figura 3.100 – Distribución de la distorsión bajo la carga distribuida 1

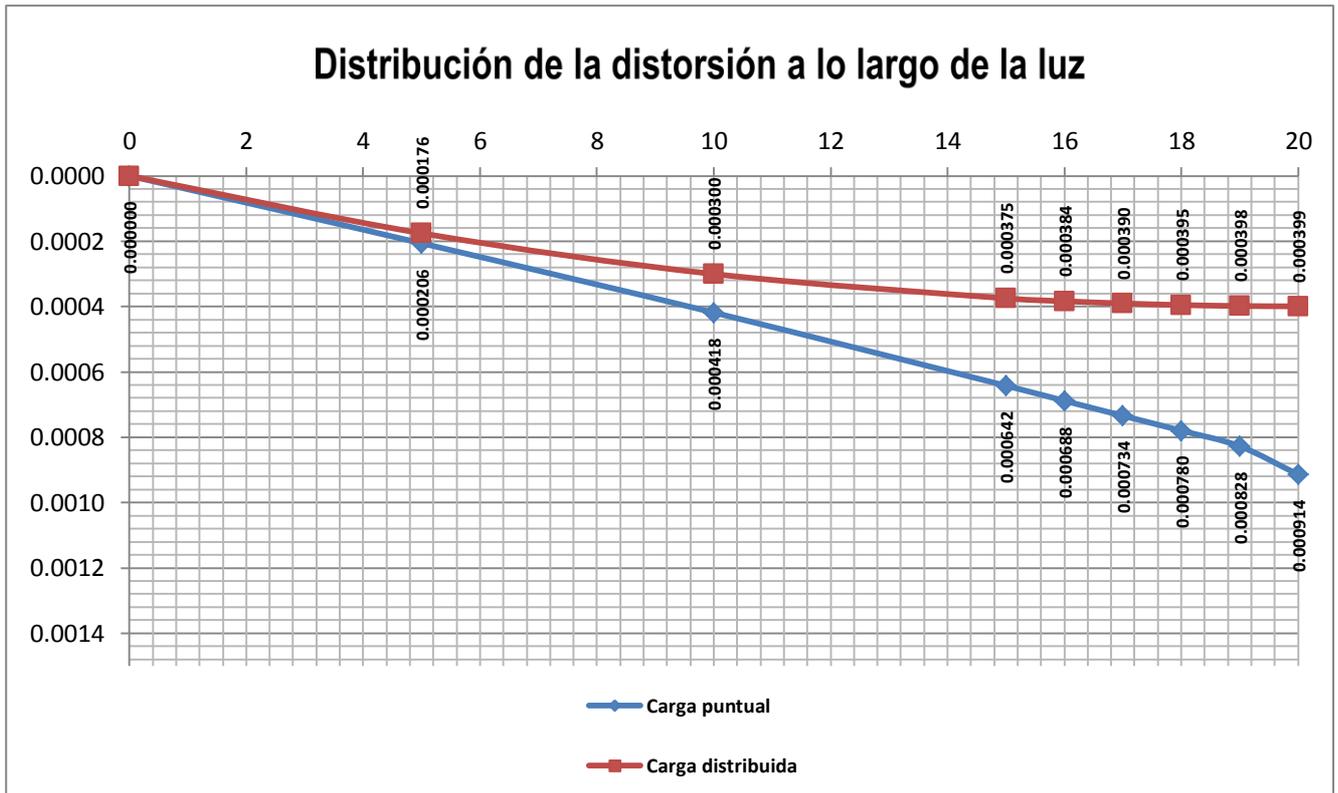


Figura 3.101 – Comparativa de cargas

Del mismo modo que ocurría en el modelo 1, la carga distribuida produce una distorsión del orden de un tercio respecto a la carga puntual. Comparando la distorsión de los dos modelos ante las cargas distribuidas, se deduce que los valores son similares (ligeramente menor cuando la almas están inclinadas; por ejemplo en la sección central, la carga distribuida en el modelo 1 provocaba una distorsión de 0.000414 radianes mientras que en el modelo 4, provocaba una distorsión de 0.000399 radianes).

3.2.2.3 Tensiones

3.2.2.3.1. Tensiones longitudinales

Cuando se someten a las cargas a las cargas distribuidas 1, 2 y 3, la sección central del modelo presenta las siguientes distribuciones de tensiones longitudinales representadas en las Figuras 3.102, 3.103 y 3.104 respectivamente.

Los resultados obtenidos son similares al caso de la viga cajón con almas rectas, presentan la misma forma de los diagramas y los valores son prácticamente iguales.

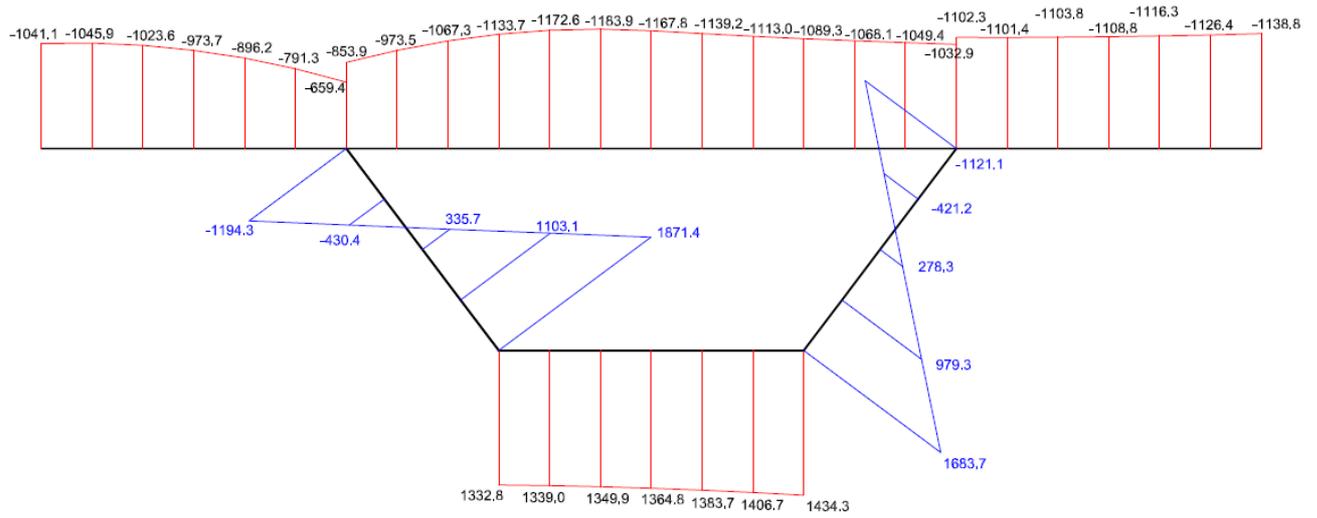


Figura 3.102 – Distribución de σ_{xx} (kN/m^2) para Carga Dist. 1 en el centro de la luz ($x = 20 \text{ m}$)

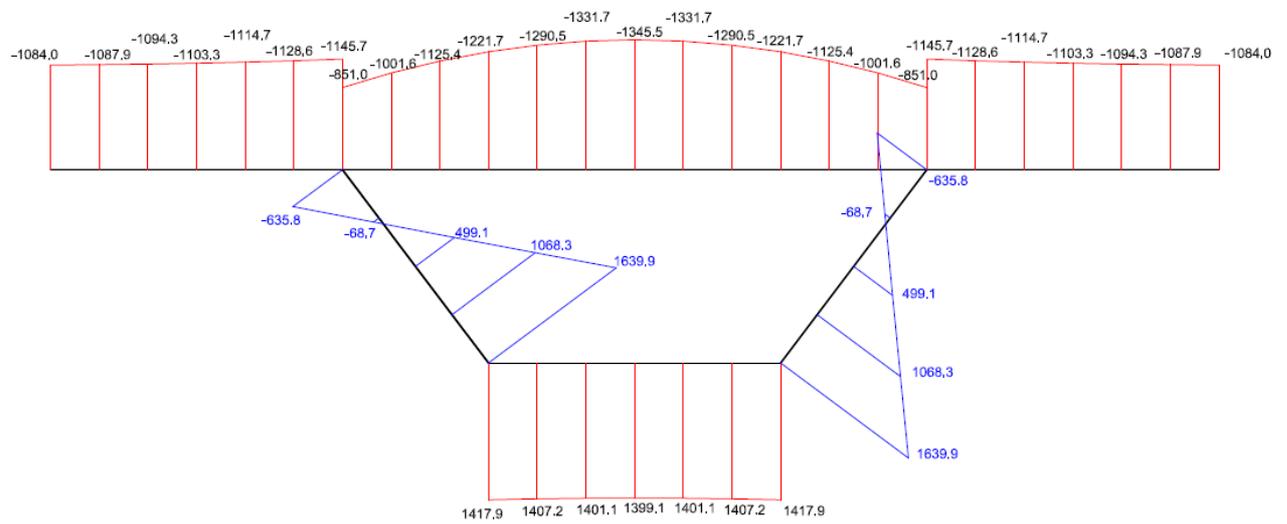


Figura 3.103 – Distribución de σ_{xx} (kN/m^2) para Carga Dist. 2 en el centro de la luz ($x = 20 \text{ m}$)

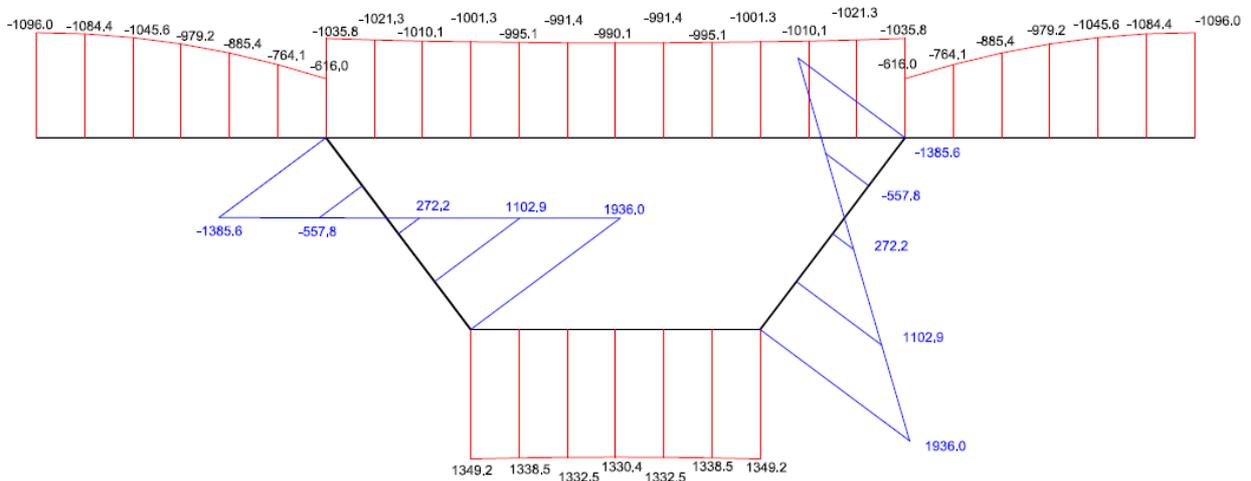


Figura 3.104 – Distribución de σ_{xx} (kN/m^2) para Carga Dist. 3 en el centro de la luz ($x = 20 \text{ m}$)

3.2.2.3.2. Tensiones tangenciales

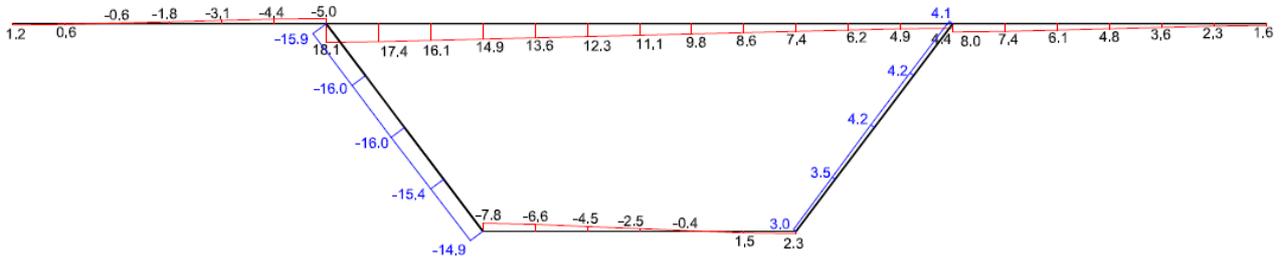


Figura 3.105 – Distribución de τ_{xy} (kN/m^2) para Carga Dist. 1 en la sección $x = 19.5$ m

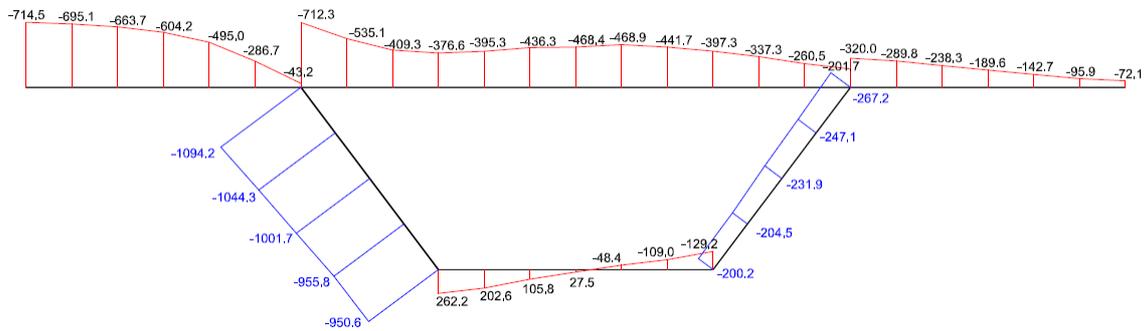


Figura 3.106 – Distribución de τ_{xy} (kN/m^2) para Carga Dist. 1 en la sección $x = 0$ m

De la misma manera que anteriormente, al no haber cargas puntuales, no necesita una redistribución de tensiones, lo que provoca que los valores obtenidos de la sección de 19.5 m sean significativamente menores que los que obtendríamos bajo cargas puntuales ya que la distribución de los esfuerzos cortantes se produce el máximo en la sección de los extremos, cuyos valores son los expresados en la Figura 3.106 (cuyos máximos son similares, aunque un poco menores que los máximos de la carga puntual).

Por otra parte, los valores obtenidos de dicha sección en el modelo 1 y este modelo 4, son prácticamente iguales.

3.2.2.4 Esfuerzos

3.2.2.4.1. Momentos flectores transversales

La distribución de los momentos flectores transversales, M_y , para las tres cargas distribuidas en la sección más desfavorable (la sección central) y a cinco metros de la carga, es decir, en la sección $x = 15$ m, se representan en las siguientes Figuras.

Como puede observarse la ley de momentos es más uniforme y homogénea debido a la carga distribuida, asemejándose a los valores que proponen la teoría de Resistencia de Materiales.

Respecto a la carga puntual presentan valores muy bajos, donde los máximos valores se concentran en la losa inferior. Comparando la distribución respecto al modelo de almas rectas con las mismas cargas distribuidas, observamos que anteriormente las alas absorbían mayor momento y en este modelo es despreciable, siendo la losa inferior quien se encarga de absorber la mayor parte del momento flector de toda la sección.

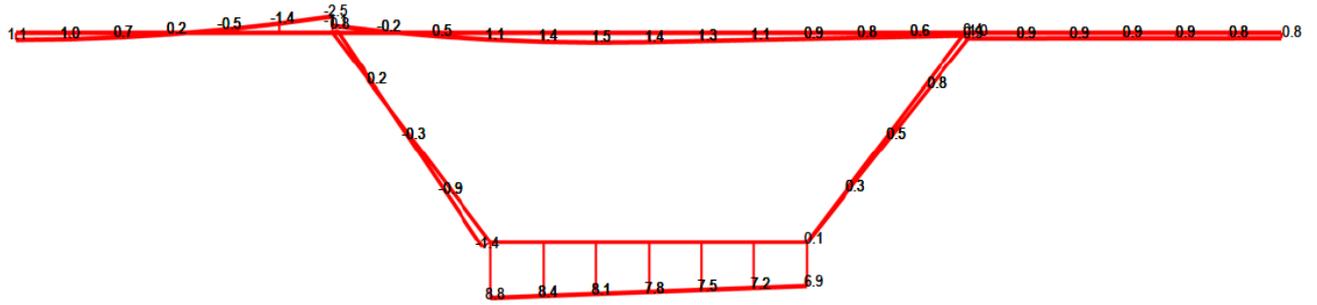


Figura 3.107 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 1



Figura 3.108 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 1

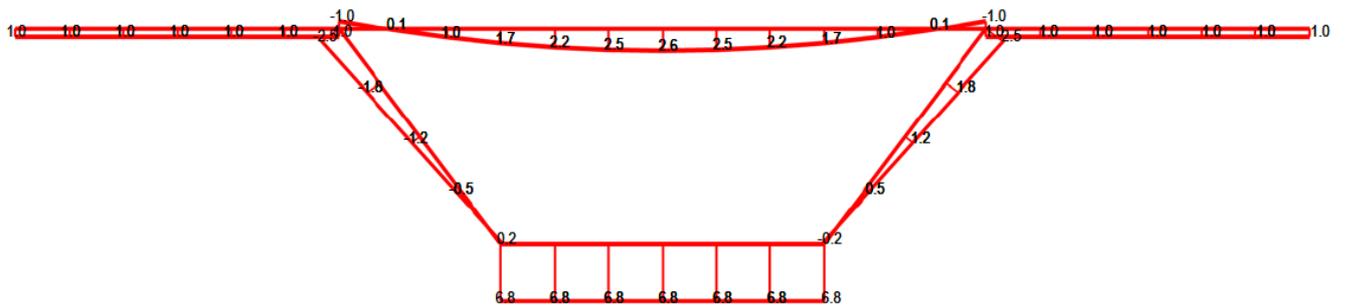


Figura 3.109 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 2

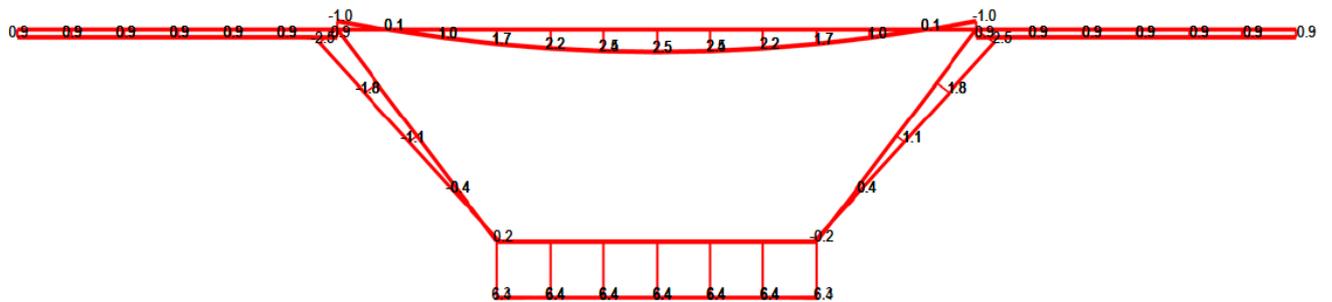


Figura 3.110 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 2

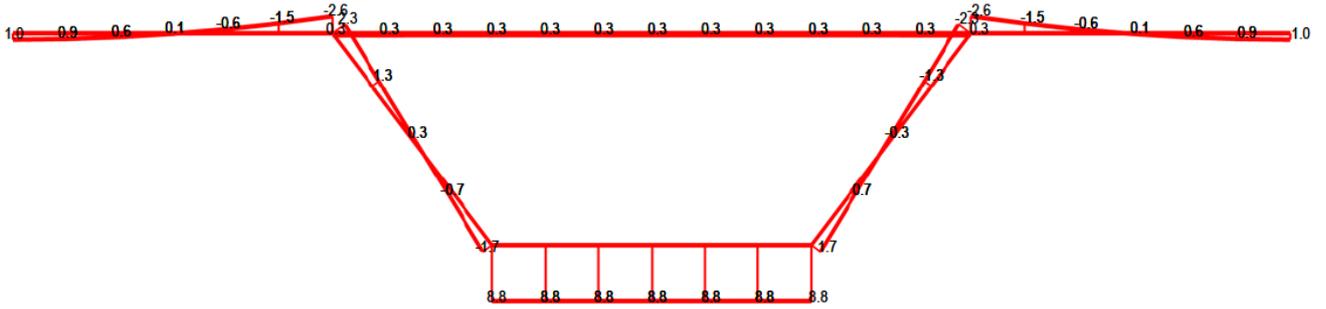


Figura 3.111 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección central para la C. Dist. 3

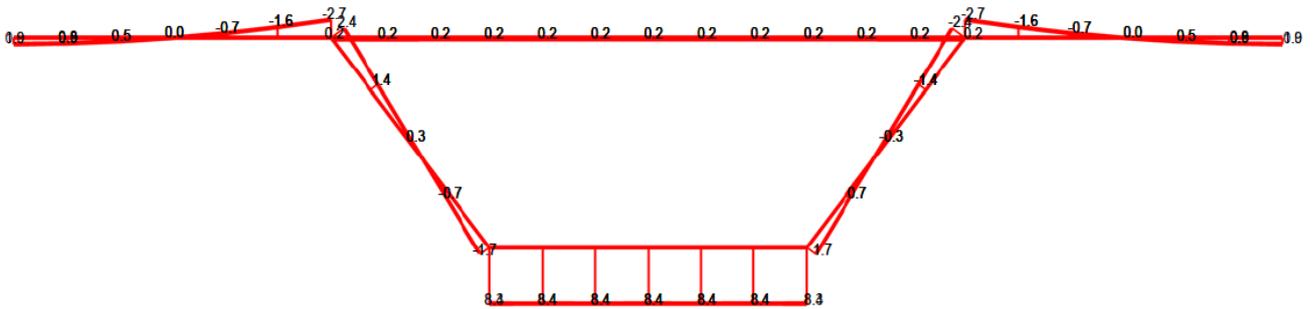


Figura 3.112 – Momento flector M_y (kN·m/m) en la sección $x = 15$ para la C. Dist. 3

Para las 3 cargas, se muestra la distribución a lo largo de la luz de los momentos flectores en los nodos 3, 7, 10 y 12 de la sección. Presentan formas suaves y homogéneas, además de bajos valores.

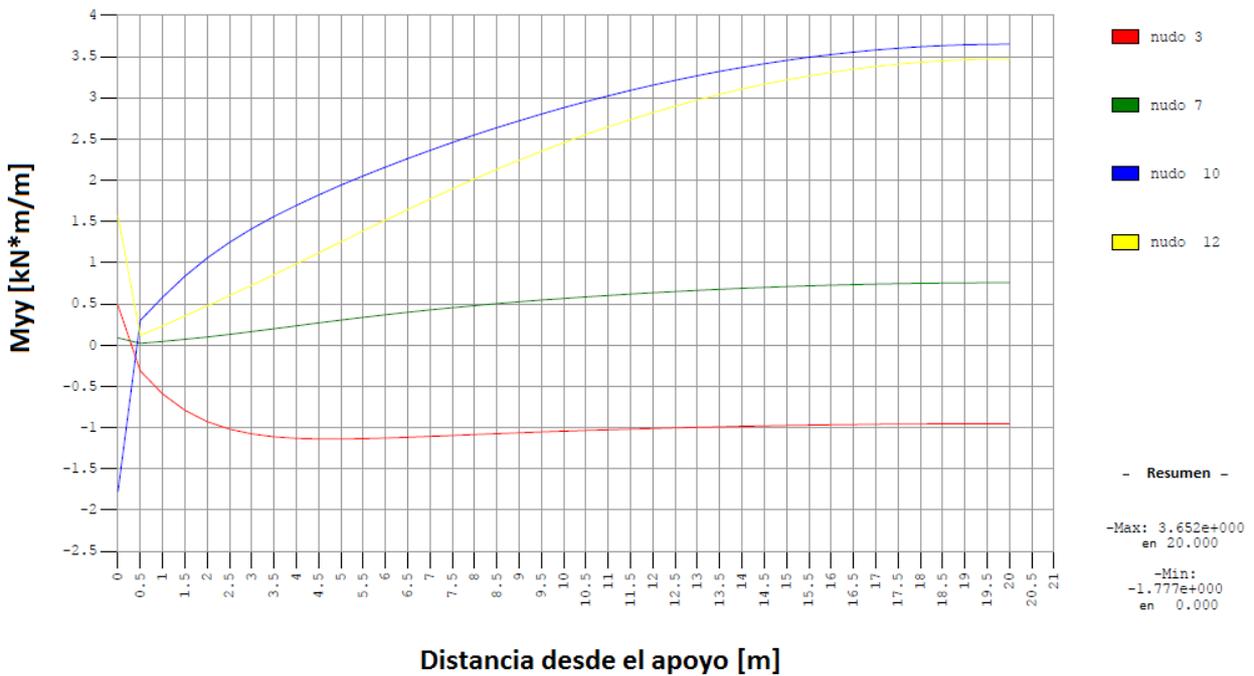


Figura 3.113 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 1

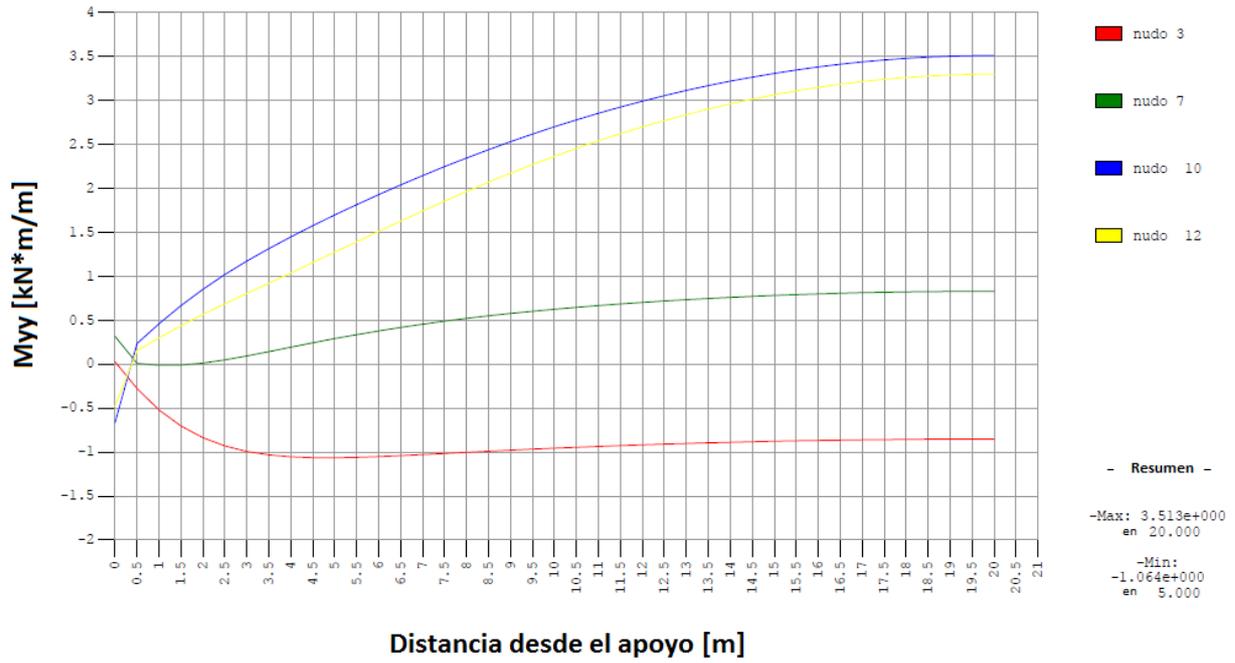


Figura 3.114 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 2

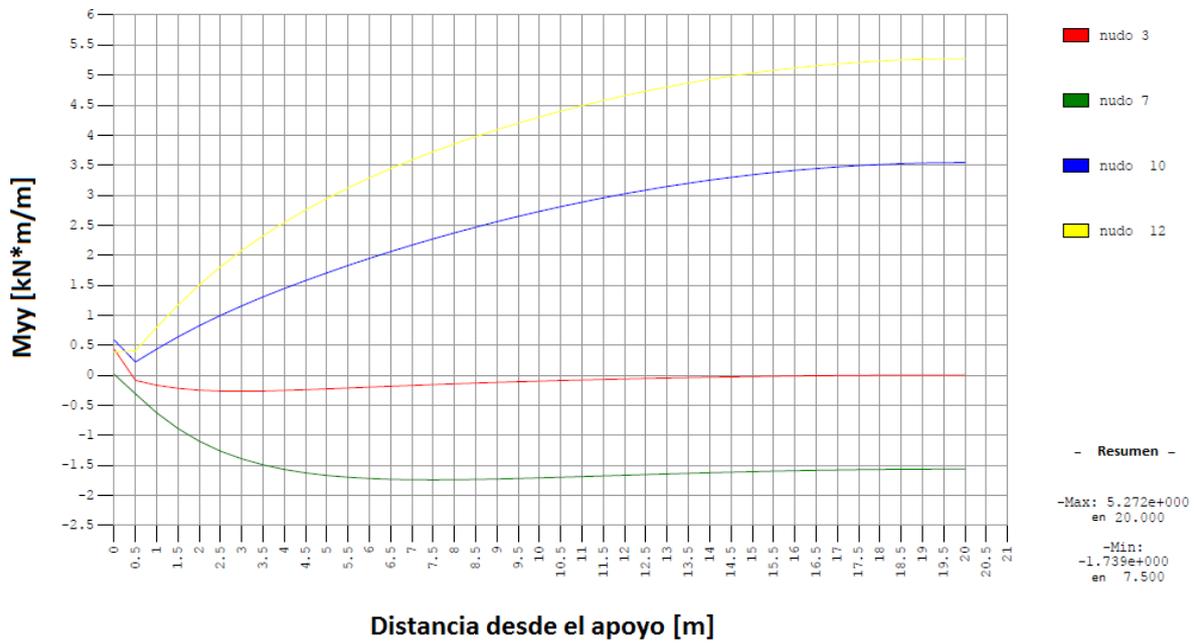


Figura 3.115 – Distribución del Momento flector M_y (kN·m/m) para la C. Dist. 3

3.2.2.4.2. Esfuerzos cortantes

En la Figura 3.116, aparece la sección $x = 0$ m, sección en el apoyo, donde se presenta el esfuerzo cortante máximo dada la configuración de las cargas distribuidas. Está representada para la carga distribuida 1 donde los valores son máximos respecto al resto de cargas.

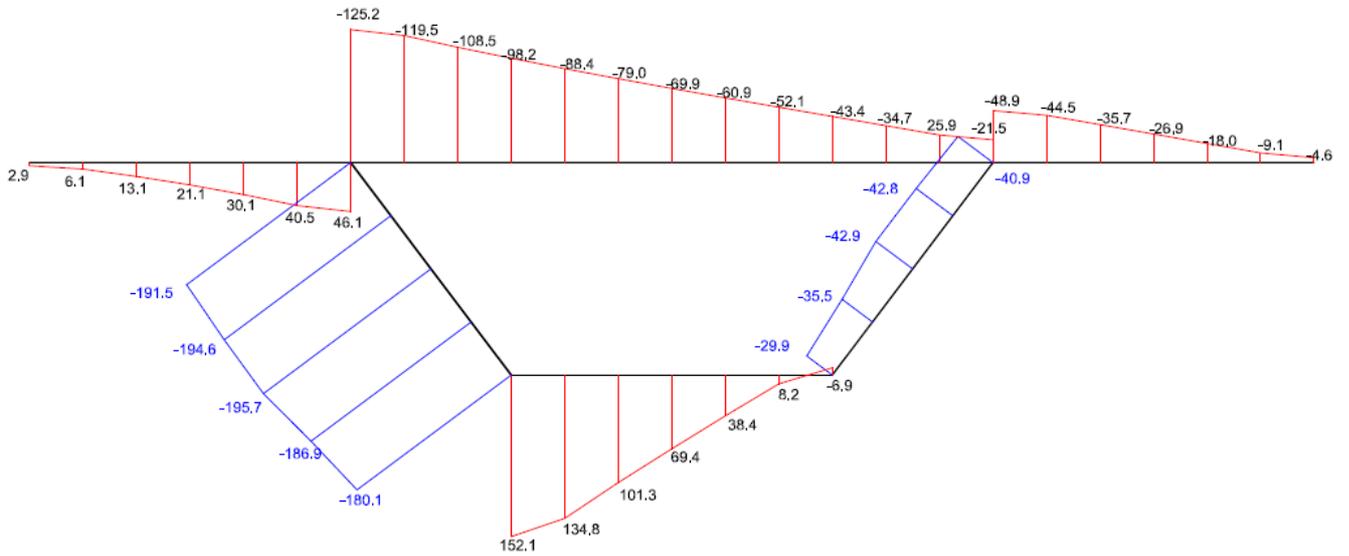


Figura 3.116 – Distribución del Cortante N_{xy} en la sección del apoyo ($x = 0$ m) para la C. Dist. 1

4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Una vez planteado en el Capítulo 3, el comportamiento de la viga cajón para los casos anteriores (una viga de sección en cajón con las almas rectas y otra viga de sección en cajón con las almas inclinadas) hemos podido determinar unas primeras diferencias entre la inclinación o no de las alas, y cuál es el comportamiento que tienen para las diferentes cargas pudiendo comparar los diferentes modelos y situaciones de cargas como primera aproximación.

Procedemos en este Capítulo 4 al análisis de sensibilidad para los diferentes modelos pudiendo obtener la influencia que tiene la inclinación de las almas en vigas tipo cajón en los parámetros más determinantes de puentes (desplazamientos, distorsión, tensiones y esfuerzos).

Para ello, se ha realizado un preámbulo definiendo el alcance y criterios del análisis, posteriormente se ha realizado el mismo y por último se ha resumido los resultados obtenidos.

4.1 Definición del análisis

El objetivo principal del análisis es la influencia que tiene la inclinación de las almas en los parámetros de la sección, cuyo alcance será tal que permita la establecer claramente la relación que tiene, para ello se comparará diferentes modelos observando los resultados que se obtienen.

Para la realización del análisis de sensibilidad se han tomado los siguientes criterios:

- Se ha tomado los 5 modelos básicos, detallados en el Capítulo 2, cuyas geometrías vienen definidas en la Figura 2.1 y sus características mecánicas en el apartado 2.2, siendo modelos afines y con una inclinación progresiva del alma (desde los 0° hasta los 45° , siendo 0° , el alma vertical).
- Se ha tomado la Carga 3 de la Figura 2.2, como carga principal ante dicho análisis. La carga mencionada es una carga puntual de 1000 kN colocada en la sección central del puente, en la losa superior justo arriba de uno de sus almas.

Justificación de la carga: Se ha seleccionado dicha carga debido a que representa con mayor detalle las fluctuaciones que se producen entre los modelos obteniendo las diferencias más claras entre los modelos y la influencia o no de la carga.

De cualquier forma, también se realizará un tanteo para los otros tipos de cargas para corroborar que los resultados obtenidos para la carga anterior son correctos y representativos para cualquier tipo de carga.

4.2 Desplazamientos

A priori, según los resultados obtenidos previamente, los desplazamientos que se obtienen no tienen gran influencia si las almas de las secciones tipo cajón de puentes tienen mayor o menor inclinación. Para corroborarlo, veamos que desplazamientos tienen en los 5 modelos.

En primer lugar, observaremos los desplazamientos de cada modelo a nivel global del puente. Después observaremos los desplazamientos en toda la sección más desfavorable (que en este caso es la sección central al estar sobre ella la carga puntual escogida) y por último, nos centraremos en el desplazamiento que tiene a lo largo de todo el puente los nodos 3 y 7 de los modelos. Los valores obtenidos están representados en metros (m).

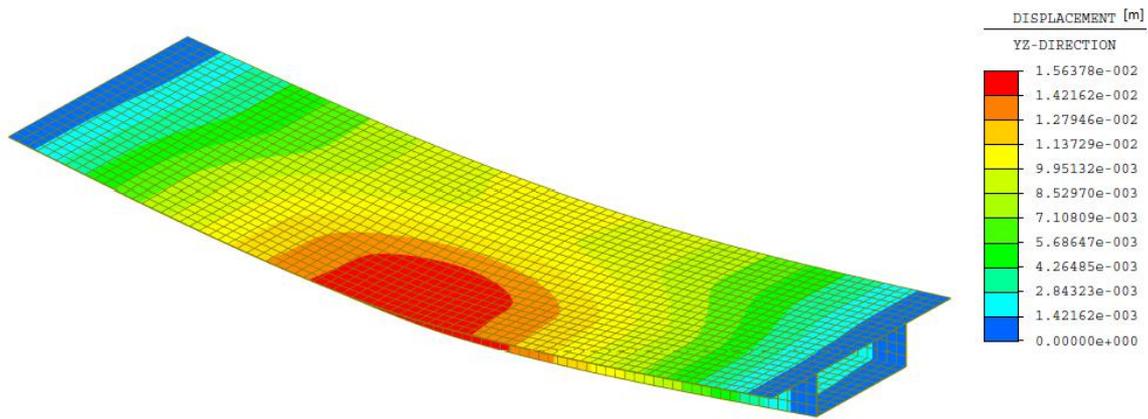


Figura 4.1 – Desplazamientos globales. Modelo 1

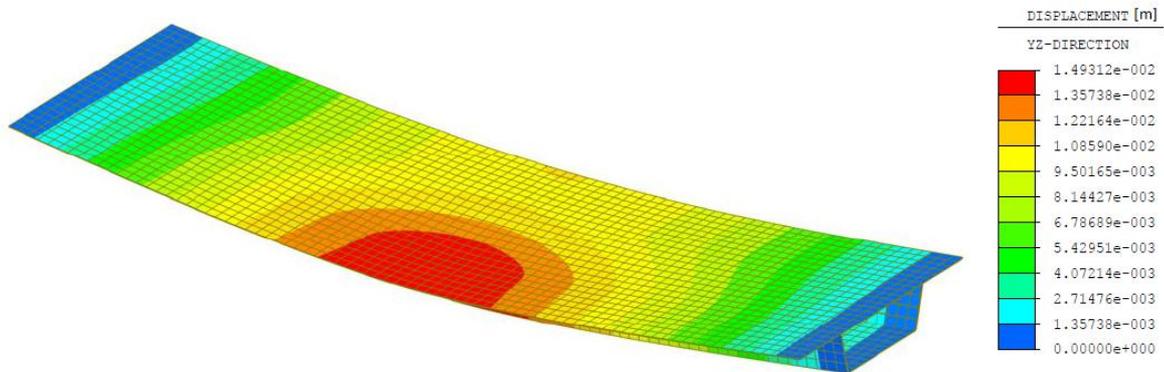


Figura 4.2 – Desplazamientos globales. Modelo 2

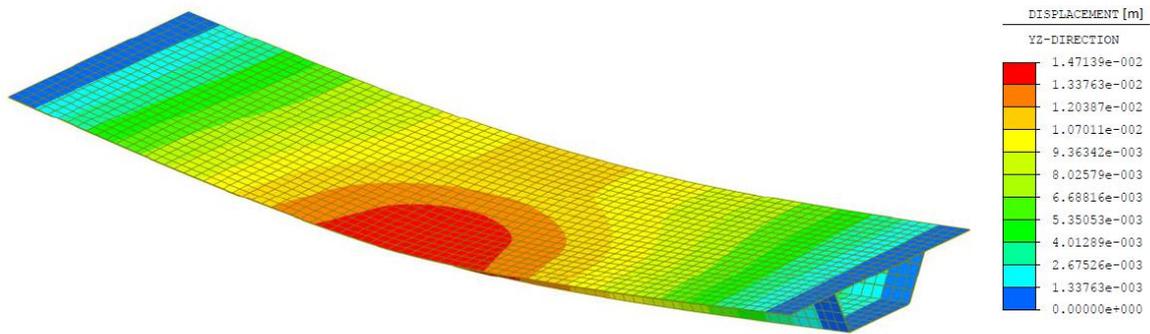


Figura 4.3 – Desplazamientos globales. Modelo 3

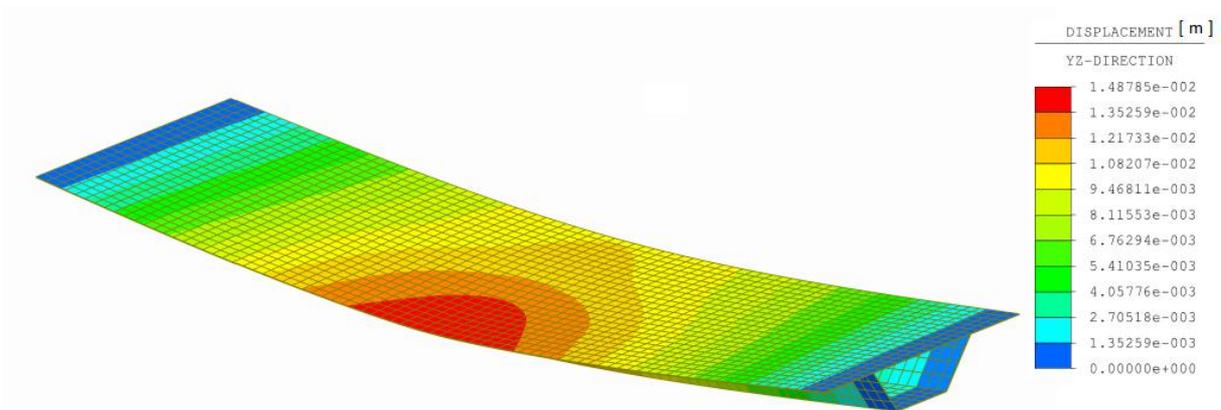


Figura 4.4 – Desplazamientos globales. Modelo 4

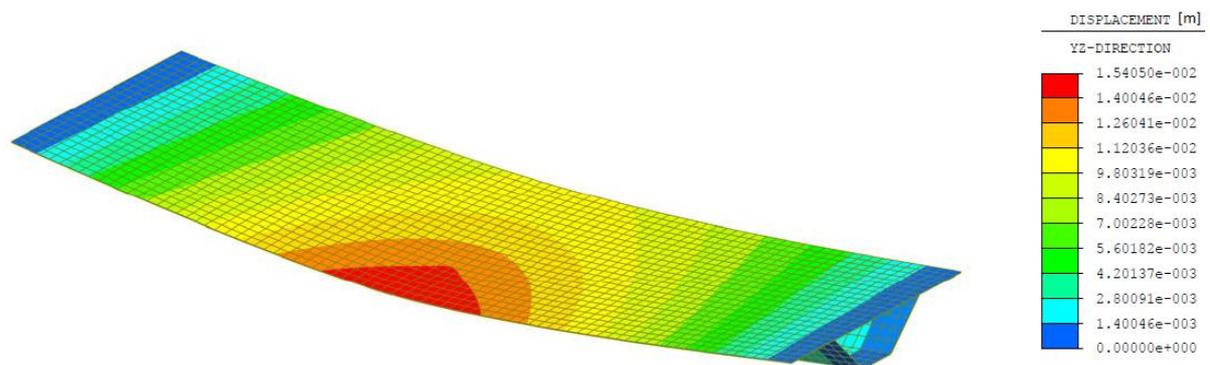
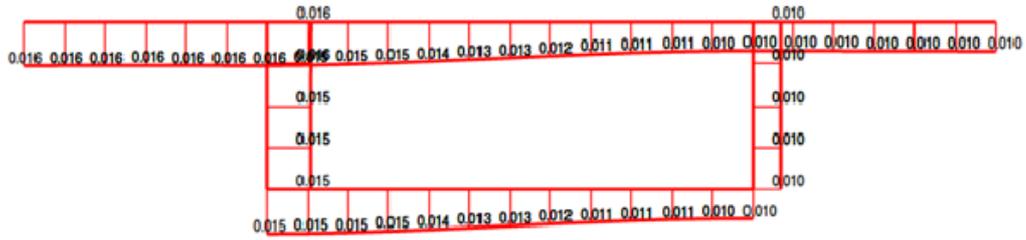
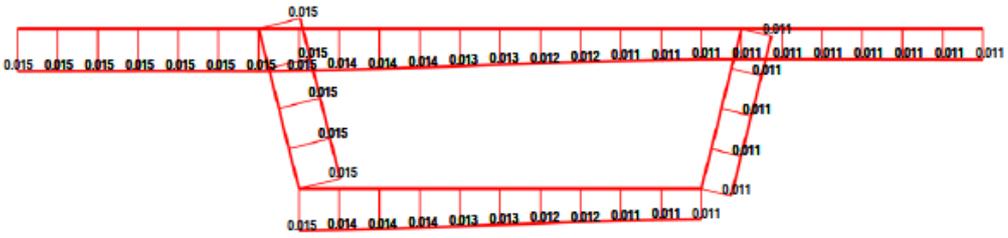


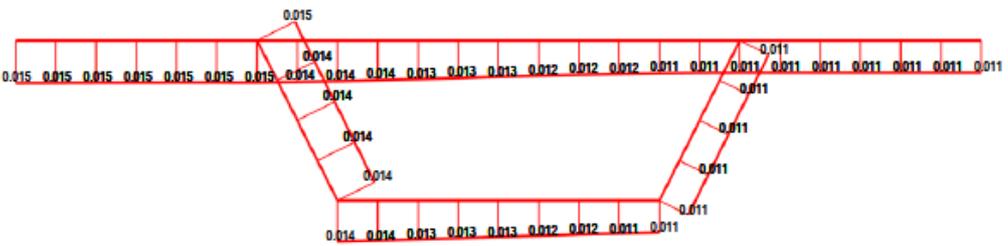
Figura 4.5 – Desplazamientos globales. Modelo 5



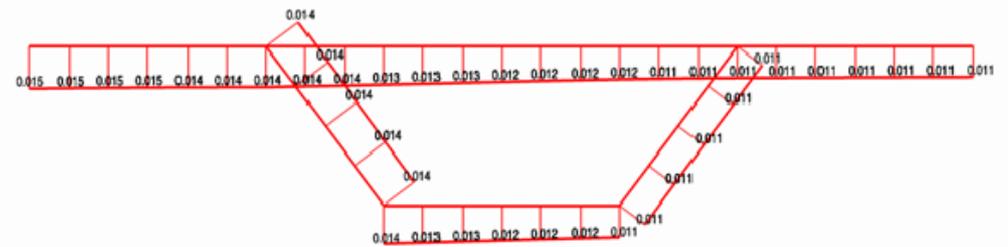
Modelo 1



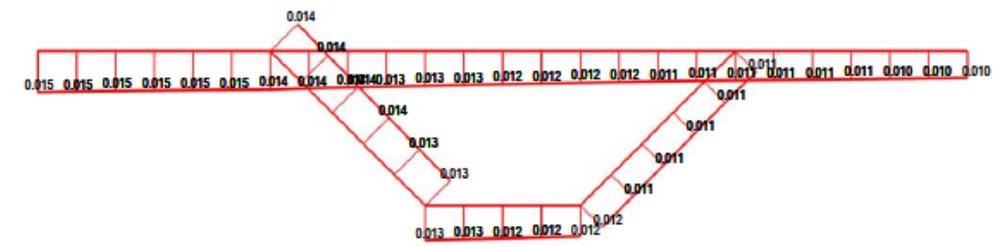
Modelo 2



Modelo 3



Modelo 4



Modelo 5

Figura 4.6 – Desplazamientos [m] para la sección central

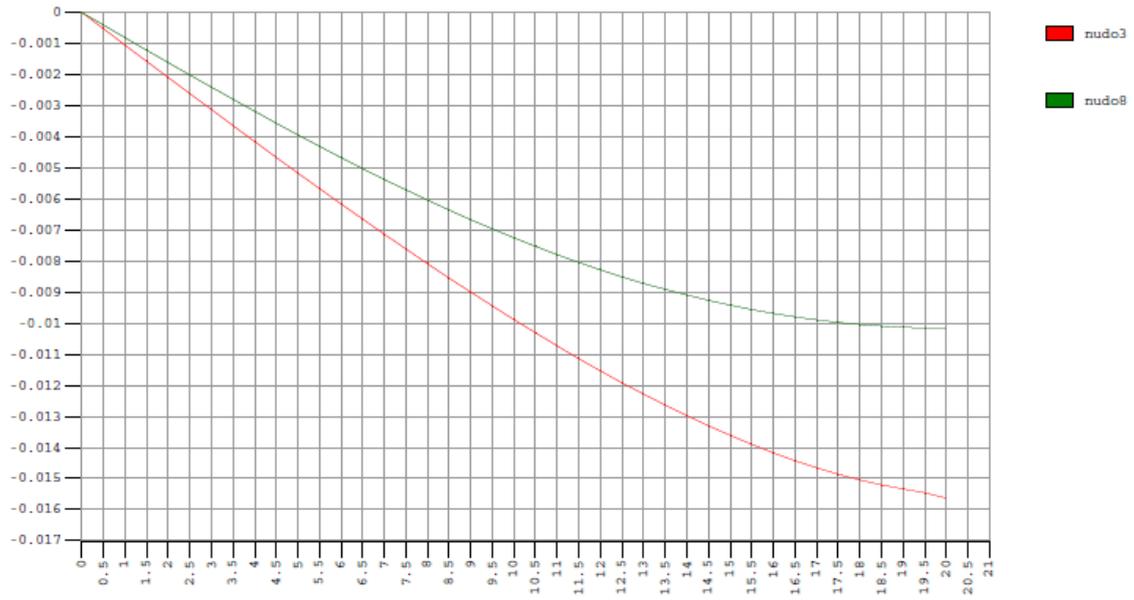


Figura 4.7 – Flechas del Modelo 1

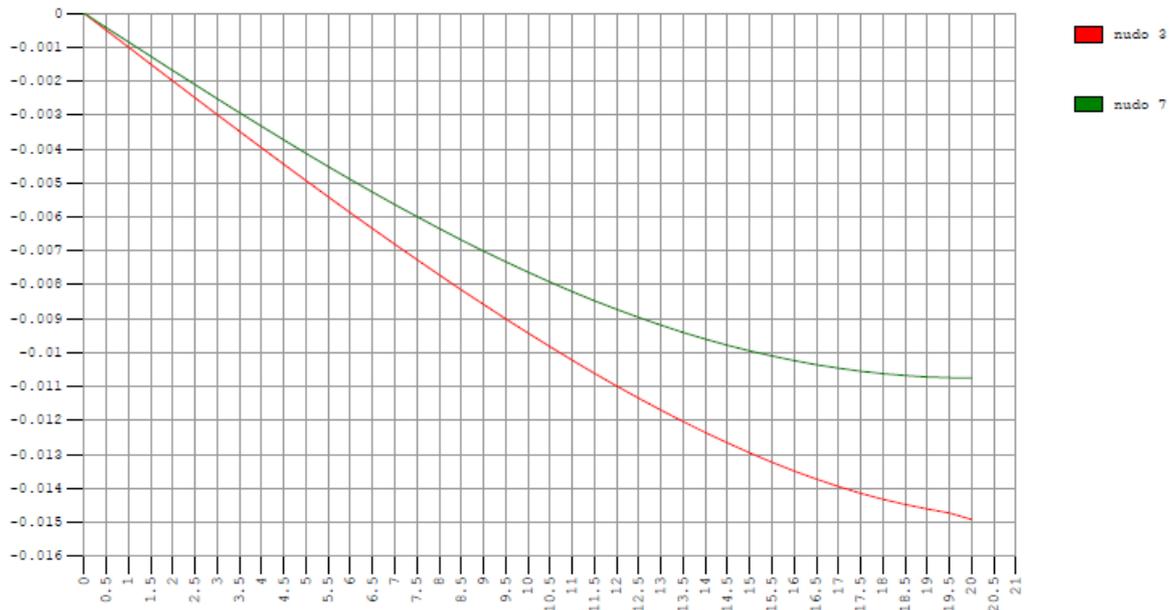


Figura 4.8 – Flechas del Modelo 2

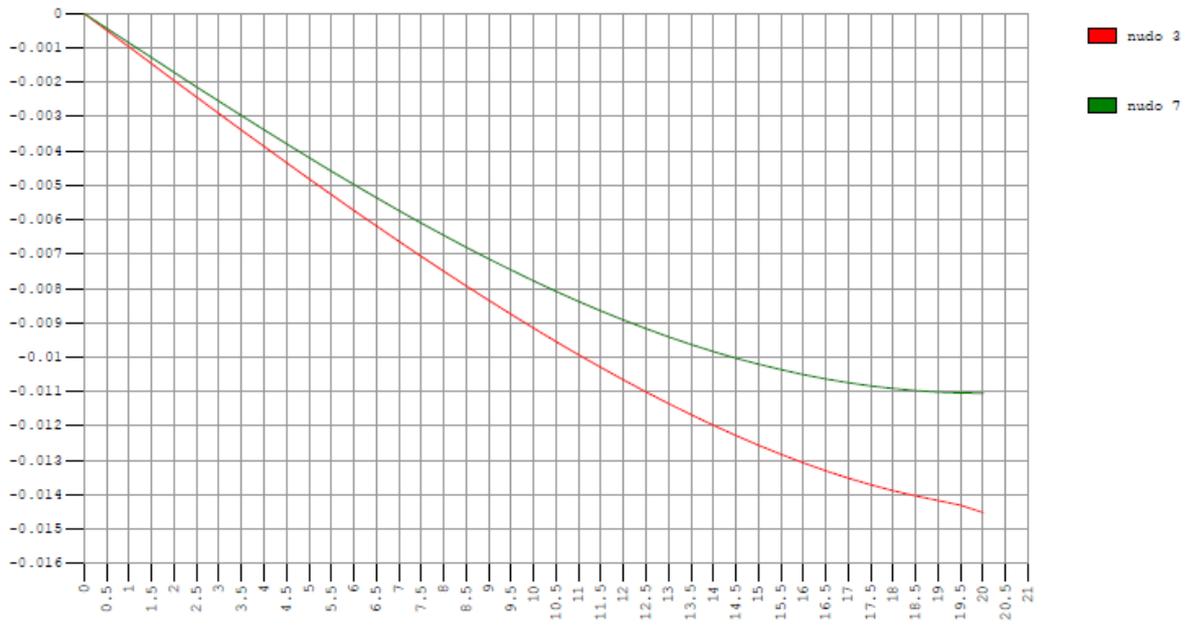


Figura 4.9 – Flechas del Modelo 3

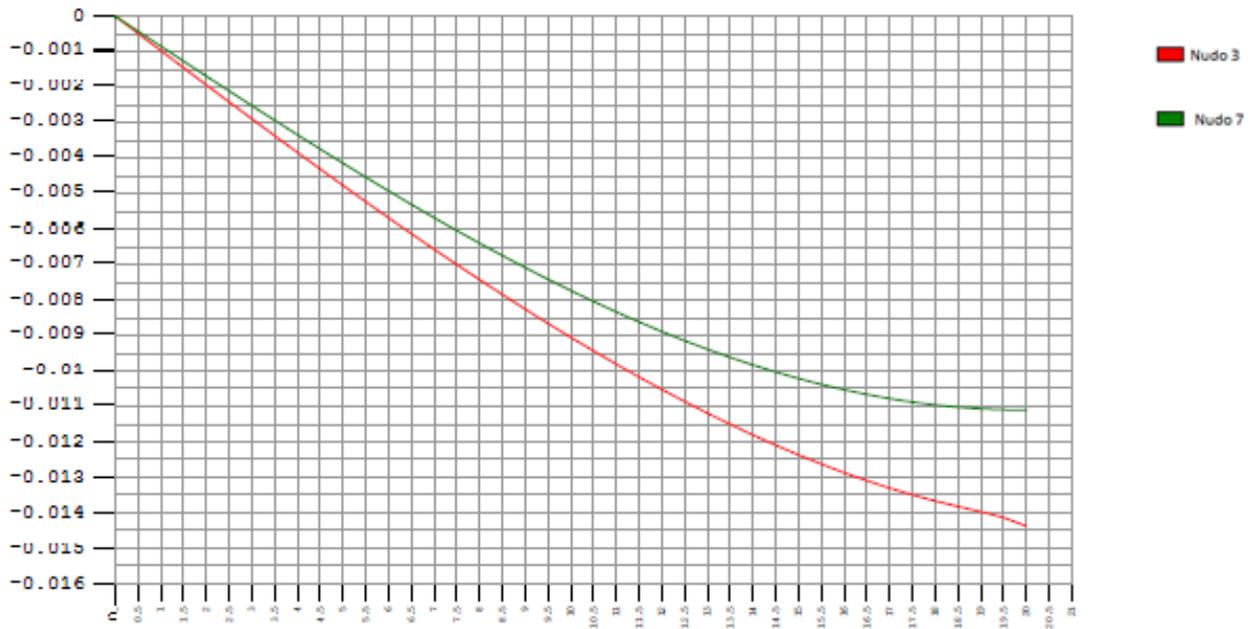


Figura 4.10 – Flechas del Modelo 4

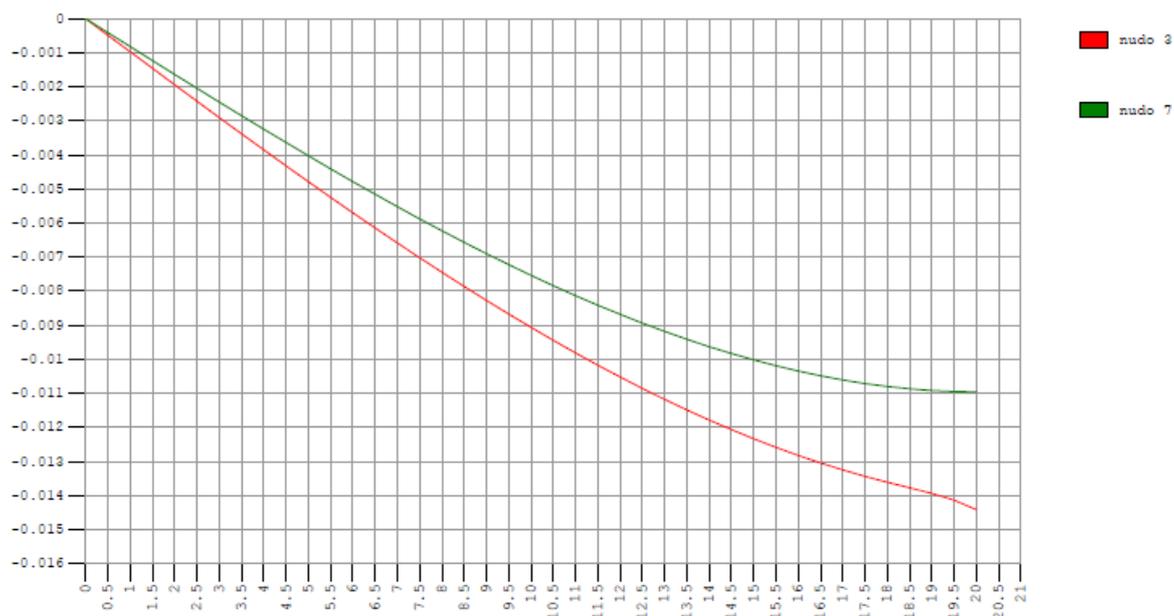


Figura 4.11 – Flechas del Modelo 5

En vista de los resultados obtenidos podemos concluir que los resultados obtenidos son prácticamente iguales tanto en distribución, forma y valores en los cinco casos estudiados. Esto no significa que la influencia de la inclinación de las almas sea nula, al contrario, pues según sus características mecánicas se deduce:

- Los desplazamientos verticales (descenso vertical; flechas) son similares y sus valores vienen determinados por la carga, condiciones de contorno... y la inercia a flexión, donde todos los modelos tienen la misma inercia a flexión aproximadamente. Por lo tanto, los desplazamientos verticales y la inclinación de las almas no tienen relación.
- Los desplazamientos transversales se deben al efecto de la excentricidad de la carga, causando el giro torsional y dichos desplazamientos. Del mismo modo, los cinco modelos estudiados presentan valores similares (donde la mayoría son prácticamente nulos) y vienen determinados entre otros parámetros, por la inercia a torsión de la sección.

De tal forma, los 5 modelos presentan inercias a torsión diferentes, desde 7.433 m^4 en el modelo 1, hasta reducirse progresivamente hasta 4.568 m^4 en el caso del modelo 5, observándose la tendencia que tiene dicha inclinación progresiva.

De hecho, a pesar de ir disminuyéndose la inercia a torsión de manera considerable en cada caso, los valores obtenidos son similares incluso menores, quedando establecida la importancia de inclinar las almas. Dicho efecto se aprecia perfectamente en la distorsión, donde además de observar la importancia de inclinar las almas, podemos cuantificar dicho efecto.

Nota: En el apartado 4.6.1, se profundiza en los resultados obtenidos verificando si las conclusiones obtenidas son ciertas.

4.3 Distorsión

La distorsión es uno de los parámetros donde la inclinación de las almas influye de manera determinante, como vimos en el Capítulo 3, donde la variación de uno respecto al otro, era de un tercio aproximadamente. La distorsión depende de la relación existente entre la luz del puente modelo y la anchura del cajón, las condiciones de contorno en los apoyos, la rigidez de la sección transversal y la carga existente. Dichos valores se han fijado, siendo la inclinación de las almas el único parámetro variable entre los modelos.

El estudio de sensibilidad para la distorsión consiste en la obtención de la distorsión para los 5 modelos básicos, donde posteriormente se compararán obteniendo cómo se desarrolla a medida de que progresa la inclinación bajo la misma carga puntual.

A continuación se muestran las tablas y figuras de los 5 modelos básicos por separado:

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.002206	0.000039	0.011746	0.000205	0.011726	0.000205	0.003667	0.000064	0.000256
10	0.006245	0.000109	0.025153	0.000439	0.025153	0.000439	0.009225	0.000161	0.000574
15	0.012204	0.000213	0.039955	0.000697	0.039992	0.000698	0.016644	0.000291	0.000949
16	0.013379	0.000234	0.042762	0.000746	0.042809	0.000747	0.018048	0.000315	0.001021
17	0.014467	0.000253	0.045369	0.000792	0.045425	0.000793	0.019280	0.000337	0.001087
18	0.015413	0.000269	0.047690	0.000832	0.047755	0.000833	0.020254	0.000354	0.001144
19	0.016215	0.000283	0.049504	0.000864	0.049694	0.000867	0.020884	0.000365	0.001189
20	0.016503	0.000288	0.050259	0.000877	0.052282	0.000912	0.021085	0.000368	0.001223

Tabla 4.1 – Distorsión y ángulos. Modelo 1

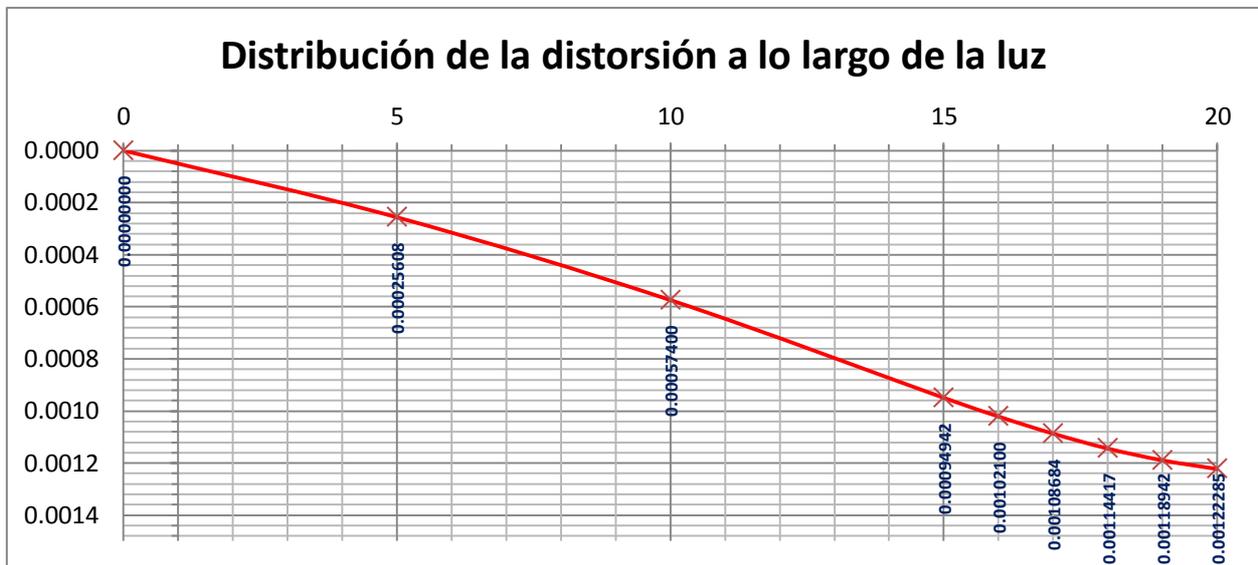


Figura 4.12 – Distorsión del modelo 1

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.001618	0.000028	0.009030	0.000158	0.007678	0.000134	0.000297	0.000005	0.000163
10	0.001092	0.000019	0.020604	0.000360	0.017122	0.000299	0.001611	0.000028	0.000353
15	0.002144	0.000037	0.035237	0.000615	0.028705	0.000501	0.006303	0.000110	0.000632
16	0.002905	0.000051	0.038228	0.000667	0.031064	0.000542	0.007361	0.000128	0.000694
17	0.003613	0.000063	0.041093	0.000717	0.033327	0.000582	0.008358	0.000146	0.000754
18	0.004253	0.000074	0.043706	0.000763	0.035370	0.000617	0.009188	0.000160	0.000807
19	0.004557	0.000080	0.045769	0.000799	0.037156	0.000648	0.009700	0.000169	0.000848
20	0.002757	0.000048	0.046628	0.000814	0.039829	0.000695	0.009875	0.000172	0.000865

Tabla 4.2 – Distorsión y ángulos. Modelo 2

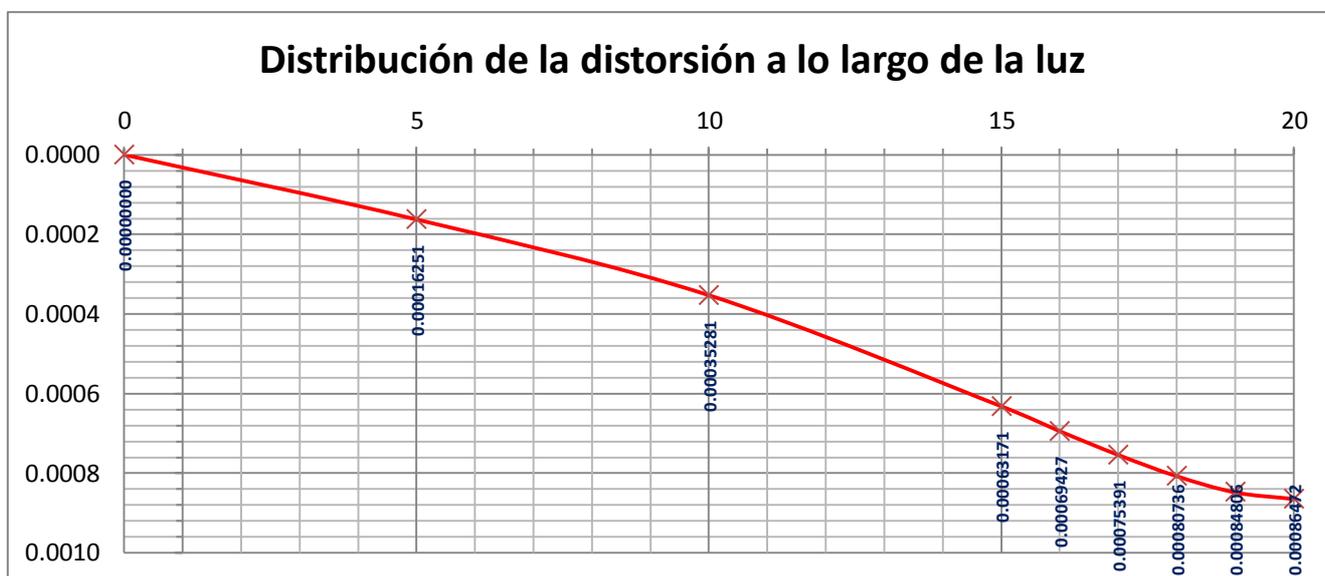


Figura 4.13 – Distorsión del modelo 2

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.004458	0.000078	0.006919	0.000121	0.005882	0.000103	0.003254	0.000057	0.000179
10	0.006887	0.000120	0.016845	0.000294	0.013130	0.000229	0.004492	0.000078	0.000361
15	0.006348	0.000111	0.031442	0.000549	0.022488	0.000392	0.002521	0.000044	0.000548
16	0.006016	0.000105	0.034708	0.000606	0.024513	0.000428	0.001822	0.000032	0.000585
17	0.005672	0.000099	0.037945	0.000662	0.026499	0.000462	0.001157	0.000020	0.000622
18	0.005420	0.000095	0.040967	0.000715	0.028380	0.000495	0.000539	0.000009	0.000657
19	0.005718	0.000100	0.043388	0.000757	0.030156	0.000526	0.000115	0.000002	0.000693
20	0.009398	0.000164	0.044391	0.000775	0.033154	0.000579	0.000034	0.000001	0.000759

Tabla 4.3 – Distorsión y ángulos. Modelo 3



Figura 4.14 – Distorsión del modelo 3

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.006229	0.000109	0.006264	0.000109	0.005978	0.000104	0.005166	0.000090	0.000206
10	0.011230	0.000196	0.015012	0.000262	0.012586	0.000220	0.009122	0.000159	0.000418
15	0.013687	0.000239	0.029107	0.000508	0.020559	0.000359	0.010235	0.000179	0.000642
16	0.013884	0.000242	0.032602	0.000569	0.022326	0.000390	0.010084	0.000176	0.000688
17	0.014049	0.000245	0.036192	0.000632	0.024102	0.000421	0.009800	0.000171	0.000734
18	0.014287	0.000249	0.039688	0.000693	0.025859	0.000451	0.009520	0.000166	0.000780
19	0.015323	0.000267	0.042476	0.000741	0.027721	0.000484	0.009305	0.000162	0.000828
20	0.020693	0.000361	0.043603	0.000761	0.031254	0.000545	0.009186	0.000160	0.000914

Tabla 4.4 – Distorsión y ángulos. Modelo 4



Figura 4.15 – Distorsión del modelo 4

Distancia desde el apoyo: Dirección X	α		β		γ		δ		Distorsión en radianes
	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	Grados	Radianes	
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.007620	0.000133	0.007477	0.000131	0.007267	0.000127	0.006704	0.000117	0.000254
10	0.014926	0.000261	0.015728	0.000275	0.014582	0.000254	0.013106	0.000229	0.000509
15	0.021300	0.000372	0.026815	0.000468	0.022106	0.000386	0.018249	0.000319	0.000772
16	0.022374	0.000391	0.029680	0.000518	0.023653	0.000413	0.018951	0.000331	0.000826
17	0.023391	0.000408	0.032774	0.000572	0.025219	0.000440	0.019524	0.000341	0.000881
18	0.024566	0.000429	0.035868	0.000626	0.026852	0.000469	0.019925	0.000348	0.000936
19	0.026801	0.000468	0.038360	0.000670	0.028867	0.000504	0.020182	0.000352	0.000997
20	0.033636	0.000587	0.039363	0.000687	0.033049	0.000577	0.020268	0.000354	0.001102

Tabla 4.5 – Distorsión y ángulos. Modelo 5

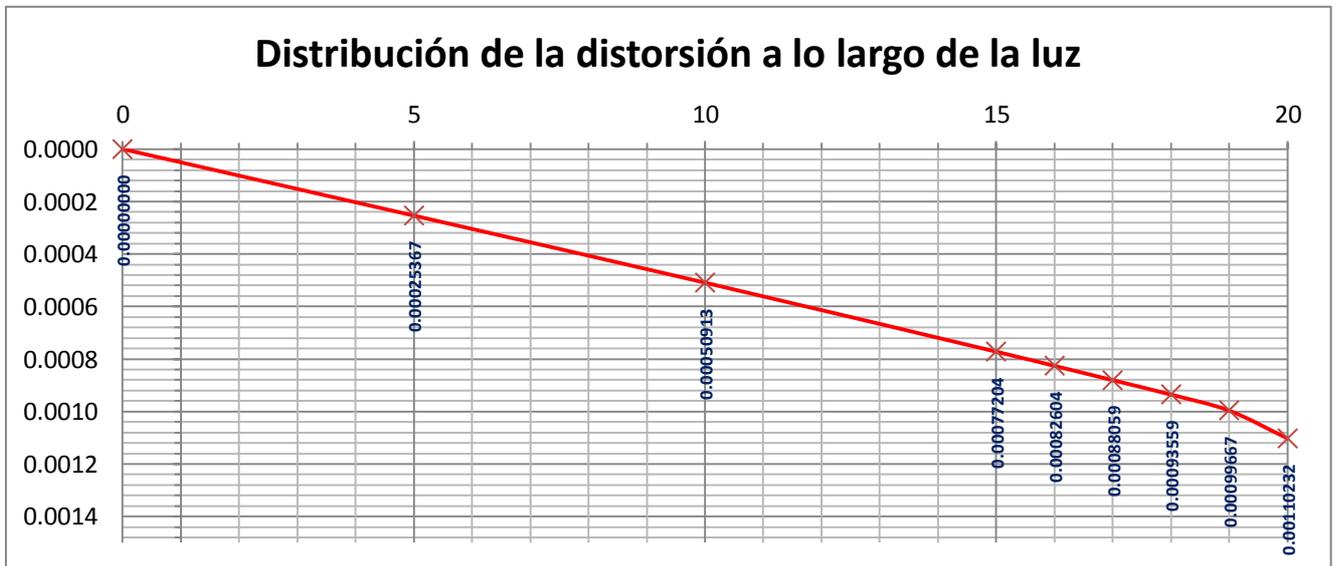


Figura 4.16 – Distorsión del modelo 5

En resumen:

Distancia desde el apoyo: Dirección X	Distorsión Modelo 1	Distorsión Modelo 2	Distorsión Modelo 3	Distorsión Modelo 4	Distorsión Modelo 5
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000256	0.000163	0.000179	0.000206	0.000254
10	0.000574	0.000353	0.000361	0.000418	0.000509
15	0.000949	0.000632	0.000548	0.000642	0.000772
16	0.001021	0.000694	0.000585	0.000688	0.000826
17	0.001087	0.000754	0.000622	0.000734	0.000881
18	0.001144	0.000807	0.000657	0.000780	0.000936
19	0.001189	0.000848	0.000693	0.000828	0.000997
20	0.001223	0.000865	0.000759	0.000914	0.001102

Tabla 4.6 – Distorsión de los modelos

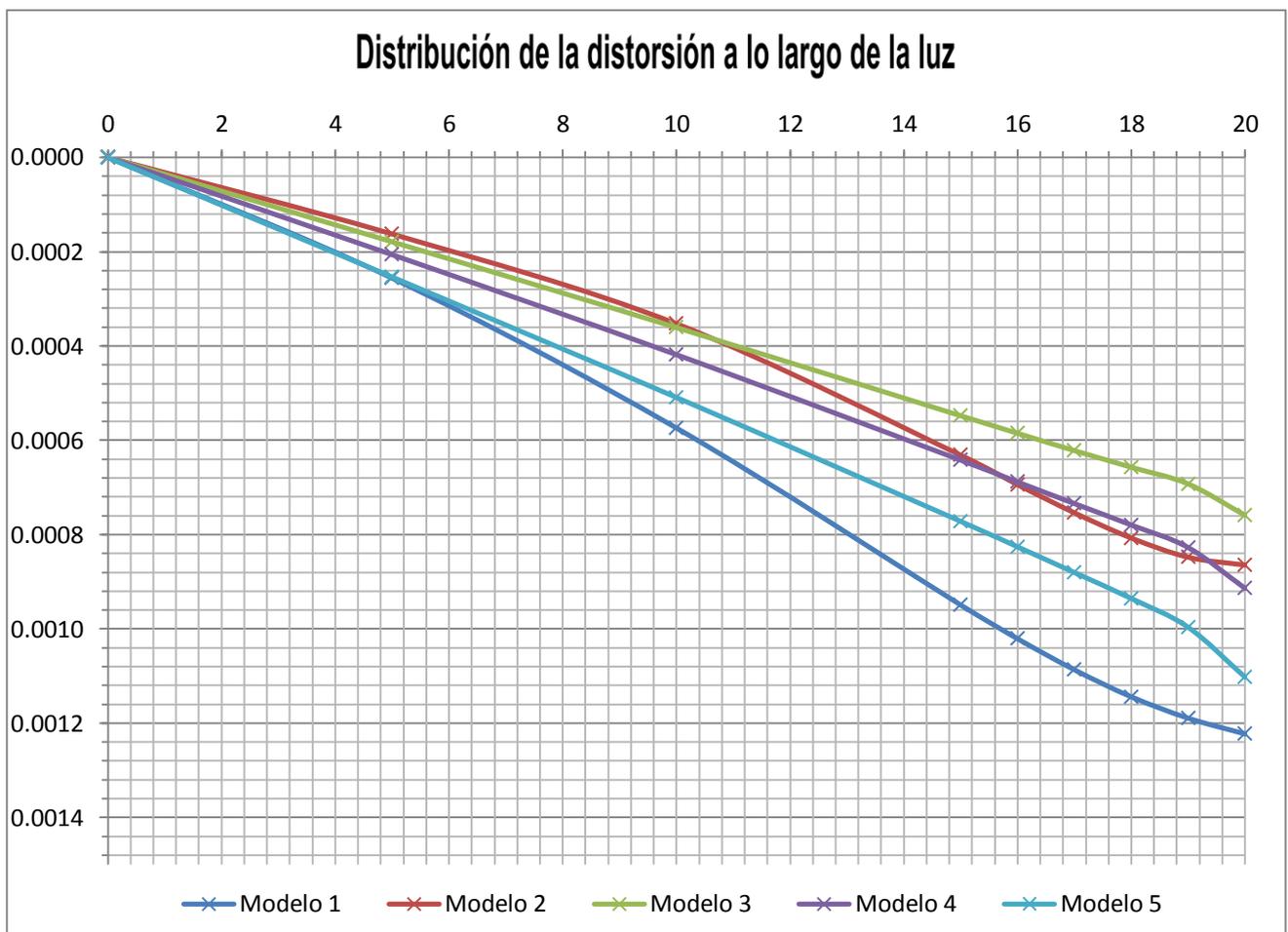


Figura 4.17 – Distorsión de los modelos

En la Figura 4.17, se observa claramente la distorsión que se genera en función que se va inclinando las almas, siendo el modelo 1 el de almas rectas y el modelo 5 con la mayor inclinación de las almas. Así se va reduciendo progresivamente hasta tal punto que el efecto positivo que tiene la inclinación es contraproducente.

Si el modelo tiene las almas rectas o tiene gran inclinación ($\geq 45^\circ$), la distorsión generada es la mayor posible ante una carga excéntrica, es decir, la deformación transversal de la sección es la más alta posible. Si se inclina un poco, modelo 2, o se inclina menos de 45° , modelo 4; observamos una mejoría ante la situación anterior, donde se reduce la distorsión total de la sección. El caso intermedio, modelo 3, es el que optimiza la distorsión de la sección ante tal carga descrita.

Este fenómeno se puede observar en la Figura 4.18, donde se ha representado en el eje de abscisas, la inclinación de las almas, siendo 0° cuando la inclinación es nula, es decir, cuando las almas son rectas. En el eje de ordenadas se representa la distorsión.

Se ha representado para las secciones central (la más desfavorable) y a 5 metros de dicha carga, obteniéndose resultados similares.

Conclusión: El rango de ángulos más favorables para la inclinación de almas se encuentra entre los 20° y 30° , siendo aproximadamente 25° , el óptimo que minimiza la distorsión para dicha carga.

Nota: En el apartado 4.6.2, se profundiza en los resultados obtenidos verificando si dichas conclusiones son ciertas.

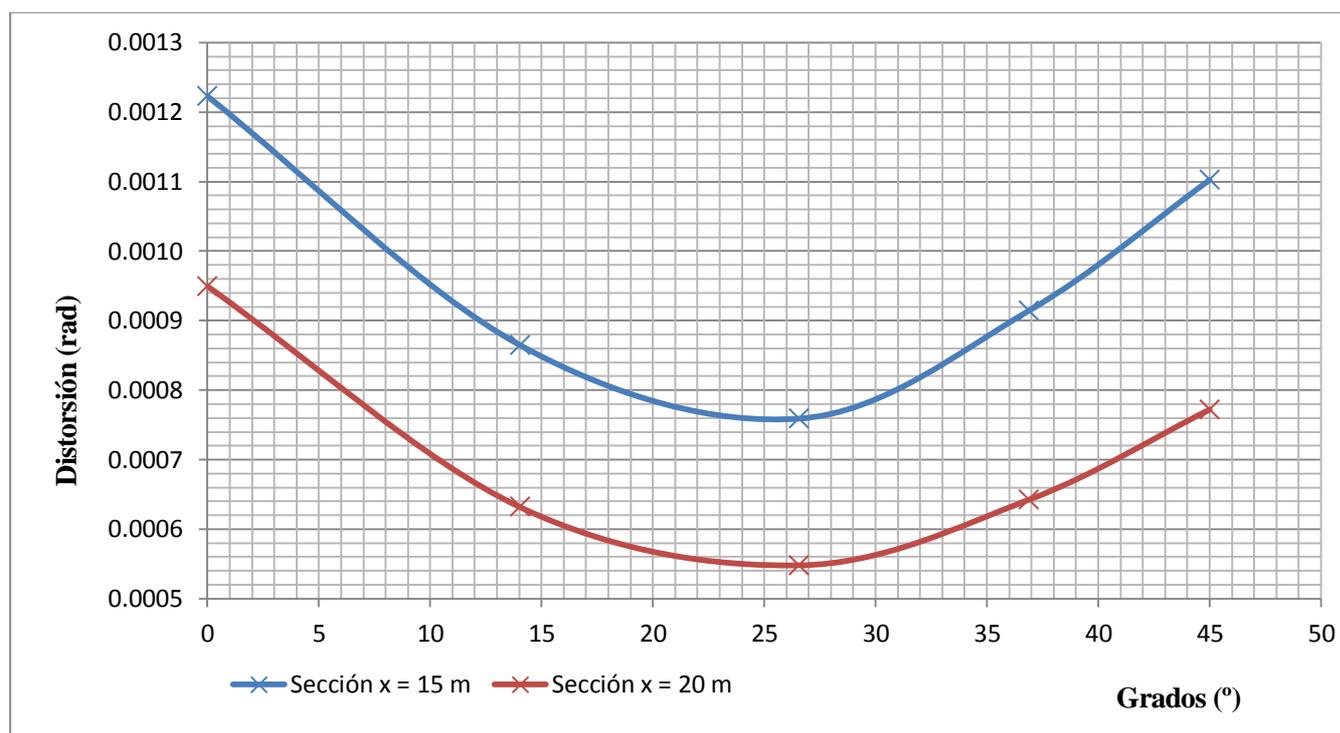


Figura 4.18 – Distorsión en función de la inclinación

4.4 Tensiones

En las tensiones observaremos la influencia que tiene las almas mediante la aplicación de la carga puntual, distinguiendo las tensiones longitudinales y tangenciales.

4.4.1 Tensiones longitudinales

Para observar la variación que experimenta ante la inclinación de las almas, nos detendremos en observar las tensiones longitudinales en la sección central ($x = 20$ m) para los 5 modelos, así como la distribución a lo largo de la luz para los nudos 3, 7, 10 y 12.

A continuación se muestra la distribución global de las tensiones longitudinales de cada modelo:

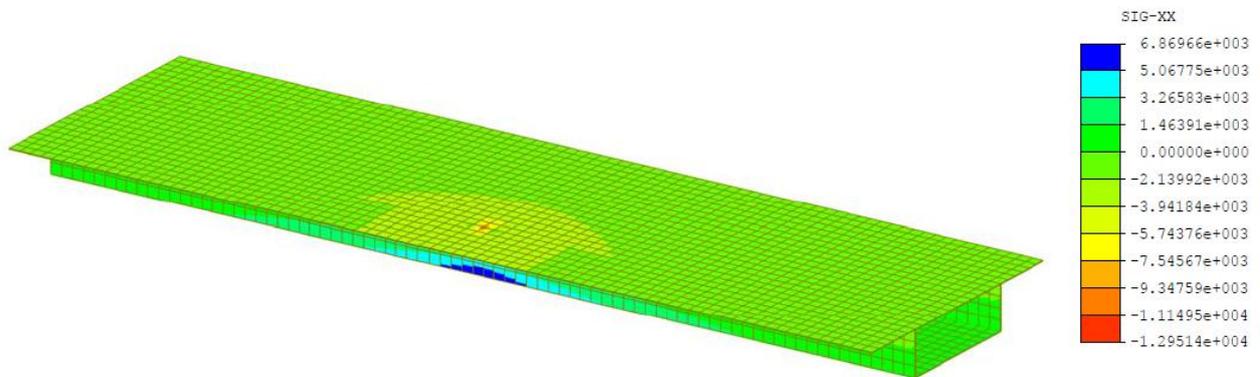


Figura 4.19 – Distribución de σ_{xx} (kN/m^2): Modelo 1

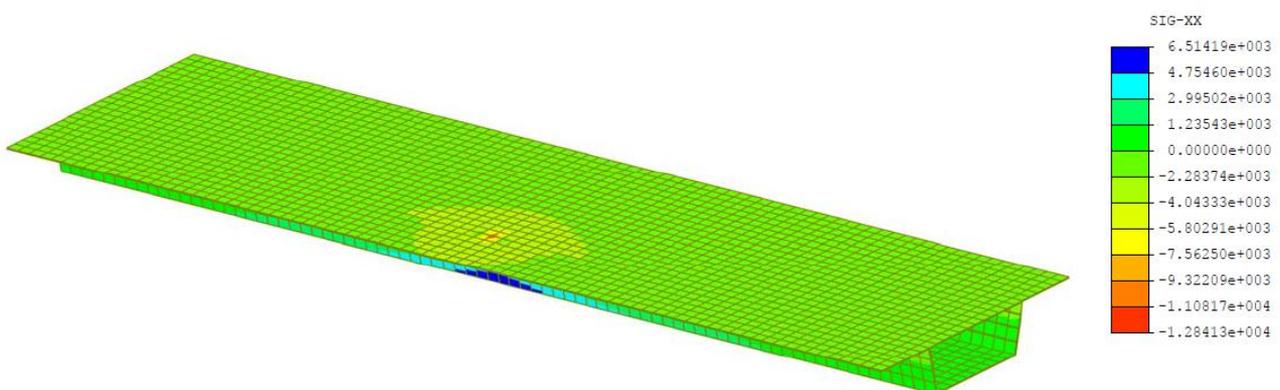


Figura 4.20 – Distribución de σ_{xx} (kN/m^2): Modelo 2

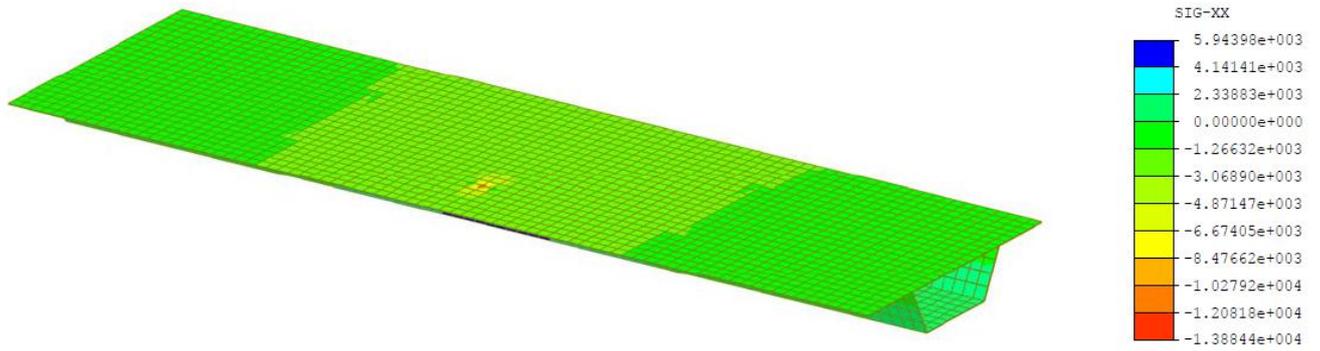


Figura 4.21 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²): Modelo 3

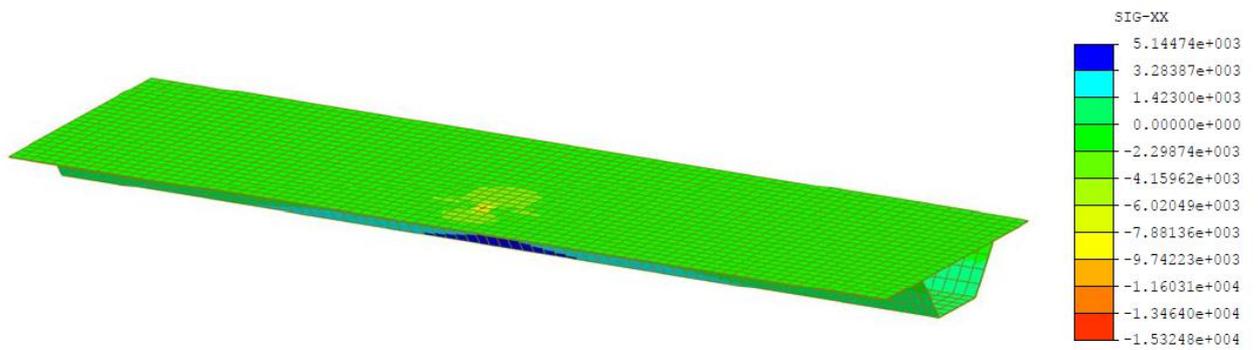


Figura 4.22 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²): Modelo 4

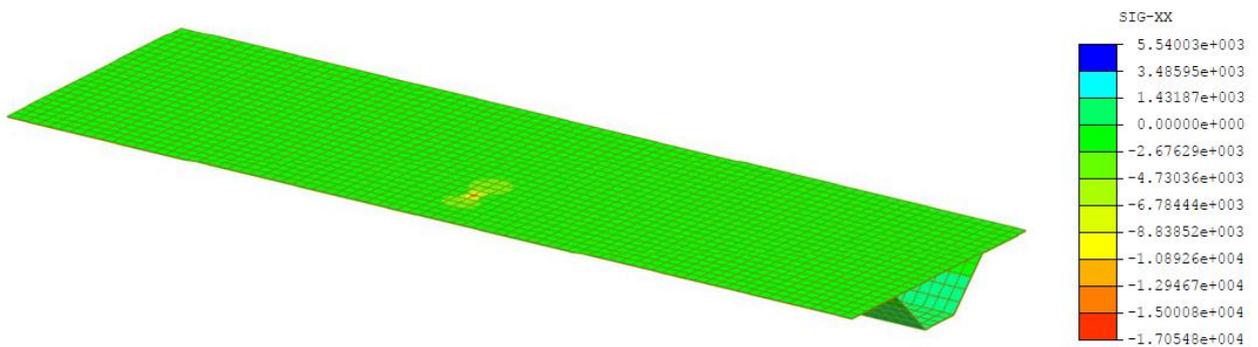


Figura 4.23 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²): Modelo 5

La distribución de las tensiones longitudinales para la carga puntual escogida en la sección más desfavorable (la sección central) se muestra en las siguientes figuras, correspondientes a cada modelo:

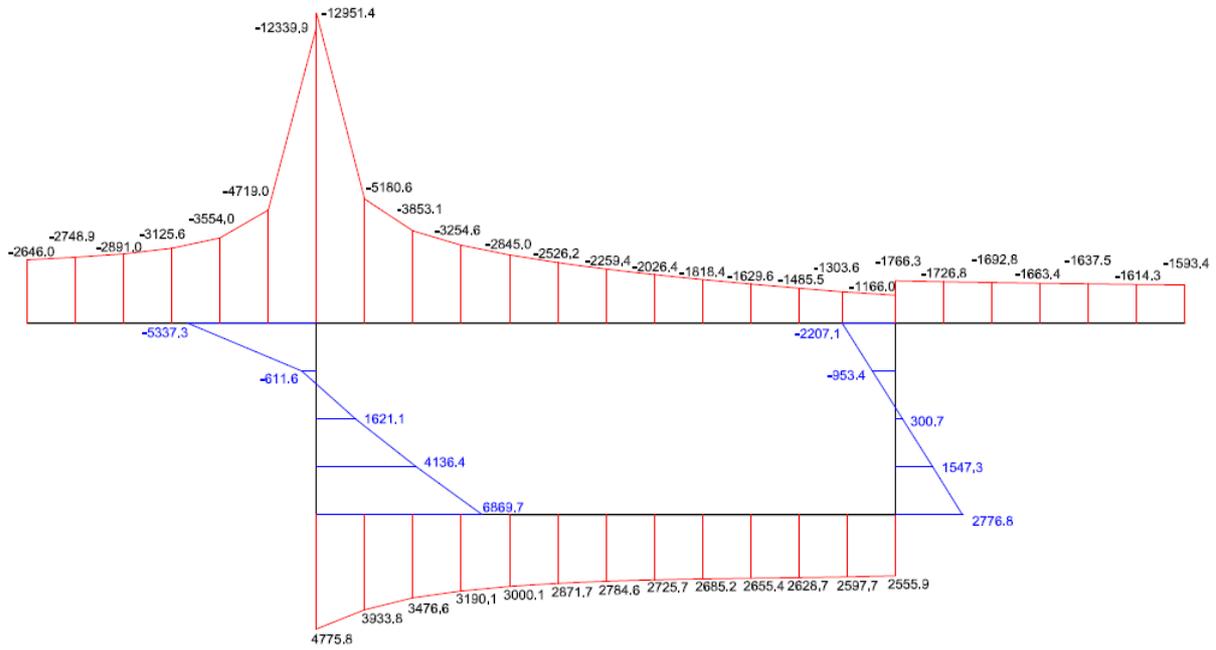


Figura 4.24 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección central. Modelo 1

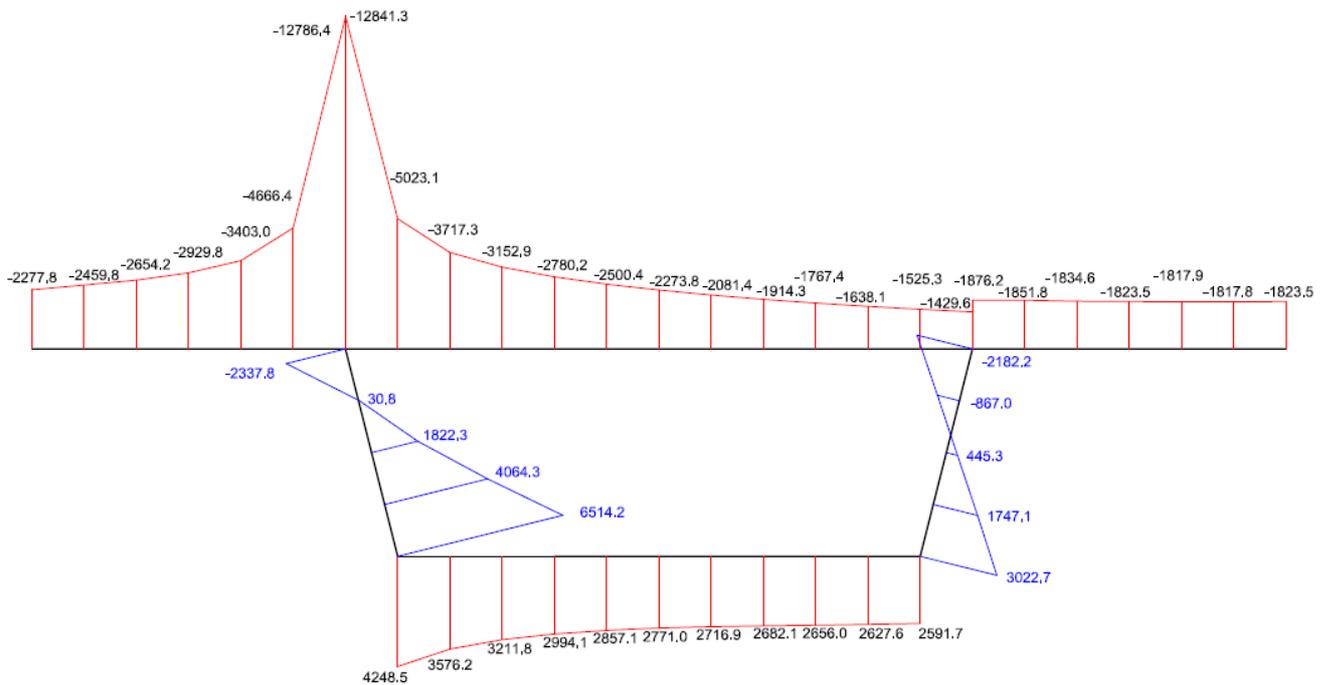


Figura 4.25 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección central. Modelo 2

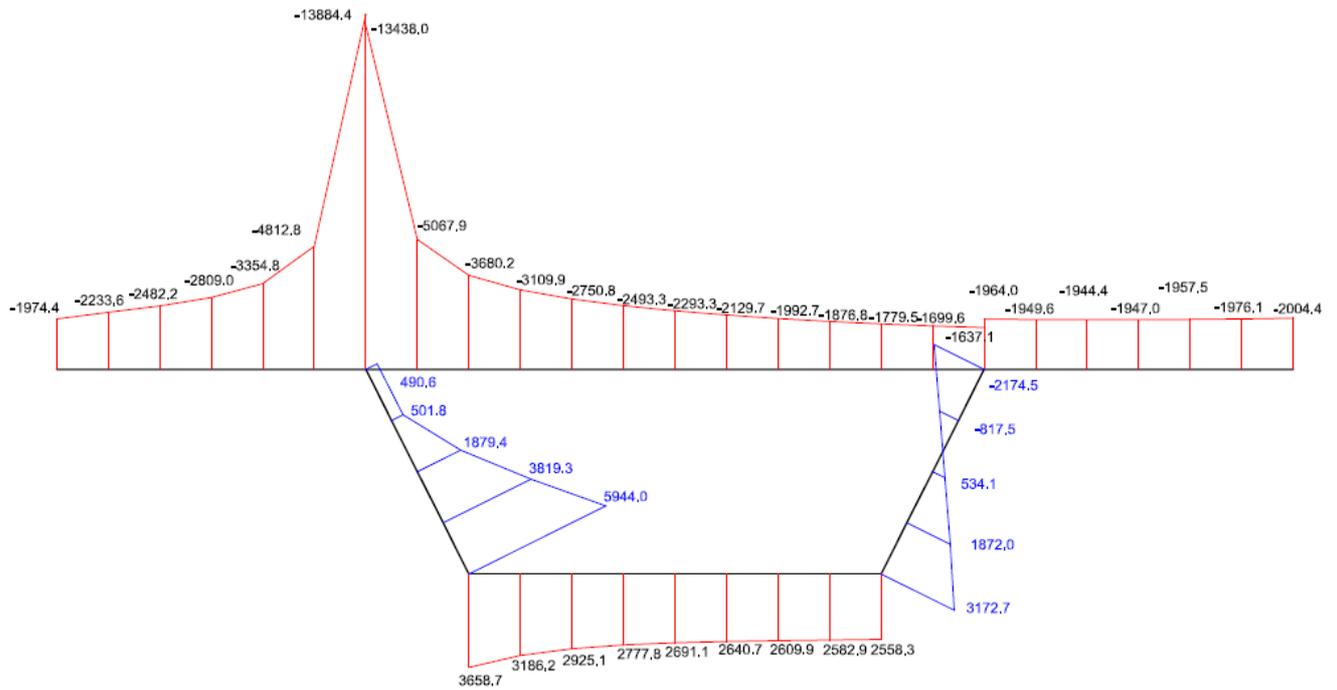


Figura 4.26 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección central. Modelo 3

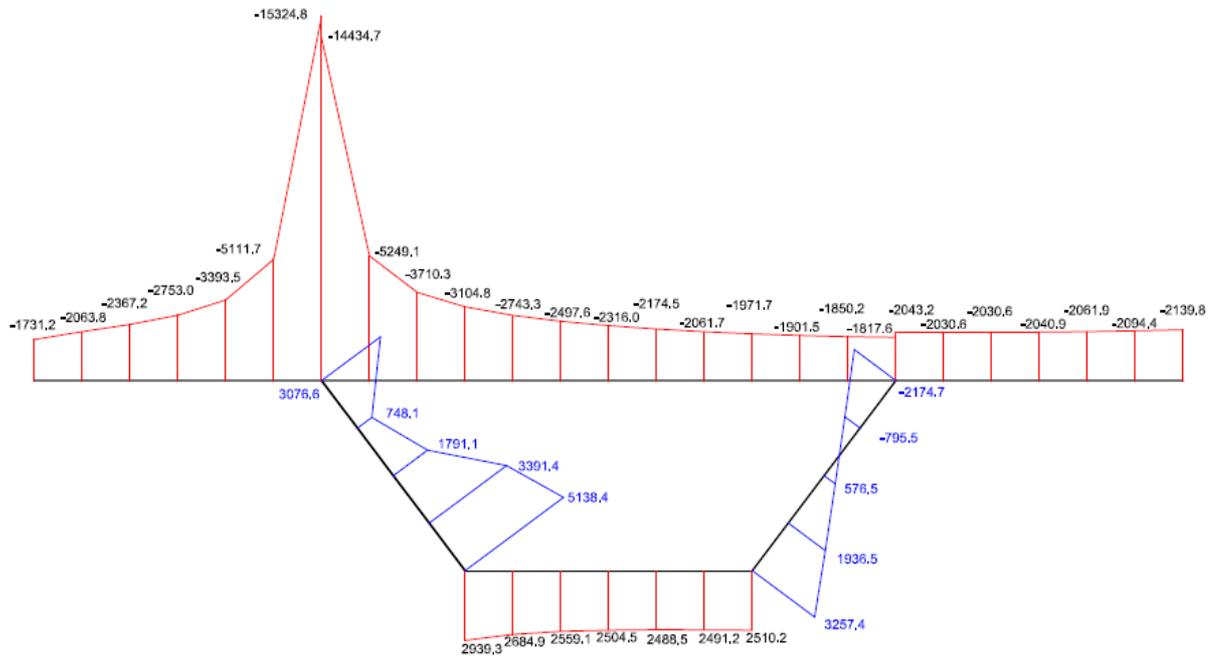


Figura 4.27 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección central. Modelo 4

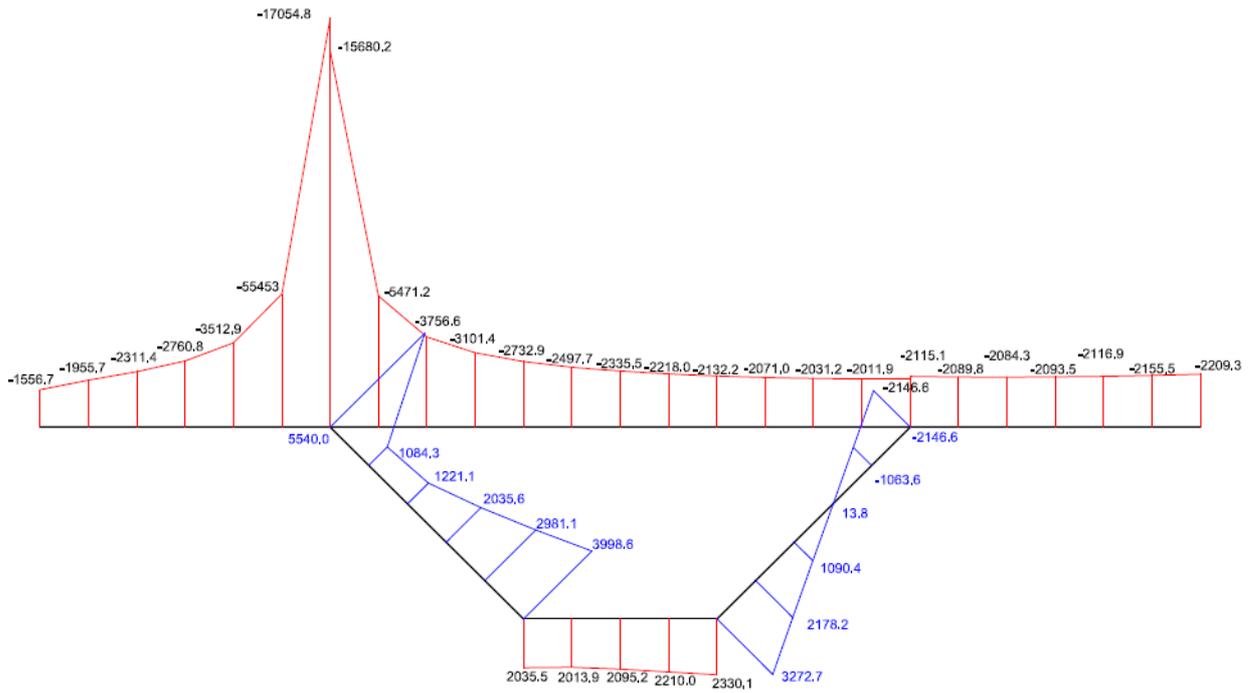
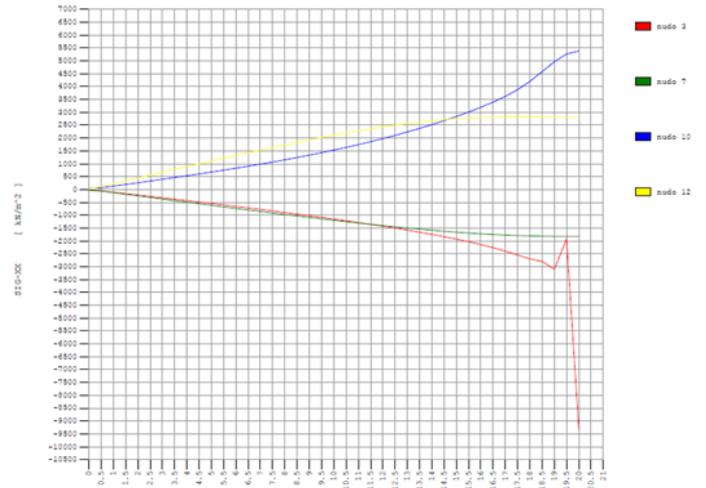
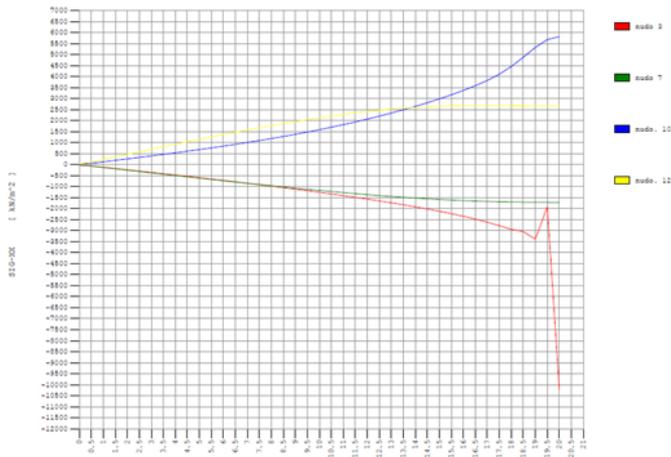


Figura 4.28 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección central. Modelo 5

Por último, los nudos de interés (nudos 3, 7, 10 y 12) para cada modelo tienen la siguiente distribución a lo largo de la luz tal y como aparece en la Figura 4.29. Donde se puede observar que siguen la misma tendencia todos los modelos y alcanzan unos valores medios similares en los nudos mencionados.

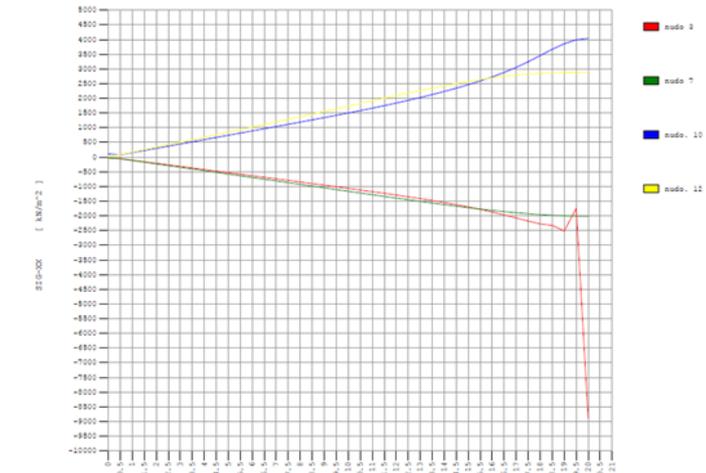
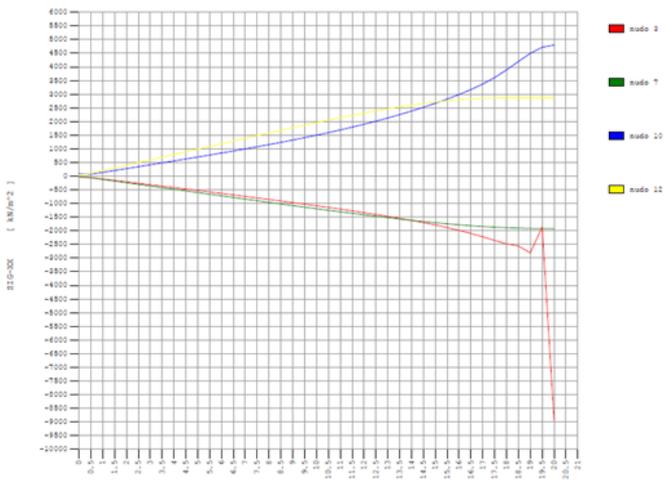
MODELO 1

MODELO 2



MODELO 3

MODELO 4



MODELO 5

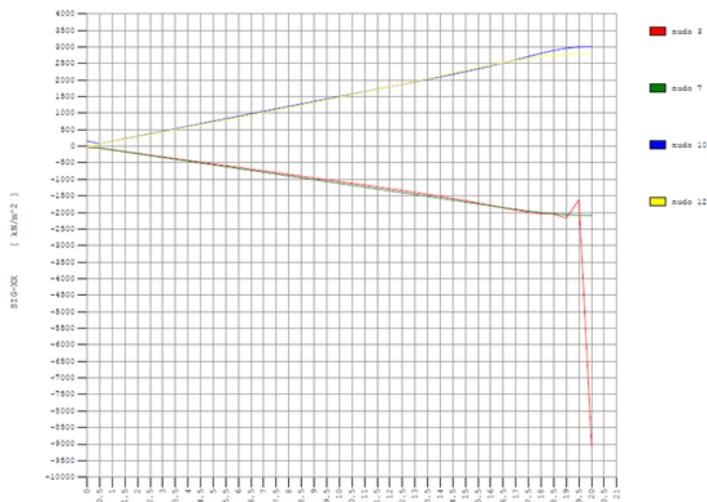


Figura 4.29 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) a lo largo de la luz

Conclusiones:

Las tensiones longitudinales muestran una distribución muy apuntada en las inmediaciones de la carga puntual, que se va atenuando rápidamente (aproximadamente a un canto de distancia, que en nuestros casos son dos metros).

Presentan la misma distribución y tendencia en los diferentes modelos, aunque en general, los valores se van atenuando en toda la sección a medida que se incrementa la inclinación del alma, exceptuando los valores del nudo 3 pertenecientes a la losa, que se va incrementando a la vez que se inclina el alma.

Esto ocurre debido a que se repartía la gran perturbación que produce la carga puntual en el nudo 3, donde al estar inclinada el alma, la distribución de las tensiones longitudinales las soporta la losa superior cuanto mayor sea la inclinación.

A pesar de este nudo 3 en concreto, la mejoría es notable en el resto la sección, pues alcanza **menores valores de tensiones longitudinales gracias a la redistribución a tensiones tangenciales, que causa la progresiva inclinación.**

En el apartado 4.6.3, profundizaremos en estas conclusiones, además de corroborar si son realmente ciertas.

4.4.2 Tensiones tangenciales

En las tensiones tangenciales, nos detendremos en observar la distribución que tiene en la sección $x = 19.5$ m, observando la redistribución que se produce provocada ante la gran perturbación que causa la carga puntual.

Así mismo, observaremos la distribución para los nudos 3 y 10 a lo largo de la luz, así como una vista global de dicha distribución, tal y como se muestran en las figuras que aparecen a continuación:

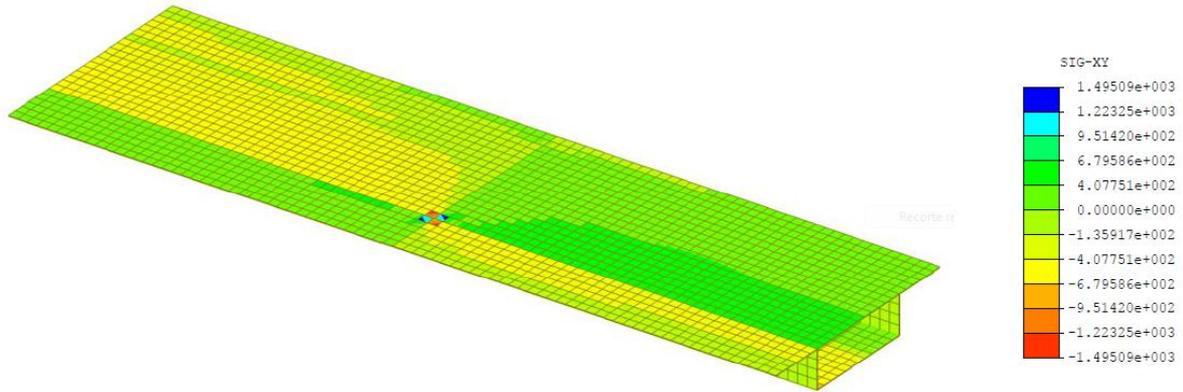


Figura 4.30 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²): Modelo 1

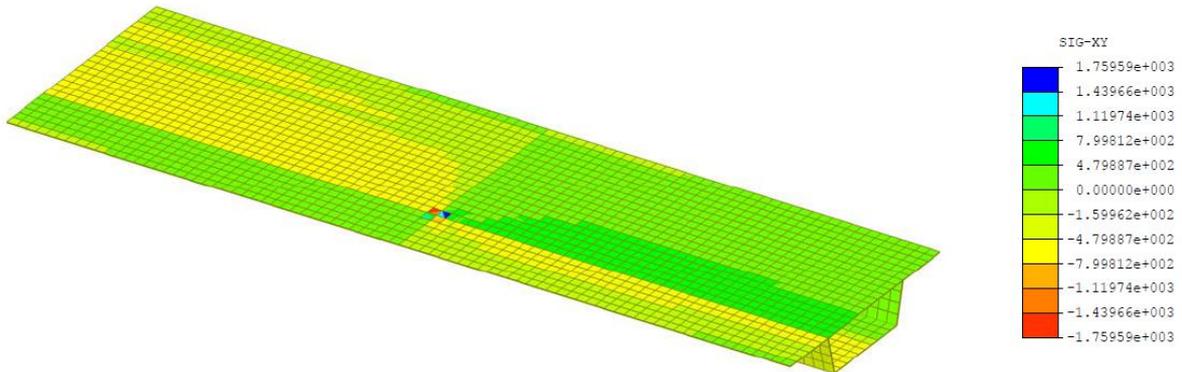


Figura 4.31 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²): Modelo 2

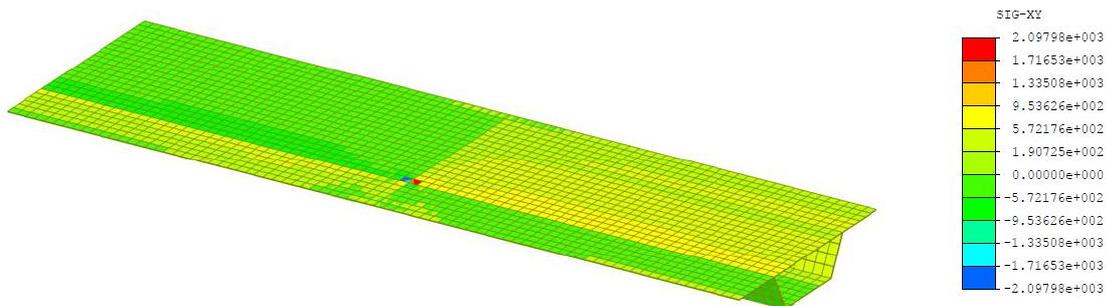


Figura 4.32 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²): Modelo 3

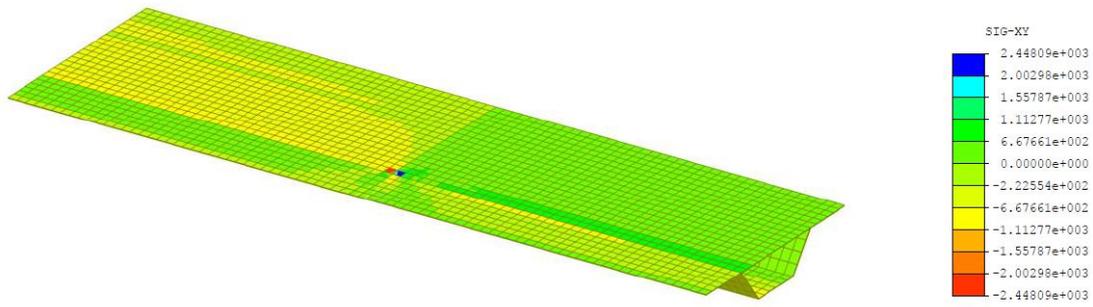


Figura 4.33 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²): Modelo 4

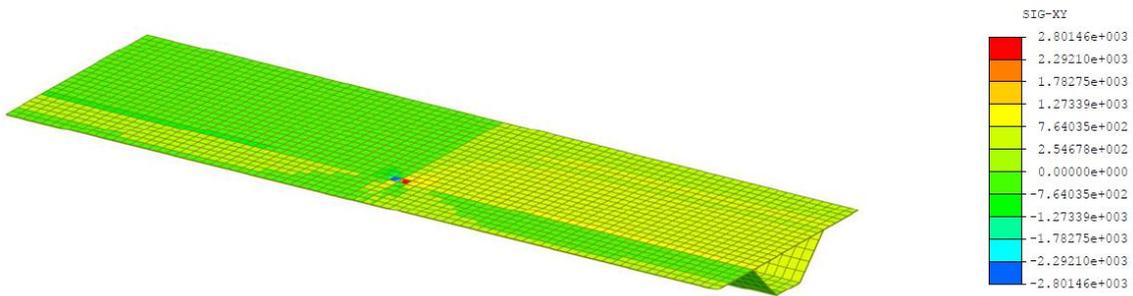


Figura 4.34 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²): Modelo 5

La distribución de las tensiones tangenciales para la carga puntual escogida en la sección más desfavorable (la sección $x = 19.5$ m) se muestra en las siguientes figuras, correspondientes a cada modelo:

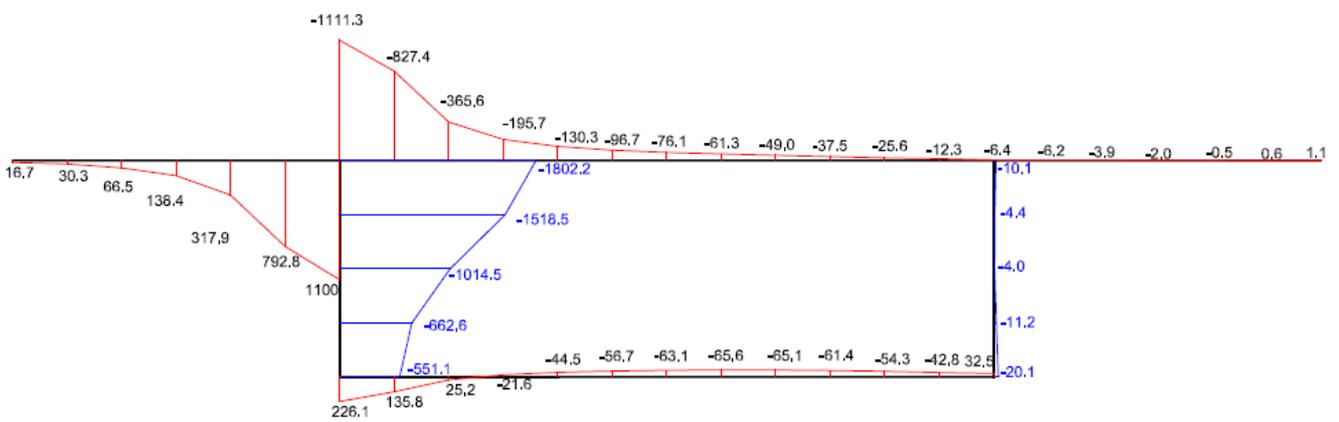


Figura 4.35 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 1

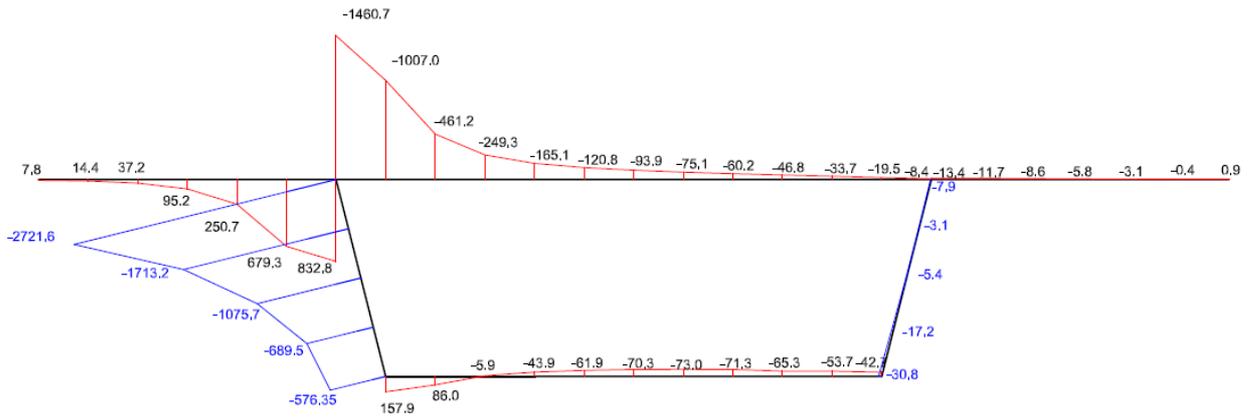


Figura 4.36 – Distribución de τ_{xy} (kN/m^2) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 2

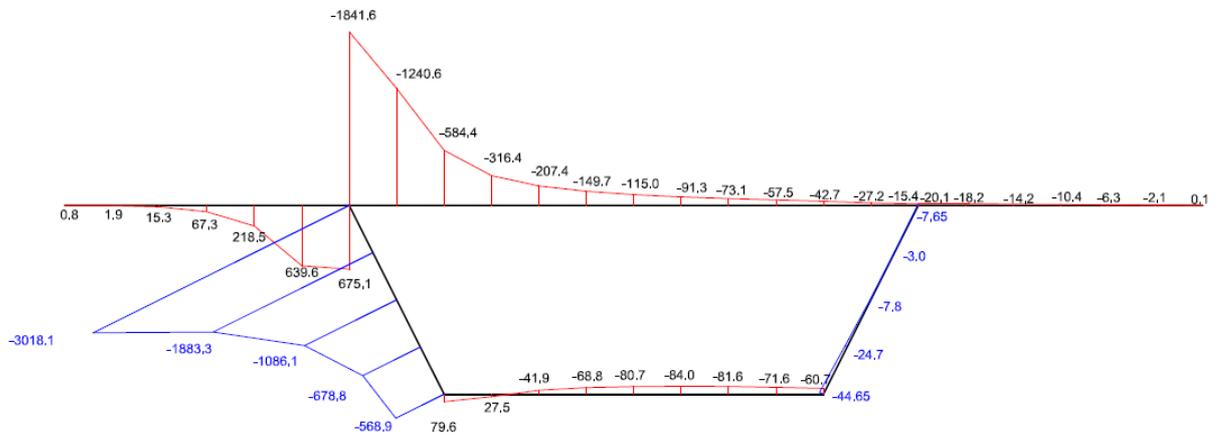


Figura 4.37 – Distribución de τ_{xy} (kN/m^2) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 3

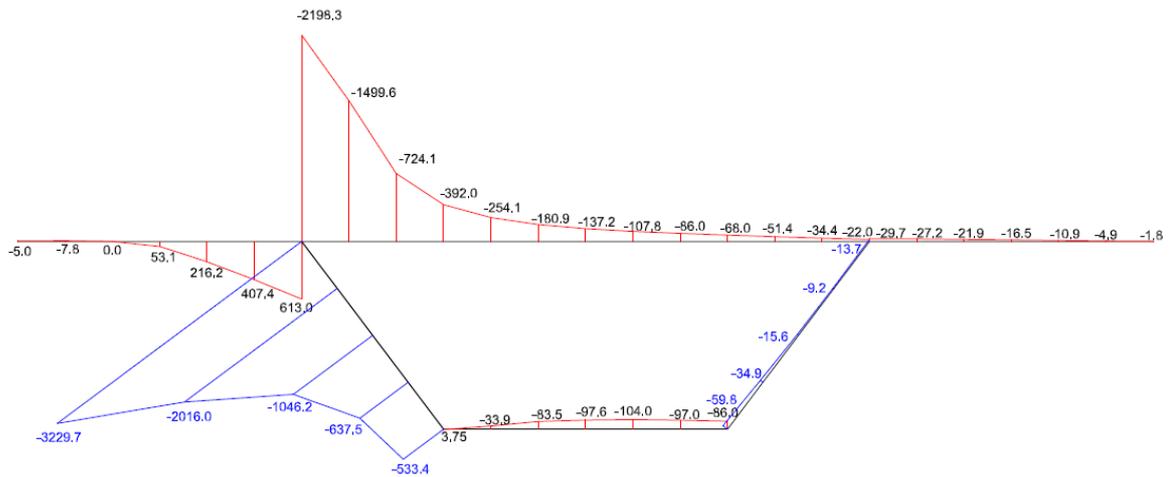


Figura 4.38 – Distribución de τ_{xy} (kN/m^2) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 4

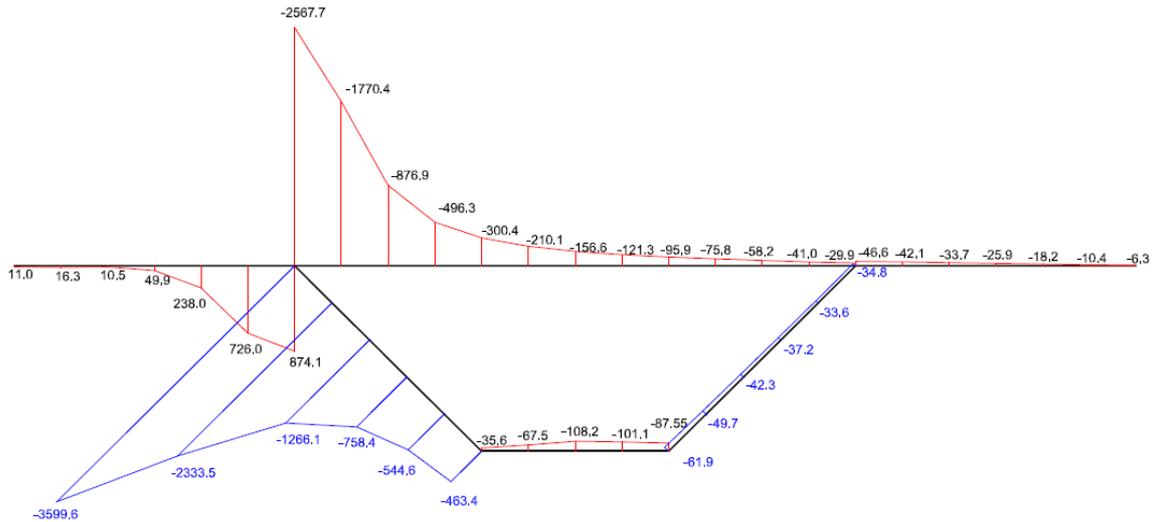


Figura 4.39 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²) en la sección de $x = 19.5$ m. Modelo 5

Por otra parte su distribución a lo largo de la luz, son similares en todos los modelos homogeneizándose a partir de un canto de la sección en todos los casos, provocados por la gran perturbación de la carga puntual.

En base a dichos resultados, podemos concluir:

La carga puntual provoca una fuerte concentración de las tensiones tangenciales en las proximidades de dicha carga, especialmente alrededor del nudo 3 (donde se sitúa la carga), tanto en la losa superior como en la parte perteneciente al alma.

En la parte superior del alma tiene fuertes concentraciones de tensiones tangenciales ya que está muy solicitada y la misión de las tensiones tangenciales consiste en repartir el efecto perturbador de la carga puntual en el resto del alma. Dicha perturbación se disipa rápidamente al alejarnos de la carga.

Existe una relación proporcional entre el incremento de las tensiones tangenciales a medida que se inclina el alma, esto ocurre por la descomposición de tensiones producida entre la zona de contacto del alma y losa superior, lo que generará diferentes esfuerzos como veremos en el próximo apartado (apartado 4.5).

La inclinación progresiva de las almas se traduce en una redistribución de las tensiones, las tensiones longitudinales van disminuyendo a medida que aumentan las tensiones tangenciales. Este hecho significa la aparición de diferentes esfuerzos.

En el apartado 4.6.3, profundizaremos en estas conclusiones, además de corroborar si son realmente ciertas.

4.5 Esfuerzos

Para observar la importancia de la inclinación de las almas en los esfuerzos observaremos los cambios que se producen en los momentos flectores, y especialmente, en la distribución de los axiles N_y y cortantes N_{xy} así como en las inmediaciones de la cargas puntuales, donde la inclinación es determinante.

La importancia de la inclinación de las almas se puede observar en la descomposición de las cargas que se produce, tal y como se muestra en la Figura 4.40; donde aparece un caso para las almas rectas y otro para las almas inclinadas.

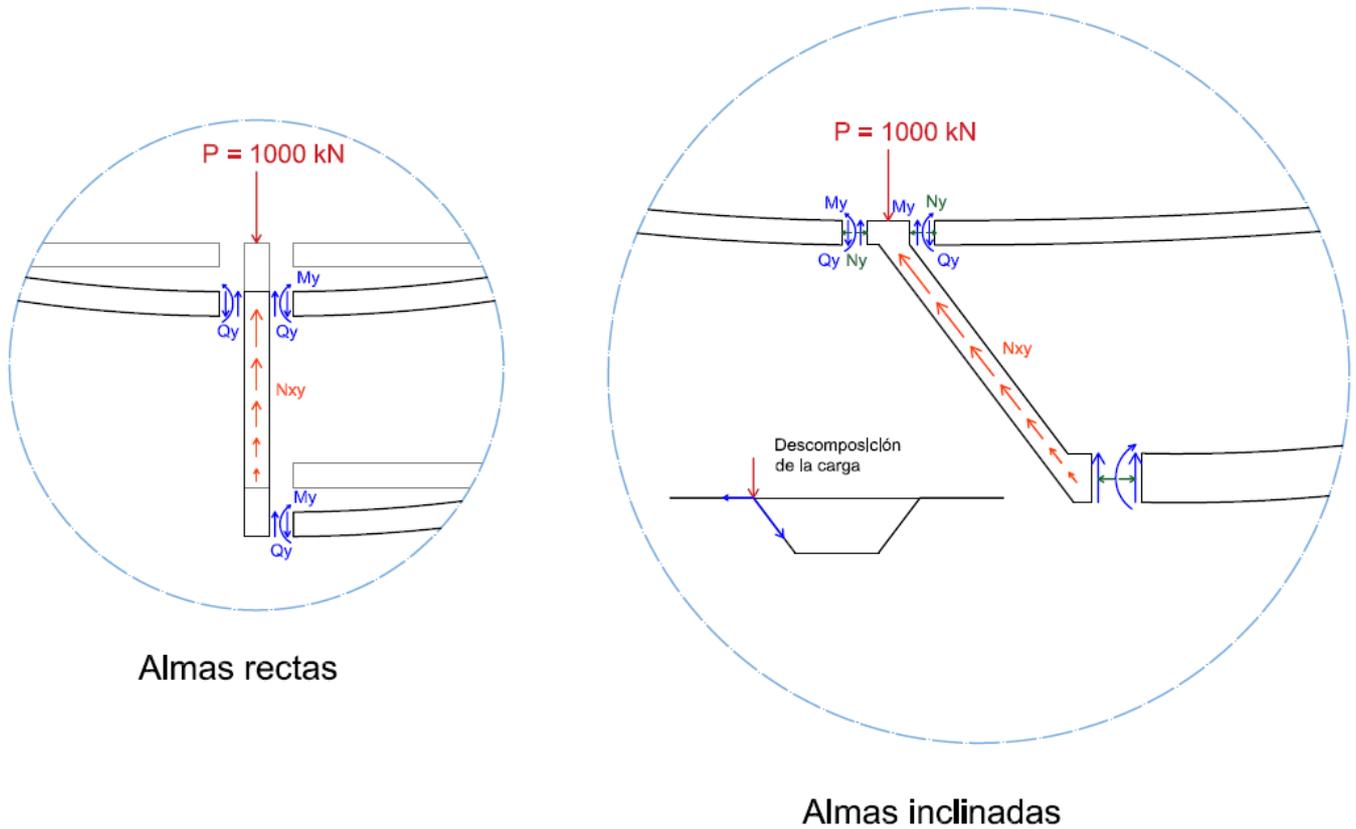


Figura 4.40 – Descomposición de fuerzas y estado de cargas en el nudo

4.5.1 Momentos flectores transversales (M_y)

En el estudio de sensibilidad de la inclinación de las almas, observaremos la evolución que tienen los momentos flectores en la sección central del modelo ($x = 20$ m) para todos los modelos. Además, observaremos la distribución que tienen los nudos 3 y 12 del modelo base a lo largo de la luz.

A continuación aparecen las secciones centrales, cuyos valores del momento flector están expresados en $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$.

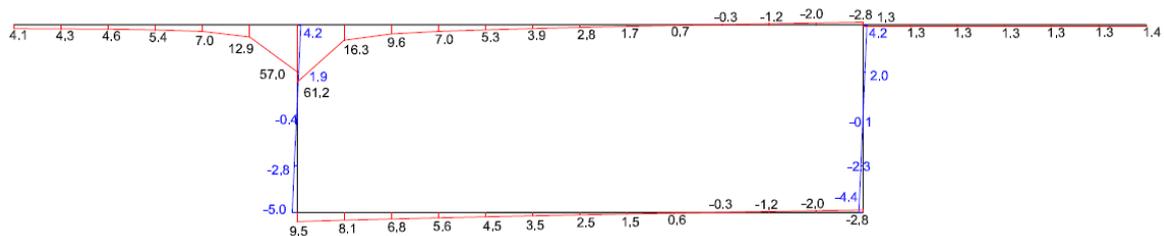


Figura 4.41 – Momento flector M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) en la sección central. Modelo 1

La distribución de los nudos 3 y 12 (valores promediados) para los diferentes modelos es:

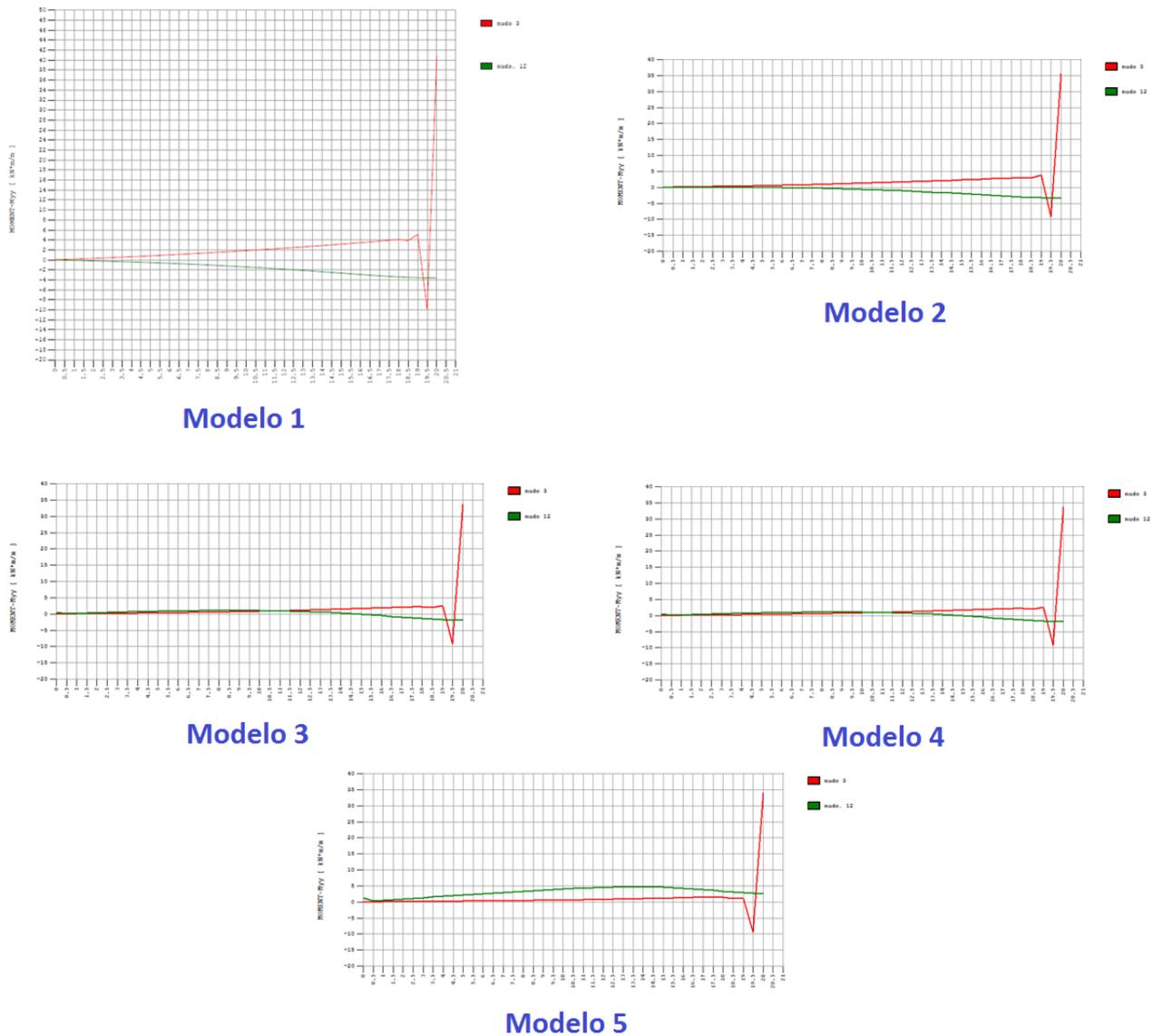


Figura 4.46 – Distribución del momento flector M_y (kN·m/m)

Como se puede observar en todos los modelos siguen la misma tendencia, donde provoca en todos los casos un pico en el nudo 3, que se va homogeneizando a lo largo del espacio. Mientras que el nudo 12 (en la esquina opuesta, presenta valores más suaves, donde la perturbación apenas afecta).

Conclusiones:

En general, los momentos flectores son menores a medida que se va inclinando el alma exceptuando las inmediaciones del nudo 3 (donde se encuentra la carga) que al igual que ocurría en las tensiones longitudinales, van aumentando.

Por otra parte, los valores de la losa inferior son mayores debido a que deben soportar la misma carga en menos espacio (ya que se va reduciendo el ancho de la losa inferior) y al ser esfuerzos por unidad de longitud, deben soportar más carga por unidad.

De cualquier forma, **la variación que produce la inclinación de las almas es prácticamente despreciable ya que los valores y distribución son muy similares entre los diferentes modelos.**

4.5.2 Axiles transversales (Ny)

La inclinación de las almas es fundamental en los esfuerzos axiles transversales pues se trata de compensar la componente horizontal de la carga y así atenuar que toda la carga incida sobre el cuerpo del alma en forma de esfuerzos cortantes.

Para observar la influencia entre estos esfuerzos y la progresiva inclinación de las almas, estudiaremos la distribución que presentan los modelos en la sección central (sección más desfavorable para dichos esfuerzos) donde se encarga de atenuar y homogeneizar la carga lo más rápido posible tal y como veremos en la distribución a lo largo de la luz en el nudo 3.

A continuación aparecen la distribución de dichos esfuerzos en la sección central, sección $x = 20$ m. Valores expresados en kN/m.

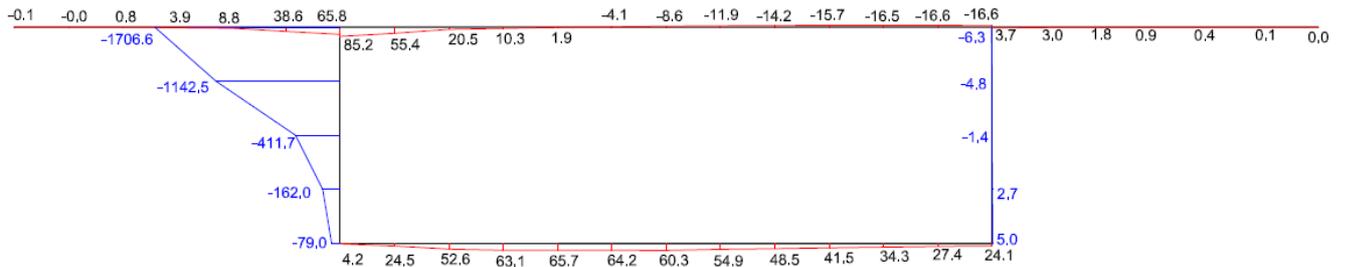


Figura 4.47 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 1

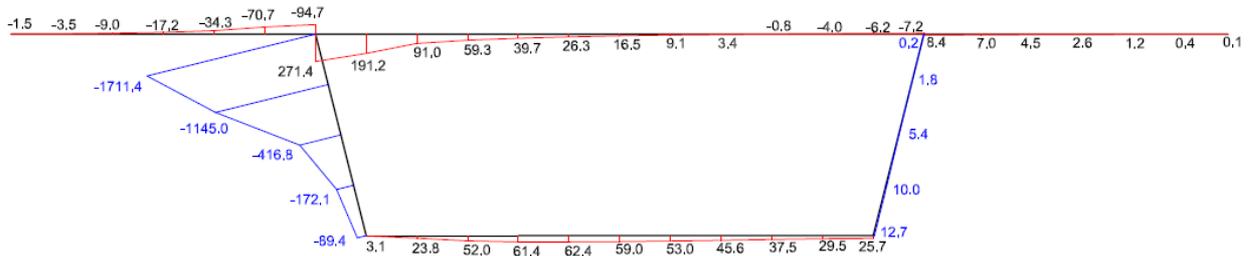


Figura 4.48 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 2

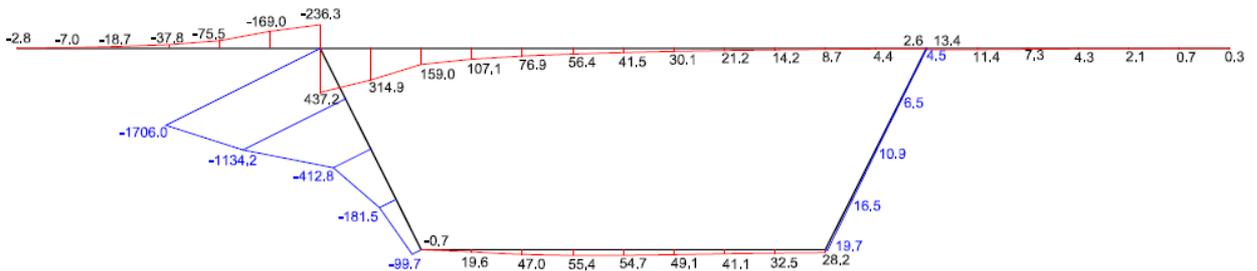


Figura 4.49 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 3

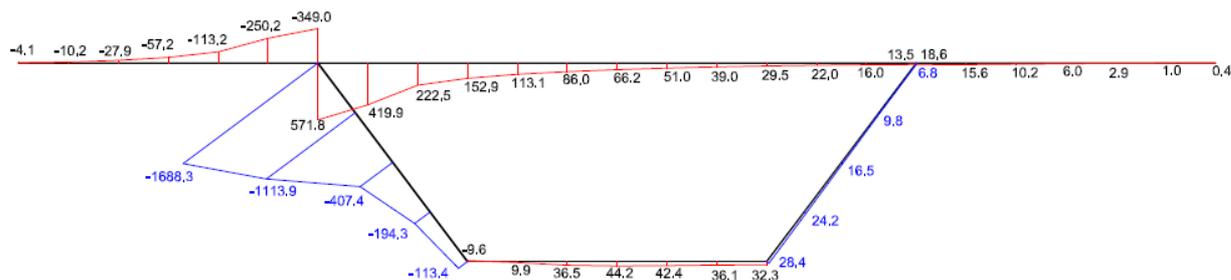


Figura 4.50 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 4

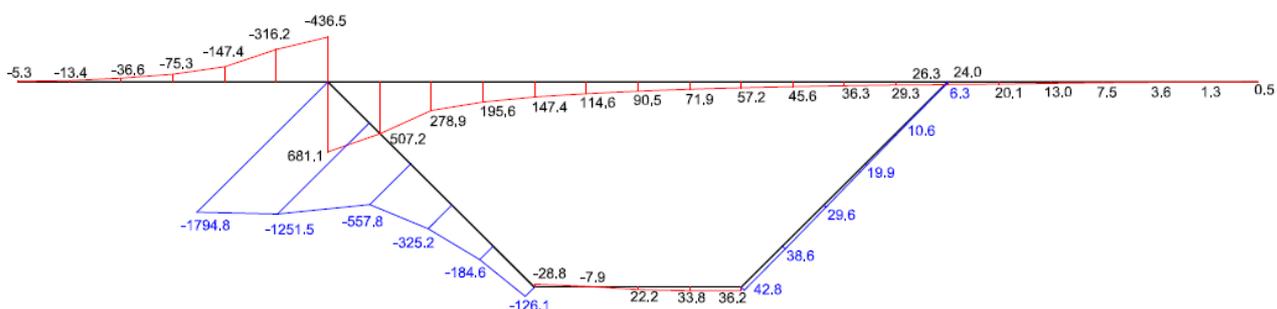


Figura 4.51 – Axiles transversales N_y (kN/m) en la sección central. Modelo 5

Como se puede apreciar, los esfuerzos axiles van aumentando en la losa superior debido a la descomposición de la carga. Además como se disipa rápidamente la carga, todos los modelos, como se aprecia en la Figura 4.52.

Conclusiones:

La inclinación del alma es determinante en la aparición de los esfuerzos axiles transversales, donde la carga (al ser vertical), se debe descomponer en el alma (inclinada) y en la losa superior para poder compensarse. A medida que aumenta la inclinación, los esfuerzos axiles que aparecen en la losa superior aumentan.

Por lo tanto, hay una **relación directamente proporcional entre la inclinación del alma y el aumento de los esfuerzos axiles transversales**, donde en el caso del alma recta es prácticamente despreciable y a medida que se inclina, la componente horizontal de la losa superior gana importancia.

Es ventajoso que aumente este esfuerzo ya que aprovecha más la capacidad de la sección en cajón debido a que se distribuye la carga en varios esfuerzos soportados por diferentes componentes de la sección (almas, losas...). Si estuviese recta y ante tal carga, no existiría dicha redistribución de esfuerzos y el alma debe soportarla exclusivamente, desaprovechando las buenas propiedades que tiene la sección.

Por otra parte, la perturbación formada a causa de dicha carga se dispersa rápidamente como se puede observar en la Figura 4.52.

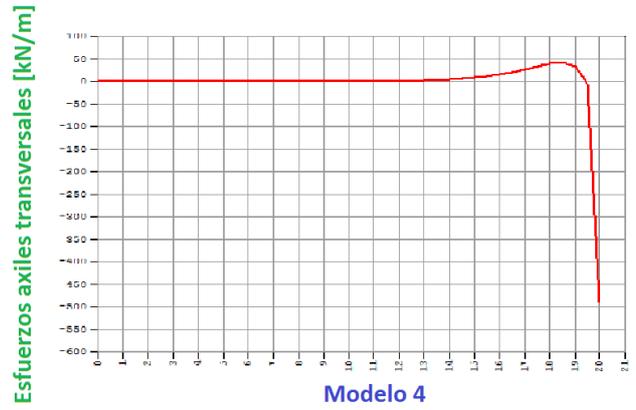
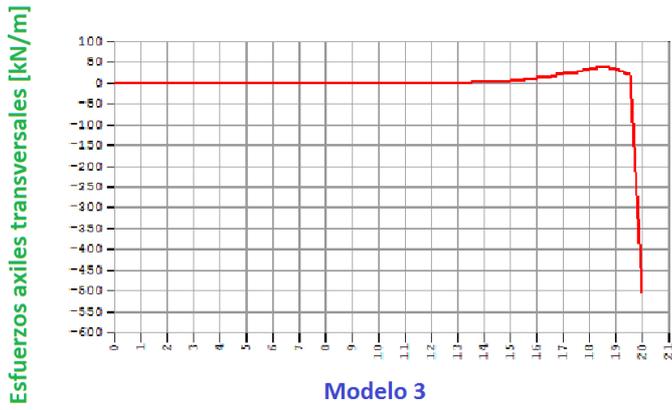
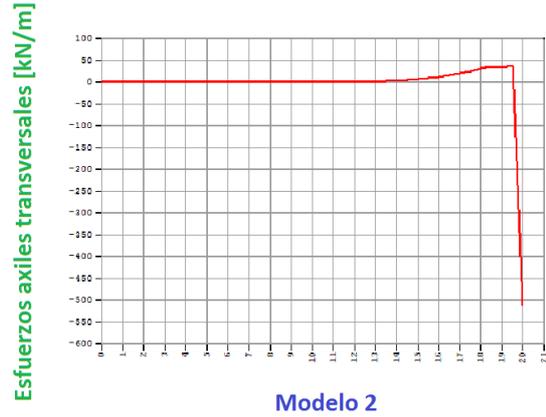
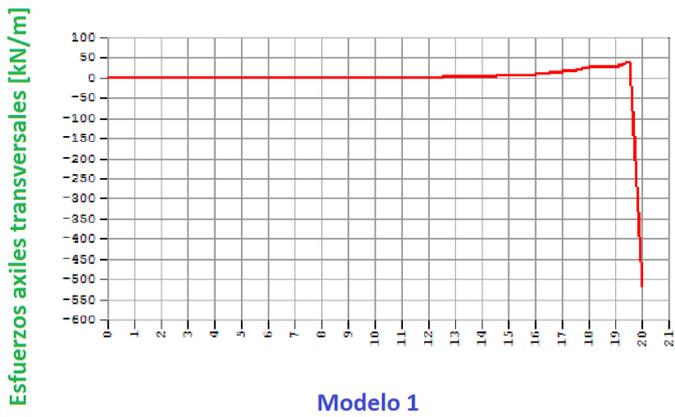


Figura 4.52 – Distribución del esfuerzo axial transversal N_y (kN/m) en el nudo 3 a lo largo de la luz

4.5.3 Cortantes (Nxy)

Para observar la influencia que tiene la inclinación de las almas en la distribución de cortantes N_{xy} y Q_y , según la Figura 4.40, observaremos la distribución que tiene en la sección $x = 19.5$, que es la sección más desfavorable para la carga puntual estudiada.

También observaremos la evolución a lo largo de la luz de dichas tensiones en las almas.

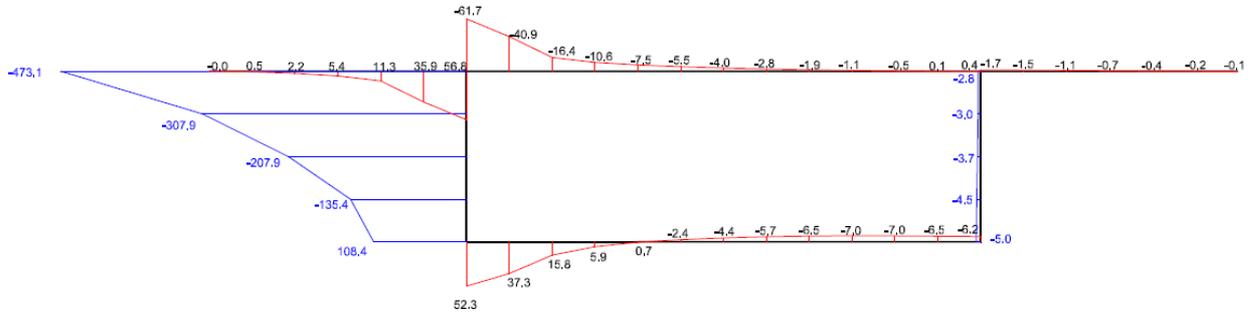


Figura 4.53 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 1

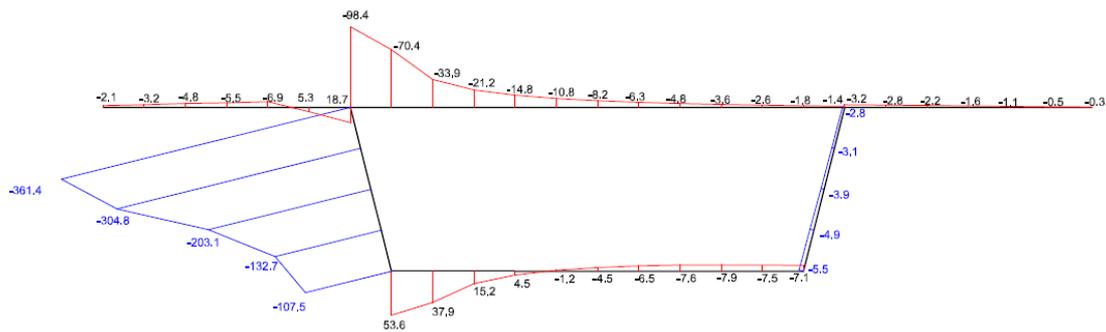


Figura 4.54 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 2

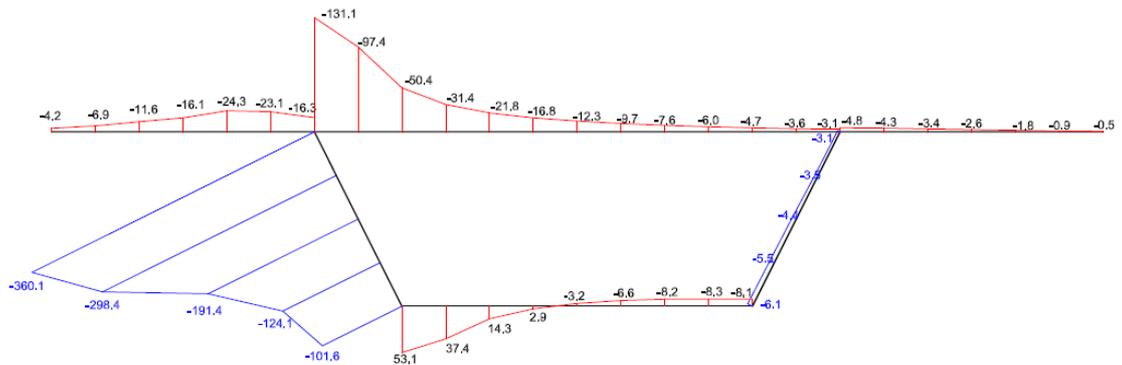


Figura 4.55 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 3

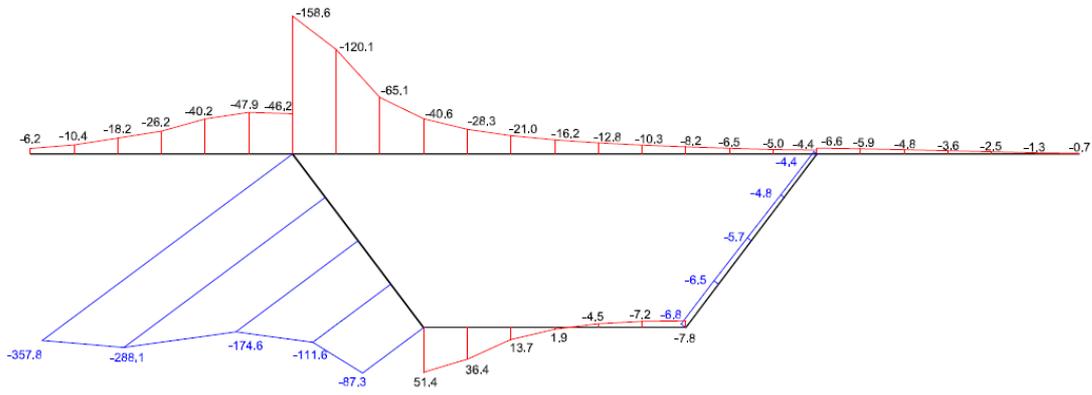


Figura 4.56 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 4

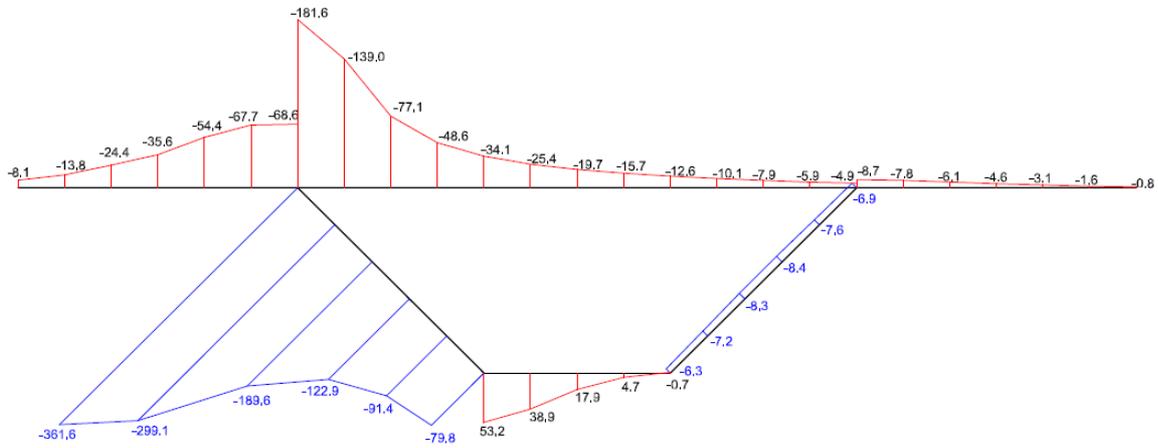


Figura 4.57 – Cortantes transversales N_{xy} (kN/m) en la sección $x = 19.5$ m. Modelo 5

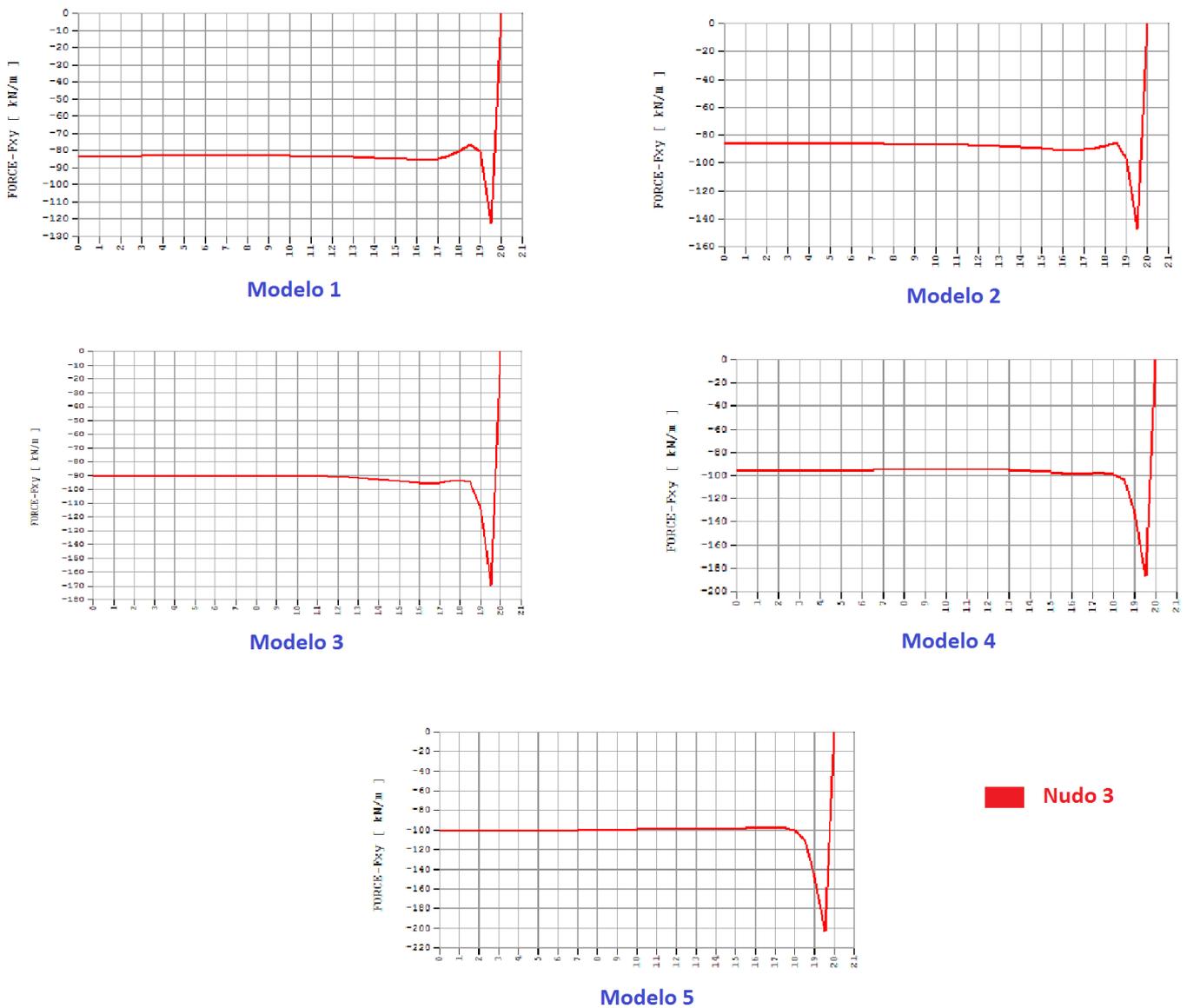


Figura 4.58 – Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} (kN/m) en el nudo 3 a lo largo de la luz

Conclusiones:

A medida que progresa la inclinación del alma, los esfuerzos cortantes van disminuyendo en el alma mientras que los esfuerzos cortantes de la losa superior aumentan. Esto se debe a la redistribución de los esfuerzos, donde la inclinación del alma ayuda a redistribuir las cargas en los diferentes esfuerzos estudiados anteriormente.

En el apartado 4.6.1 se profundiza en estos resultados.

En resumen:

Los esfuerzos flectores transversales no dependen de la inclinación del alma, mientras que la inclinación de ésta, se traduce en una redistribución de los esfuerzos axiales transversales y los esfuerzos cortantes, donde los primeros van aumentando a medida que se inclina más el alma (aumenta sus valores en la losa superior) mientras que los segundos van disminuyendo en el alma.

4.6 Corroboración de los resultados: otras cargas

Una vez comparado los diferentes parámetros para los modelos realizados, hemos sacado algunas conclusiones en claro. Sin embargo, para estar más seguros de la fiabilidad que tienen dichos resultados deben ser corroborados para diferentes cargas y situaciones. Por ello en el presente apartado, se desarrollarán cargas alternativas con las que podremos confirmar o desmentir los resultados obtenidos.

4.6.1 Desplazamientos

Para el resto de cargas puntuales, según la Figura 2.2 y las cargas distribuidas mostradas en la Figura 2.3, observaremos los desplazamientos para los 5 modelos en la sección central ($x = 20$ m) para los nodos 1, 3, 5, 7, 9, 10 y 12, tal y como se muestra en las tablas que aparecen a continuación.

En ellas se representa la variación respecto a su posición de origen, el criterio de signos es el establecido por el sistema cartesiano: siendo la dirección x el sentido de la luz del puente, la dirección z la cota o canto del puente, con sentido hacia arriba y el sentido del eje y el perpendicular a ambos.

A continuación, se representará gráficamente dichas cargas para los nudos 3 y 10, pertenecientes a una misma alma centrándonos en la influencia que tiene los diferentes modelos y cargas en ella.

Valores expresados en metros (m).

Carga puntual 1										
Nodos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
	DY	DZ								
Nudo 1	0.000527	-0.096049	0.000713	-0.095666	0.000855	-0.096237	0.000973	-0.097644	0.001080	-0.099932
Nudo 3	0.000486	-0.015580	0.000680	-0.014928	0.000830	-0.014708	0.000955	-0.014870	0.001066	-0.015394
Nudo 5	0.000389	-0.007665	0.000567	-0.007619	0.000700	-0.007482	0.000808	-0.007274	0.000903	-0.006902
Nudo 7	0.000342	-0.010367	0.000511	-0.010907	0.000636	-0.011026	0.000734	-0.010775	0.000824	-0.010115
Nudo 9	0.000310	-0.011698	0.000475	-0.011924	0.000596	-0.011535	0.000692	-0.010588	0.000781	-0.009223
Nudo 10	-0.000114	-0.015521	-0.000448	-0.014570	-0.000757	-0.013808	-0.001065	-0.013203	-0.001405	-0.012709
Nudo 12	0.000050	-0.010365	-0.000310	-0.011110	-0.000648	-0.011662	-0.000985	-0.012054	-0.001355	-0.012275

Tabla 4.7 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 1

Carga puntual 2										
Nodos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ
Nudo 1	0.000335	-0.044033	0.000507	-0.043517	0.000638	-0.043711	0.000744	-0.044528	0.000835	-0.045978
Nudo 3	0.000292	-0.015516	0.000474	-0.014830	0.000615	-0.014513	0.000730	-0.014516	0.000828	-0.014792
Nudo 5	0.000213	-0.009859	0.000376	-0.009796	0.000499	-0.009684	0.000596	-0.009535	0.000677	-0.009288
Nudo 7	0.000176	-0.010254	0.000331	-0.010817	0.000446	-0.011025	0.000534	-0.010928	0.000608	-0.010515
Nudo 9	0.000146	-0.011079	0.000298	-0.011460	0.000408	-0.011321	0.000494	-0.010714	0.000568	-0.009693
Nudo 10	0.000254	-0.015440	-0.000036	-0.014611	-0.000307	-0.013931	-0.000579	-0.013367	-0.000902	-0.012829
Nudo 12	0.000386	-0.010251	0.000078	-0.010878	-0.000215	-0.011351	-0.000509	-0.011704	-0.000857	-0.011971

Tabla 4.8 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 2

Carga puntual 3										
Nodos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ
Nudo 1	0.000131	-0.015580	0.000289	-0.014928	0.000409	-0.014708	0.000503	-0.014870	0.000577	-0.015394
Nudo 3	0.000080	-0.015638	0.000262	-0.014918	0.000404	-0.014516	0.000516	-0.014377	0.000608	-0.014415
Nudo 5	0.000027	-0.012733	0.000177	-0.012649	0.000288	-0.012569	0.000374	-0.012493	0.000442	-0.012392
Nudo 7	0.000003	-0.010163	0.000145	-0.010747	0.000249	-0.011044	0.000326	-0.011104	0.000386	-0.010954
Nudo 9	-0.000024	-0.010367	0.000114	-0.010907	0.000215	-0.011026	0.000290	-0.010775	0.000348	-0.010115
Nudo 10	0.000656	-0.015422	0.000412	-0.014727	0.000182	-0.014140	-0.000050	-0.013627	-0.000360	-0.013035
Nudo 12	0.000739	-0.010159	0.000489	-0.010658	0.000249	-0.011041	0.000005	-0.011344	-0.000322	-0.011661

Tabla 4.9 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 3

Carga puntual 4										
Nodos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ
Nudo 1	0.000026	-0.008769	0.000130	-0.008256	0.000208	-0.007889	0.000268	-0.007658	0.000315	-0.007503
Nudo 3	-0.000026	-0.014597	0.000085	-0.014053	0.000171	-0.013692	0.000238	-0.013476	0.000292	-0.013326
Nudo 5	-0.000052	-0.020476	0.000044	-0.020375	0.000116	-0.020320	0.000170	-0.020299	0.000210	-0.020310
Nudo 7	-0.000068	-0.010937	0.000020	-0.011317	0.000085	-0.011528	0.000132	-0.011603	0.000164	-0.011568
Nudo 9	-0.000099	-0.008923	-0.000012	-0.009340	0.000051	-0.009471	0.000097	-0.009362	0.000128	-0.008914
Nudo 10	0.000598	-0.014532	0.000448	-0.014080	0.000307	-0.013687	0.000166	-0.013330	-0.000038	-0.012869
Nudo 12	0.000648	-0.010924	0.000499	-0.011187	0.000356	-0.011383	0.000209	-0.011536	-0.000006	-0.011728

Tabla 4.10 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 4

Carga puntual 5										
Nodos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
	DY	DZ								
Nudo 1	0.000058	-0.007665	0.000066	-0.007619	0.000073	-0.007482	0.000079	-0.007274	0.000086	-0.006902
Nudo 3	0.000018	-0.012733	0.000027	-0.012649	0.000036	-0.012569	0.000044	-0.012493	0.000054	-0.012392
Nudo 5	0.000000	-0.027619	0.000000	-0.027513	0.000000	-0.027464	0.000000	-0.027458	0.000000	-0.027503
Nudo 7	-0.000018	-0.012733	-0.000027	-0.012649	-0.000036	-0.012569	-0.000044	-0.012493	-0.000054	-0.012392
Nudo 9	-0.000058	-0.007665	-0.000066	-0.007619	-0.000073	-0.007482	-0.000079	-0.007274	-0.000086	-0.006902
Nudo 10	-0.000022	-0.012703	-0.000023	-0.012608	-0.000023	-0.012511	-0.000020	-0.012410	-0.000016	-0.012276
Nudo 12	0.000022	-0.012703	0.000023	-0.012608	0.000023	-0.012511	0.000020	-0.012410	0.000016	-0.012276

Tabla 4.11 – Desplazamientos (m) para la Carga puntual 5

Carga distribuida 1										
Nodos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ	DY	DZ
Nudo 1	0.000104	-0.011187	0.000169	-0.010923	0.000215	-0.010887	0.000250	-0.011033	0.000279	-0.011324
Nudo 3	0.000084	-0.008605	0.000150	-0.008268	0.000197	-0.008084	0.000232	-0.008028	0.000261	-0.008054
Nudo 5	0.000062	-0.007712	0.000127	-0.007668	0.000172	-0.007616	0.000206	-0.007557	0.000234	-0.007472
Nudo 7	0.000046	-0.006504	0.000109	-0.006755	0.000153	-0.006841	0.000186	-0.006788	0.000213	-0.006611
Nudo 9	0.000028	-0.006357	0.000091	-0.006542	0.000135	-0.006492	0.000167	-0.006257	0.000194	-0.005848
Nudo 10	0.000164	-0.008596	0.000037	-0.008230	-0.000072	-0.007938	-0.000165	-0.007716	-0.000269	-0.007505
Nudo 12	0.000223	-0.006500	0.000088	-0.006757	-0.000031	-0.006929	-0.000135	-0.007023	-0.000249	-0.007064

Tabla 4.12 – Desplazamientos (m) para la Carga distribuida 1

Carga distribuida 2										
Nodos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
	DY	DZ								
Nudo 1	0.000035	-0.006789	0.000036	-0.006753	0.000037	-0.006694	0.000038	-0.006617	0.000038	-0.006488
Nudo 3	0.000016	-0.007519	0.000017	-0.007475	0.000018	-0.007425	0.000019	-0.007369	0.000020	-0.007291
Nudo 5	0.000000	-0.008501	0.000000	-0.008453	0.000000	-0.008407	0.000000	-0.008362	0.000000	-0.008310
Nudo 7	-0.000016	-0.007519	-0.000017	-0.007475	-0.000018	-0.007425	-0.000019	-0.007369	-0.000020	-0.007291
Nudo 9	-0.000035	-0.006789	-0.000036	-0.006753	-0.000037	-0.006694	-0.000038	-0.006617	-0.000038	-0.006488
Nudo 10	-0.000027	-0.007513	-0.000023	-0.007459	-0.000019	-0.007400	-0.000014	-0.007336	-0.000009	-0.007252
Nudo 12	0.000027	-0.007513	0.000023	-0.007459	0.000019	-0.007400	0.000014	-0.007336	0.000009	-0.007252

Tabla 4.13 – Desplazamientos (m) para la Carga distribuida 2

Carga distribuida 3										
Nodos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
	DY	DZ								
Nudo 1	0.000041	-0.010755	0.000042	-0.010711	0.000044	-0.010685	0.000045	-0.010672	0.000047	-0.010684
Nudo 3	0.000022	-0.007589	0.000024	-0.007548	0.000025	-0.007501	0.000027	-0.007448	0.000028	-0.007373
Nudo 5	0.000000	-0.006923	0.000000	-0.006883	0.000000	-0.006825	0.000000	-0.006752	0.000000	-0.006634
Nudo 7	-0.000022	-0.007589	-0.000024	-0.007548	-0.000025	-0.007501	-0.000027	-0.007448	-0.000028	-0.007373
Nudo 9	-0.000041	-0.010755	-0.000042	-0.010711	-0.000044	-0.010685	-0.000045	-0.010672	-0.000047	-0.010684
Nudo 10	-0.000033	-0.007583	-0.000027	-0.007528	-0.000022	-0.007468	-0.000016	-0.007403	-0.000010	-0.007318
Nudo 12	0.000033	-0.007583	0.000027	-0.007528	0.000022	-0.007468	0.000016	-0.007403	0.000010	-0.007318

Tabla 4.14 – Desplazamientos (m) para la Carga distribuida 3

Para el nudo 3, los desplazamientos en dirección 'y' y en dirección 'z' son los siguientes:

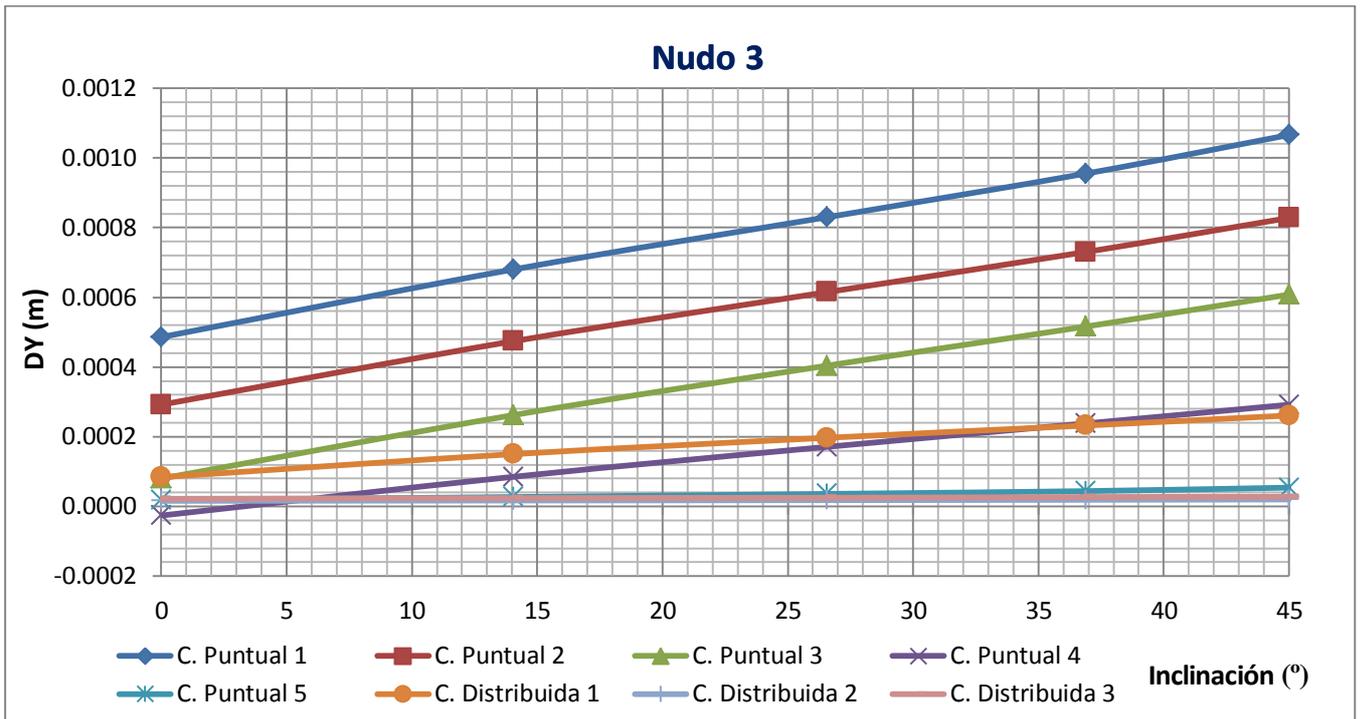


Figura 4.59 – DY (m) en función de la inclinación (°) en el nudo 3

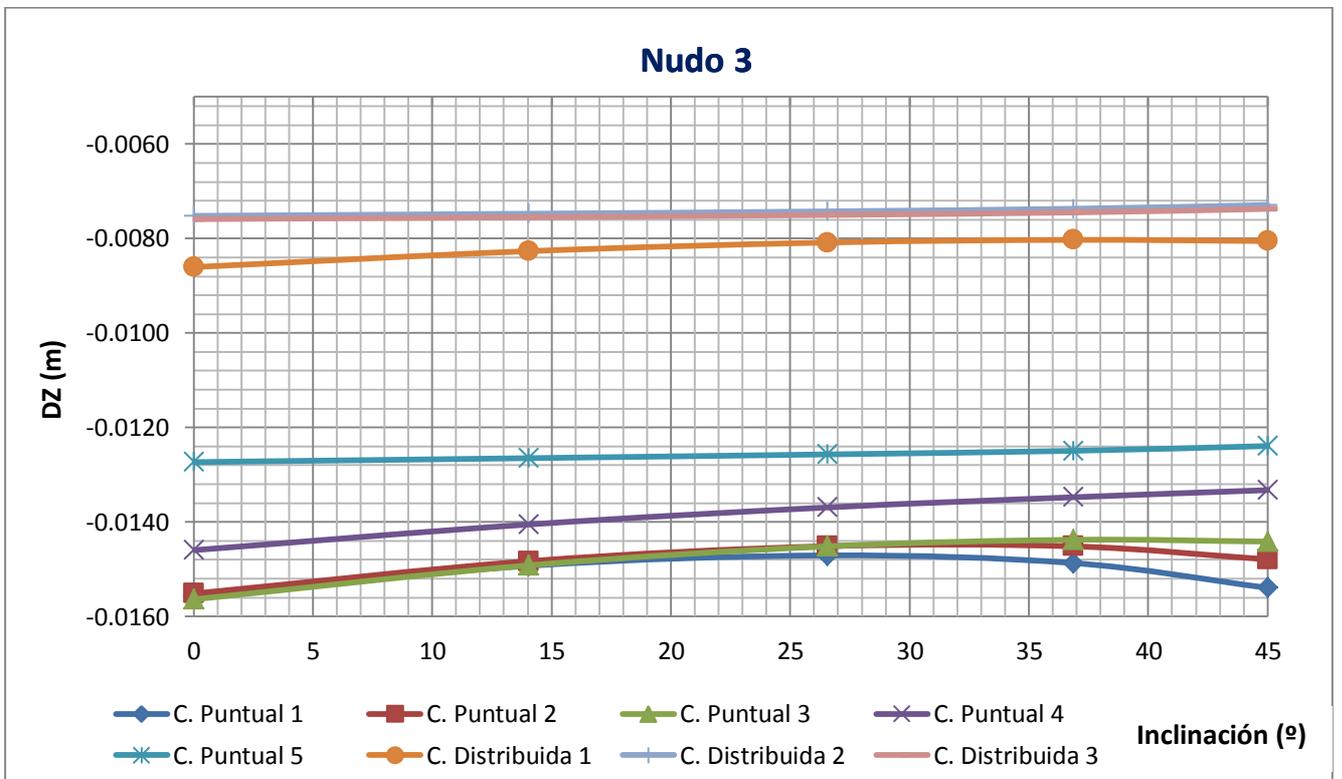


Figura 4.60 – DZ (m) en función de la inclinación (°) en el nudo 3

Para el nudo 10, los desplazamientos en dirección 'y' y en dirección 'z' son los siguientes:

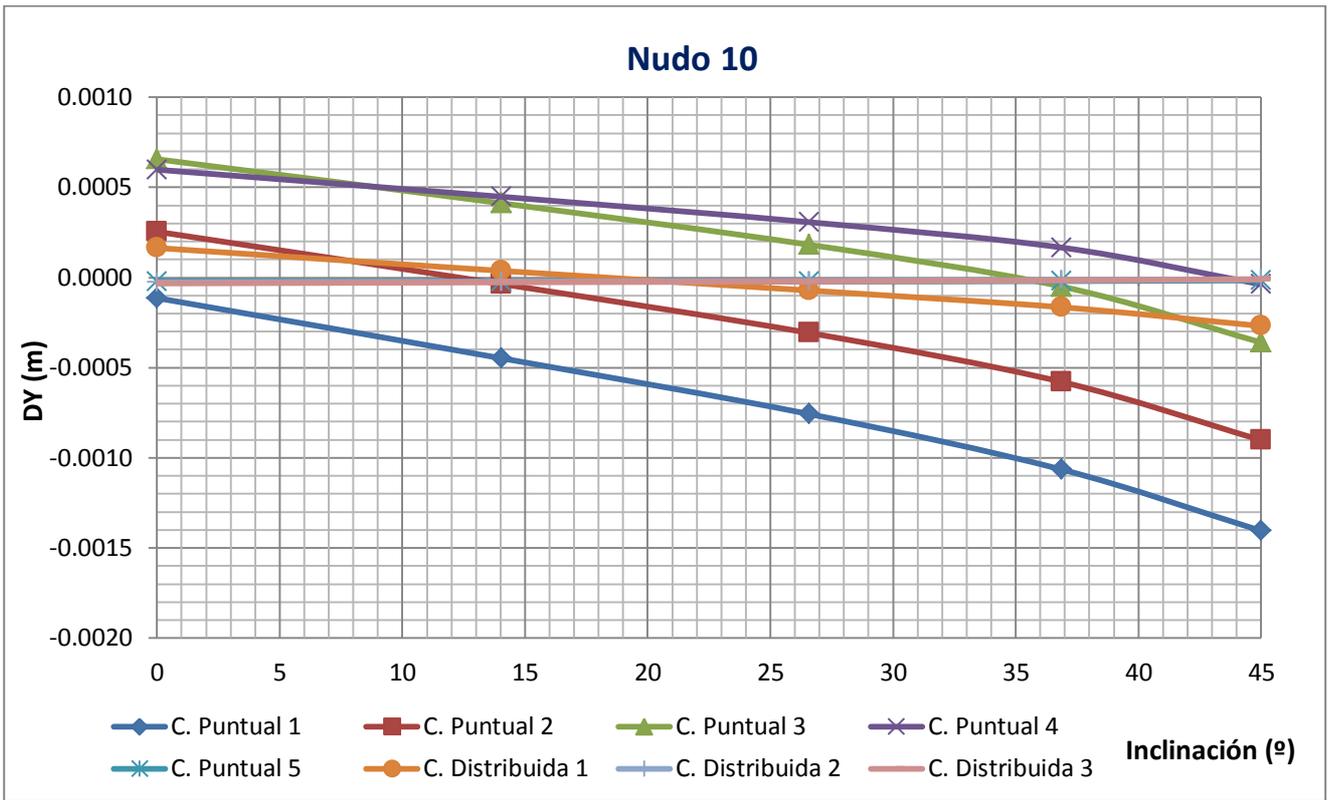


Figura 4.61 – DY (m) en función de la inclinación (°) en el nudo 3

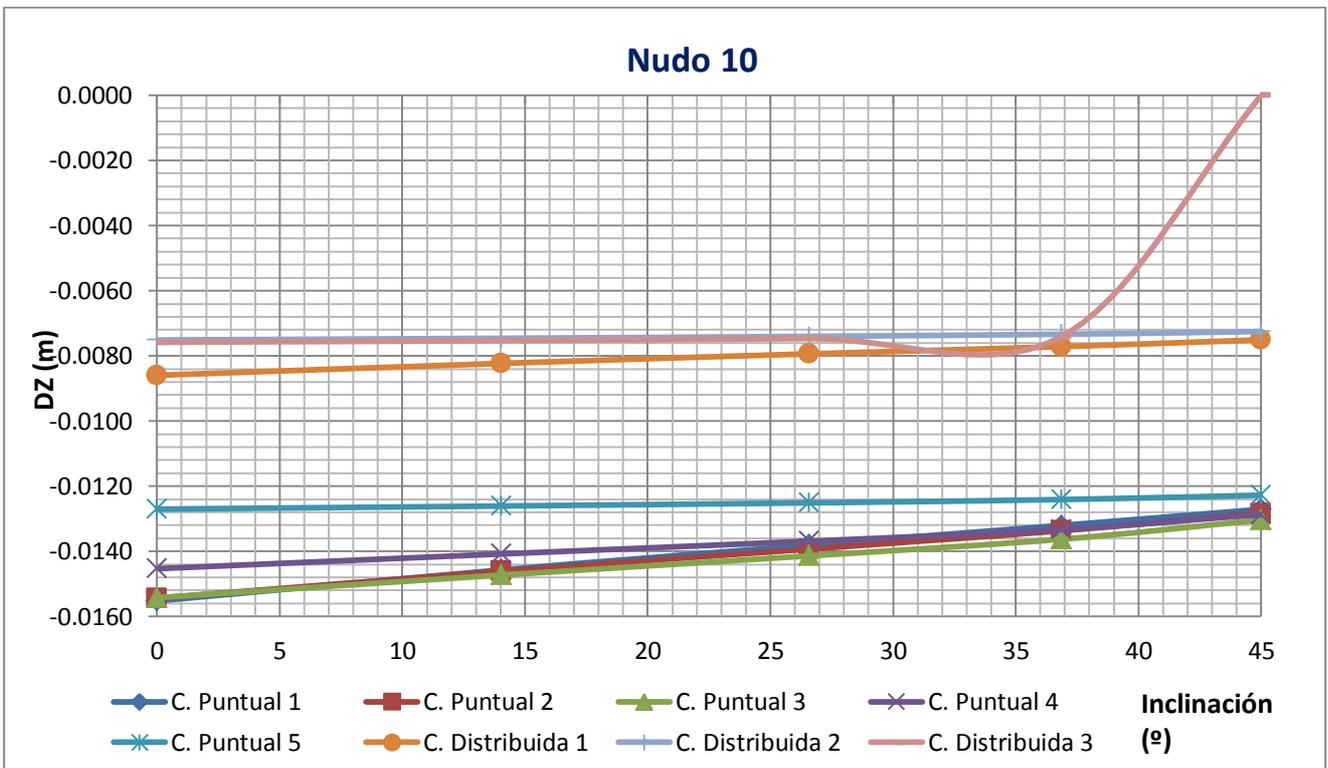


Figura 4.62 – DZ (m) en función de la inclinación (°) en el nudo 10

En base a las tablas y gráficos anteriores, podemos concluir:

- Las cargas distribuidas presentan desplazamientos (tanto desplazamientos verticales como transversales) **mucho menores que los obtenidos por las cargas puntuales.**

- Los desplazamientos verticales (DZ) son similares entre sí, manteniendo valores pseudoconstantes aunque se suelen reducir a lo largo que 'progresa' la inclinación. Sin embargo, no lo podemos achacar a la influencia de la inclinación sino a la inercia a flexión que tienen los diferentes modelos (donde aumentan ligeramente la inercia a flexión a medida que se va inclinando)

El modelo 1 tiene una inercia a flexión de 3.538 m^4 que va aumentando hasta el modelo 5, el cual tiene un valor de 3.663 m^4 . Esta ligera mejora prácticamente despreciable influye en la tendencia de los valores obtenidos siendo por tanto menores cuando se aumenta la inclinación.

Por lo tanto, **los desplazamientos verticales no dependen de la inclinación de las almas.**

- Los desplazamientos transversales (DY) en la losa superior, concretamente en el nudo 3, aumentan a medida que aumenta la inclinación. Además, se alcanzan mayores valores a medida que aumenta la excentricidad de la carga.

En la losa inferior, concretamente en el nudo 10, sigue la tendencia anterior pero no hay una relación entre el aumento de excentricidad y aumento del valor del desplazamiento; sino que existe una relación entre la inclinación del alma y la excentricidad de la carga.

Como se observa en la Figura 4.61 donde representamos los valores DY en el nodo 10, la carga puntual 1, cuya excentricidad es máxima alcanza su valor óptimo cuando la inclinación del alma es nula. La carga puntual 2, alcanza su óptimo con el segundo modelo aproximadamente; la carga puntual 3 lo alcanza con el cuarto modelo, la carga puntual 4 para el quinto modelo y para la carga 5, la inclinación es indiferente (ya que está colocada en el centro de la sección, y los únicos movimientos generados se deben a las condiciones de contorno, siendo antisimétricos los valores de la sección).

Lo mismo ocurre para las cargas distribuidas, donde en los casos 2 y 3, es indiferente por la condición de simetría (donde los valores obtenidos son causados por las condiciones de apoyo siendo los valores antisimétricos) y para la carga distribuida 1, tiene su óptimo entre el modelo 2 y 3.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que la inercia a torsión es mucho mayor en el modelo 1 que en el modelo 5. Por lo tanto:

Los desplazamientos transversales son inversamente proporcionales de la inercia a torsión de la sección, siendo mayores en aquellas secciones que presenten menores inercias torsionales. Además, **existe una relación inversamente proporcional entre la inclinación de las alas y la excentricidad de las cargas que consiga optimizar el mínimo valor del desplazamiento transversal.**

4.6.2 Distorsión

En el estudio de la distorsión, en el Capítulo 3, planteábamos diferentes situaciones para las cargas puntuales, obteniendo que el modelo 1, en las alas mantenían casi constante el valor de la distorsión alcanzado sobre las almas; sin embargo, para el modelo 4, esta variación aumentaba a medida que nos alejábamos del centro de gravedad de la sección, es decir, el valor máximo se alcanzaba cuando la carga estaba situada en el extremo del alma.

¿Es cierto que la inclinación recomendable es aproximadamente 25° como hallamos anteriormente?

De cualquier forma, sabemos que la distorsión máxima se produce en la sección central, ya sea para las diferentes cargas puntuales o sean las cargas distribuidas planteadas. Por tanto para los diferentes modelos obtendremos la distorsión en la sección central para los diferentes tipos de cargas.

Tomaremos las diferentes cargas puntuales, según la Figura 2.2 y la carga distribuida 1, según la Figura 2.3 para todos los modelos en la sección central (el resto de cargas distribuidas al ser simétricas, la distorsión es nula).

Cargas	Distorsión en la sección central				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Cargas Puntuales					
Carga 1	0.00108709	0.00117268	0.00130290	0.00148453	0.00173531
Carga 2	0.00093292	0.00090372	0.00102058	0.00118350	0.00139769
Carga 3	0.00122285	0.00086472	0.00075902	0.00091399	0.00110232
Carga 4	0.00094067	0.00072466	0.00056374	0.00050449	0.00057138
Carga 5	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
Carga Distribuida 1	0.00041400	0.00030727	0.00034371	0.00039935	0.00047975

Tabla 4.15 – Distorsión (rad) en la sección central para las diferentes cargas en los modelos

En la Tabla 4.15, se puede observar esta variación, donde en la Figura 4.63, aparece la representación gráfica de estos valores según los valores. En el eje de abscisas hemos representado, la inclinación de las cargas en grados mientras que en eje de ordenadas, la distorsión que provoca las diferentes cargas.

En base a los resultados podemos concluir:

No hay un rango de inclinación recomendable exactamente definido que englobe todas las cargas.

La distorsión, entre otros factores, conocemos que depende de la excentricidad de la carga. En base a esta premisa, con los resultados obtenidos: **Hay una relación inversamente proporcional entre la excentricidad de la carga y el valor óptimo de inclinación del alma, es decir, a mayor excentricidad de la carga, las secciones que tienen mejor comportamiento respecto a la distorsión son aquellas con almas con rectas o poca inclinación, mientras que para cargas poco excéntricas actúan mejor secciones con almas más inclinadas.**

Como se puede observar en la Figura 4.63, la carga 1 es la más excéntrica (se encuentra en el extremo de una de sus almas) ante tal carga la sección que mejor se comporta es el Modelo 1, cuya inclinación es nula. Para la carga 2, situada en la mitad del ala, se comporta mejor el Modelo 2 que tiene cierta inclinación (14, 036°) y le sigue el Modelo 1, sin embargo, el resto de modelos que tienen mayor inclinación se comporta cada vez peor, obteniendo mayores valores de distorsión cuanto mayor sea su inclinación.

Para la carga 3, situada en sobre el alma, es aquella que ya hemos estudiado, donde la tendencia sigue en la línea estudiada: El óptimo tiene una inclinación media entre los modelos estudiados. La siguiente, la Carga 4, cuya excentricidad es menor, resulta óptima las secciones con mayor inclinaciones de almas. Por último, la Carga 5, al estar situada sobre el centro de gravedad, es decir, sin excentricidad, es indiferente la inclinación de la carga (aunque teóricamente siguiendo la tendencia sería mejor aquellas con inclinaciones mayores).

Por otra parte las cargas distribuidas, concretamente la carga distribuida 1, provoca distorsiones mucho menores que cuando se trata de cargas puntuales. Sigue la misma tendencia mencionada para las cargas puntuales, la resultante que se obtendría para dicha carga recaería sobre el alma, por lo que la sección más apropiada sería la del modelo 3, sin embargo, resulta que la más apropiada es la del modelo 2, concluyendo que sigue la misma tendencia pero de forma más suave, es decir, la influencia que tiene las diferentes inclinaciones es menor y el óptimo requiere menores inclinaciones que requeriría la misma carga puntual (es más acusada la relación inversamente proporcional, requiere menor inclinación cuanto más excéntrica sea la carga puntual (tomando la resultante de dicha carga como valor de excentricidad)).

Las cargas puntuales provocan mayores distorsiones que las cargas distribuidas, además, la influencia que tienen la inclinación de las almas es más determinante en dicha distorsión para las cargas puntuales ya que en las cargas distribuidas la inclinación de sus almas no es tan determinante (alcanzan valores similares todos los modelos bajo la misma carga distribuida) , requieren mayor inclinación para conseguir la inclinación óptima que requerirían las cargas distribuidas, no siendo tan acusada la relación inversamente proporcional tal y como denota la carga distribuida.

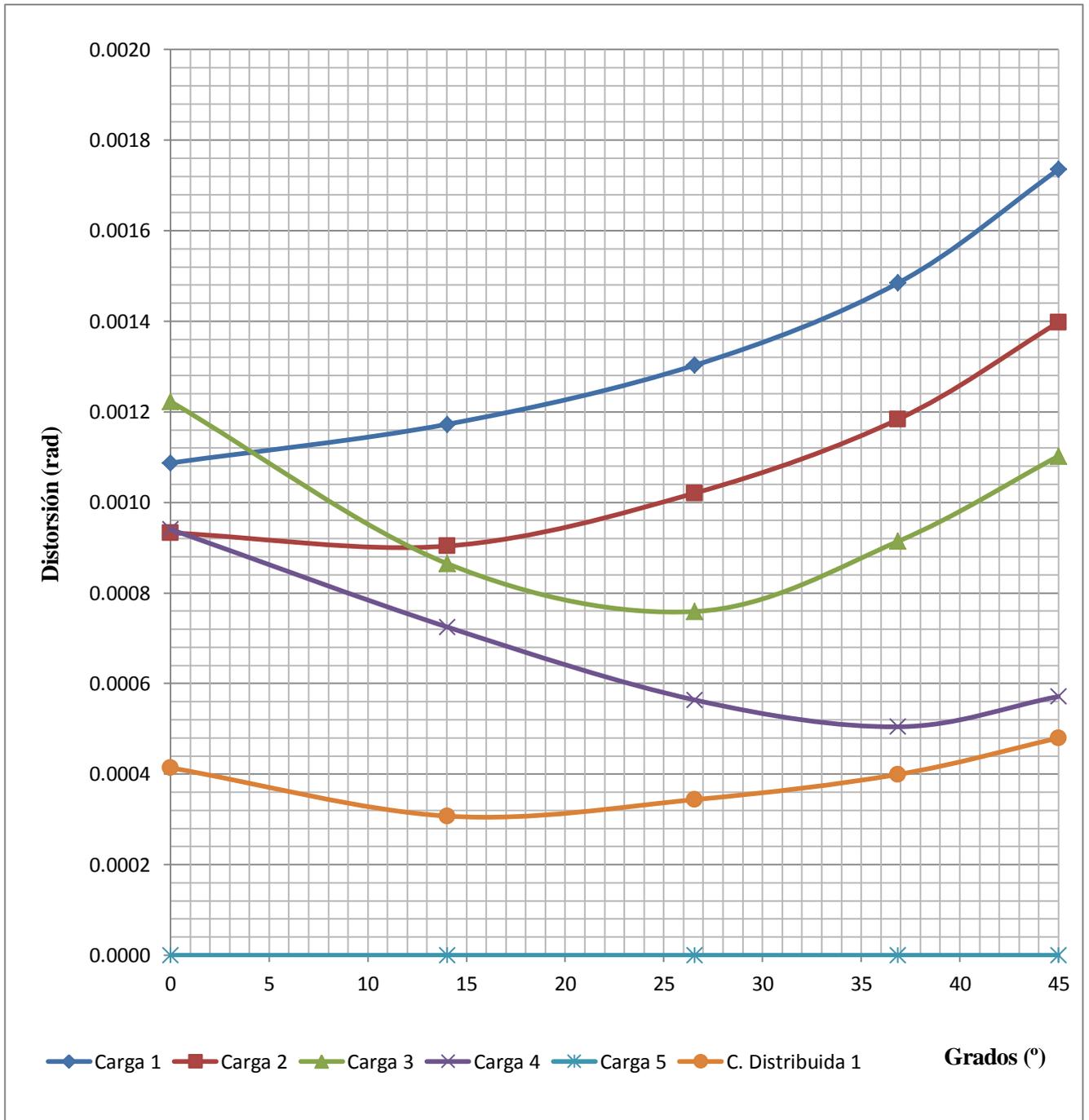


Figura 4.63 – Distorsión en la sección central para las diferentes cargas en los modelos

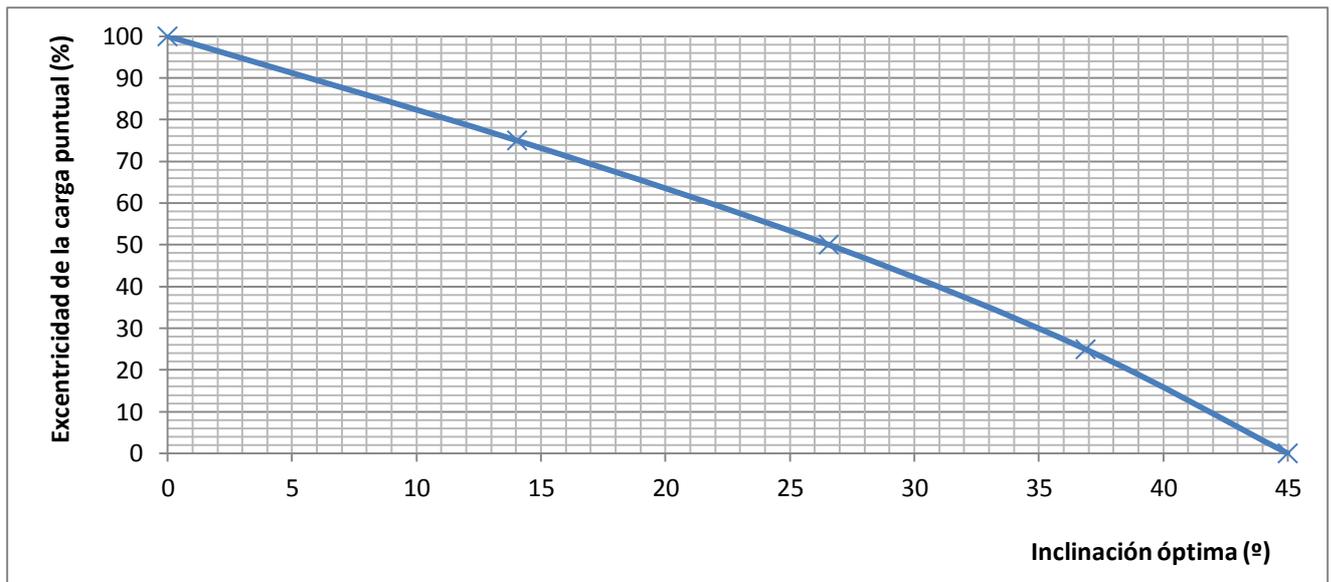


Figura 4.64 – Inclinación óptima en función de la excentricidad de la carga

En la Figura 4.64, aparece la inclinación óptima de la sección para las cargas puntuales. Como se puede apreciar, cuanto mayor sea la excentricidad de la carga, la inclinación óptima para dicha carga será una sección lo menos inclinada posible. Corroborando las conclusiones obtenidas anteriormente.

Para las cargas distribuidas, sigue la misma ley lineal aunque desplazada hacia la izquierda, es decir, para las mismas excentricidades de carga, la inclinación óptima de la sección es menor. Por ejemplo, cuando la excentricidad es del 50%, la inclinación óptima para la carga distribuida sería aproximadamente 15 °, mientras que para cargas puntuales se requiere un 25° de inclinación. **Hay un desfase del 10° aproximadamente.**

La excentricidad viene expresada en porcentaje, siendo el 100 %, lo más alejada posible, es decir, en el extremo del ala y siendo una excentricidad del 0%, cuando la carga se sitúa en el centro de la sección, sin excentricidad.

4.6.3 Tensiones

Para corroborar que las conclusiones obtenidas en las tensiones para dicha carga puntual se verifican para cualquier carga, ya sea puntual o distribuida, observaremos la variación que se produce en los puntos más significativos de los modelos para los diferentes tipos de cargas puntuales y cargas distribuidas.

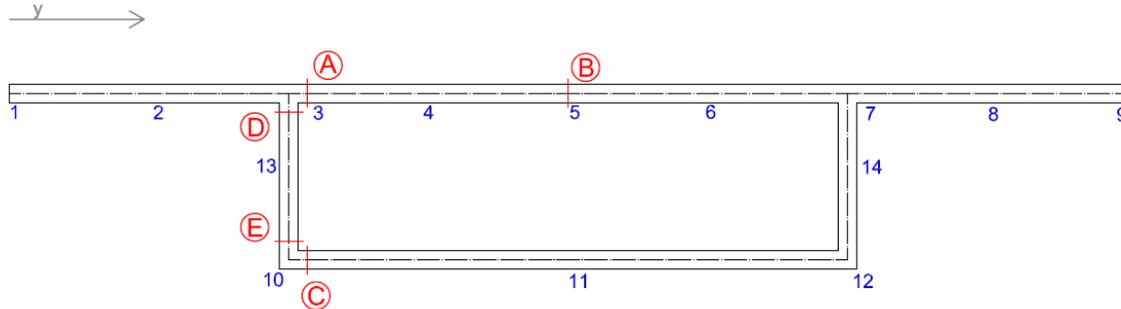


Figura 4.65 – Secciones tensionales más importantes

En la Figura 4.65, se representan las secciones más representativas. Para las tensiones longitudinales, utilizaremos las secciones ‘A’, ‘B’ y ‘C’, pertenecientes a los nudos 3, 5 y 10 respectivamente. Para las tensiones transversales, nos centraremos en las secciones ‘D’ y ‘E’, cuyos nudos corresponden al 3 y 10.

Tensiones longitudinales:

En las tensiones longitudinales nos detendremos en la sección central, ya que es la sección más desfavorable. Observando las tensiones provocadas en las inmediaciones del nudo 3, 5 y 10 de la sección, correspondientes a la losa superior e inferior respectivamente, tal y como muestra la Figura 4.65.

Para las diferentes tipos de cargas y modelos en dichas secciones se tienen los siguientes valores de tensiones longitudinales (kN/m²):

Sección A								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	-751.0	-1780.0	-10200.0	13.9	-27.4	-1110.0	-919.0	-1060.0
Modelo 2	-449.0	-1490.0	-9320.0	249.0	29.7	-1010.0	-905.0	-1040.0
Modelo 3	-177.0	-1250.0	-8940.0	406.0	67.9	-947.0	-891.0	-1030.0
Modelo 4	57.1	-1060.0	-8890.0	516.0	90.9	-903.0	-877.0	-1010.0
Modelo 5	227.0	-930.0	-9070.0	620.0	96.3	-866.0	-863.0	-991.0

Tabla 4.16 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección A

Sección B								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	-204.0	-866.0	-2260.0	-10700.0	-55300.0	-1190.0	-1360.0	-1020.0
Modelo 2	-220.0	-882.0	-2270.0	-10700.0	-55300.0	-1190.0	-1360.0	-1010.0
Modelo 3	-202.0	-879.0	-2290.0	-10700.0	-55300.0	-1180.0	-1350.0	-1000.0
Modelo 4	-158.0	-860.0	-2320.0	-10700.0	-55300.0	-1170.0	-1350.0	-990.0
Modelo 5	-72.4	-817.0	-2340.0	-10800.0	-55400.0	-1150.0	-1330.0	-968.0

Tabla 4.17 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección B

Sección C								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	4830.0	5200.0	5820.0	5100.0	3690.0	1860.0	1690.0	1700.0
Modelo 2	4520.0	4860.0	5380.0	4720.0	3480.0	1780.0	1670.0	1690.0
Modelo 3	4210.0	4480.0	4800.0	4200.0	3170.0	1700.0	1610.0	1670.0
Modelo 4	3860.0	3970.0	4040.0	3510.0	2780.0	1600.0	1530.0	1640.0
Modelo 5	3410.0	3280.0	3020.0	2610.0	2340.0	1460.0	1400.0	1560.0

Tabla 4.18 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección C

La representación gráfica de los valores anteriores, aparece en las figuras que aparecen a continuación:

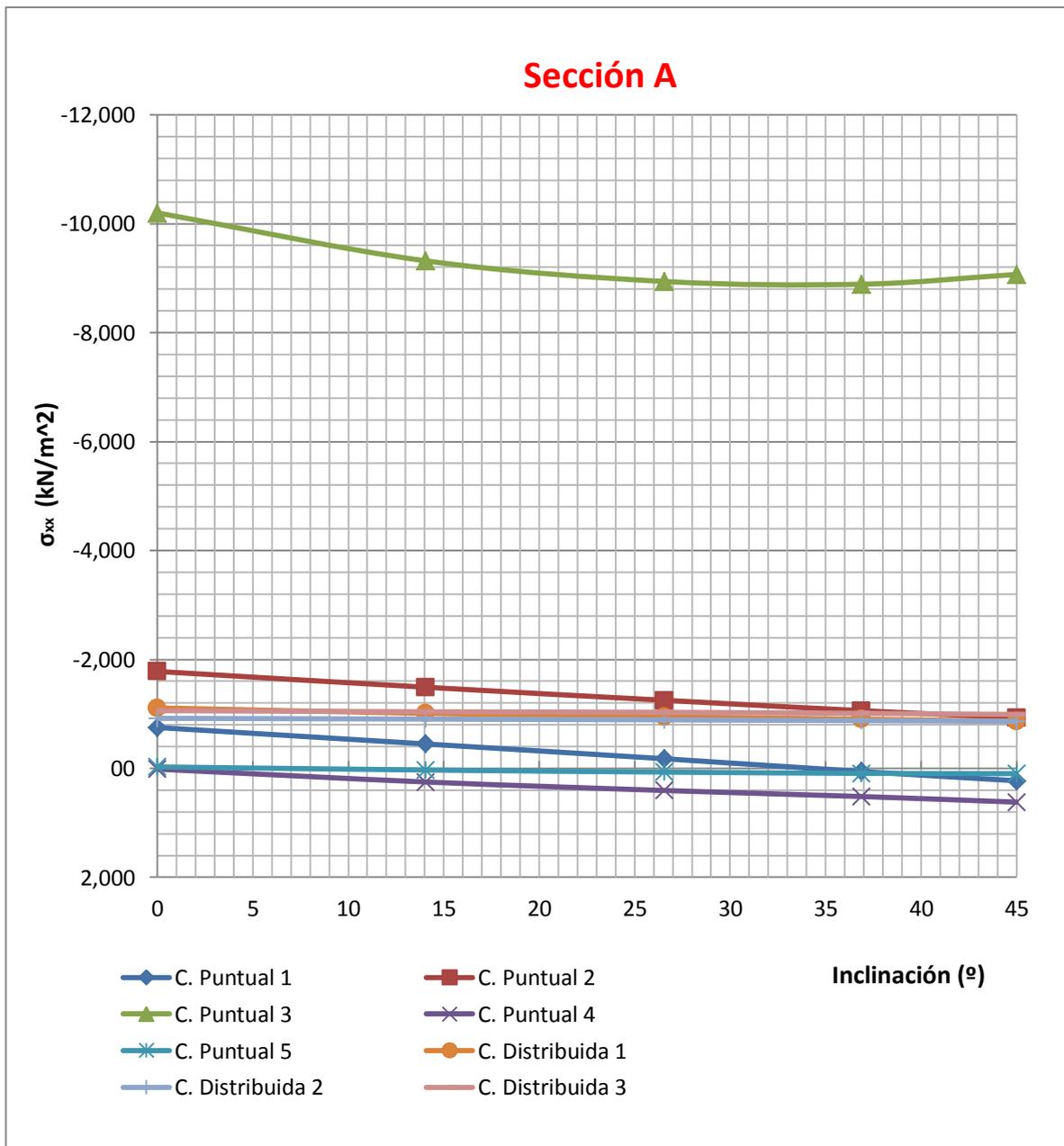


Figura 4.66 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección A

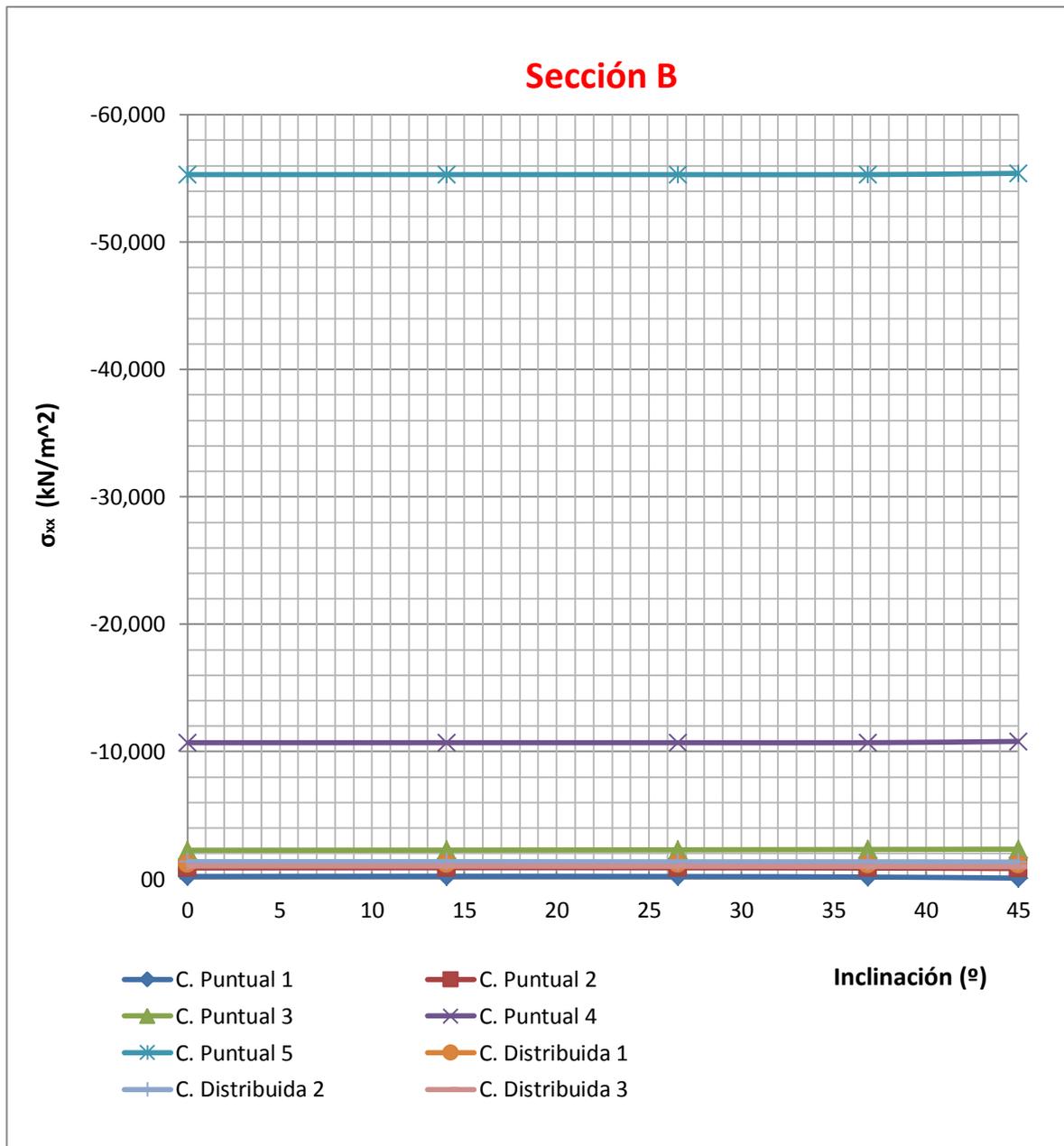


Figura 4.67 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección B

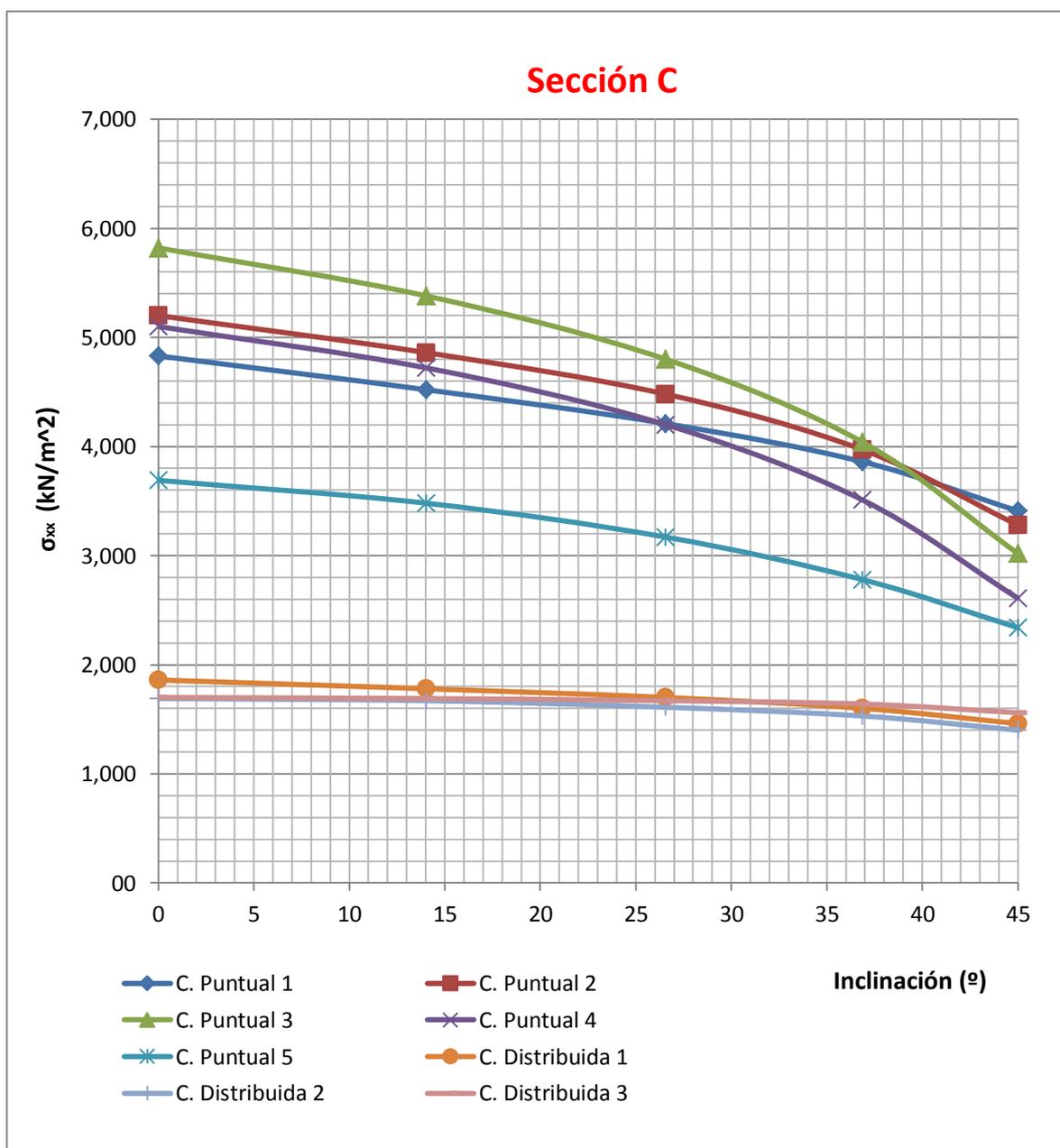


Figura 4.68 – Distribución de σ_{xx} (kN/m²) en la sección C

Conclusiones:

Las cargas que se encuentran cerca de las secciones seleccionadas presentan **picos tensionales muy altos, denotando la gran perturbación que provoca las cargas puntuales**. Mientras que las cargas distribuidas presentan valores más homogéneos y bajos sin presentar este fenómeno. Además, cuanto más lejano se encuentre la carga del punto estudiado menor será su influencia (y por tanto su valor).

Los valores se van atenuando a medida que se incrementa la inclinación del alma. Especialmente en la losa inferior se aprecia este fenómeno para todas las cargas; donde para las cargas puntuales esta relación es mayor (es decir, la inclinación de las almas influye más en la distribución de tensiones ya que en dichas cargas se provoca una redistribución entre tensiones longitudinales y tangenciales debido a la gran perturbación puntual que se produce (en las cargas distribuidas no ocurre este fenómeno)). Para las cargas distribuidas, también se atenúan los valores pero de forma más suave (es decir, la influencia de la inclinación de las almas no es tan determinante).

Por lo tanto, los valores de tensiones longitudinales son menores gracias a la redistribución a tensiones tangenciales, que causa la progresiva inclinación.

Tensiones tangenciales:

Para observar la influencia para los diferentes tipos de cargas, nos detendremos en la sección más próxima ante cargas puntuales, es decir, en la sección $x = 19.5$ m; mientras que cuando se trata de cargas distribuidas, la sección más desfavorable se encuentra en los extremos del modelo, es decir, en la sección $x = 0$ m. Por lo tanto, estas serán las secciones evaluadas dependiendo de las cargas.

Las evaluaremos en las secciones inmediatas a los nudos 3 y 10 correspondientes al alma (sección 'D' y 'E' respectivamente).

Sección D								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	-1550.0	-2030.0	-608.0	1480.0	585.0	-513.0	44.6	-518.0
Modelo 2	-1560.0	-2070.0	-845.0	1450.0	576.0	-539.0	41.2	-519.0
Modelo 3	-1600.0	-2120.0	-1070.0	1420.0	573.0	-573.0	40.9	-525.0
Modelo 4	-1650.0	-2180.0	-1280.0	1400.0	573.0	-617.0	43.3	-533.0
Modelo 5	-1730.0	-2280.0	-1490.0	1400.0	585.0	-671.0	56.0	-550.0

Tabla 4.19 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²) en la sección D

Sección E								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	273.0	223.0	-163.0	-325.0	-177.0	-39.1	-130.0	54.3
Modelo 2	204.0	148.0	-209.0	-321.0	-173.0	-142.0	-165.0	6.3
Modelo 3	111.0	53.0	-245.0	-299.0	-157.0	-245.0	-192.0	-52.5
Modelo 4	17.4	-38.5	-265.0	-269.0	-128.0	-344.0	-208.0	-121.0
Modelo 5	-47.9	-95.1	-249.0	-224.0	-96.2	-428.0	-218.0	-179.0

Tabla 4.20 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²) en la sección E

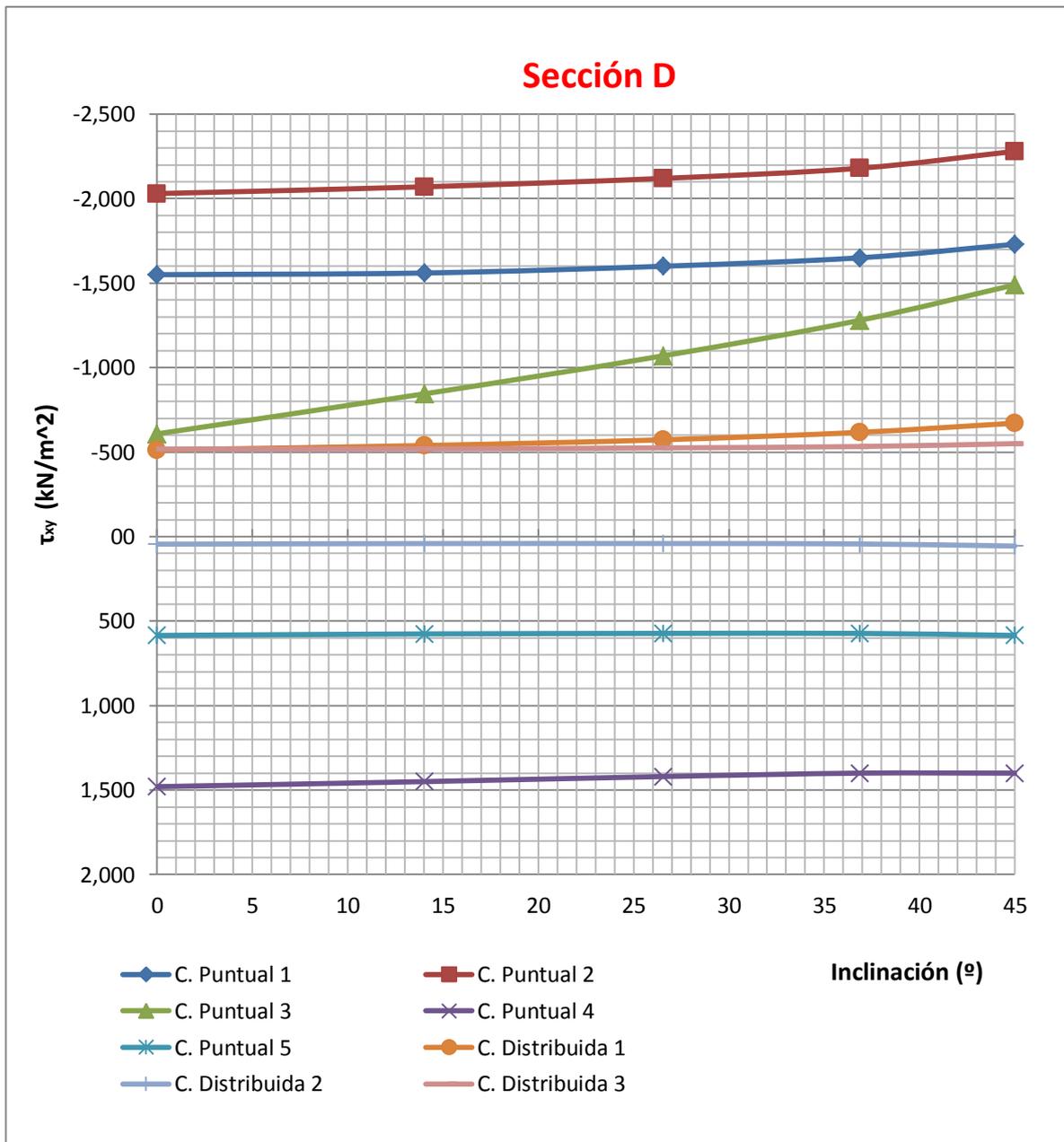


Figura 4.69 – Distribución de τ_{xy} (kN/m²) en la sección D

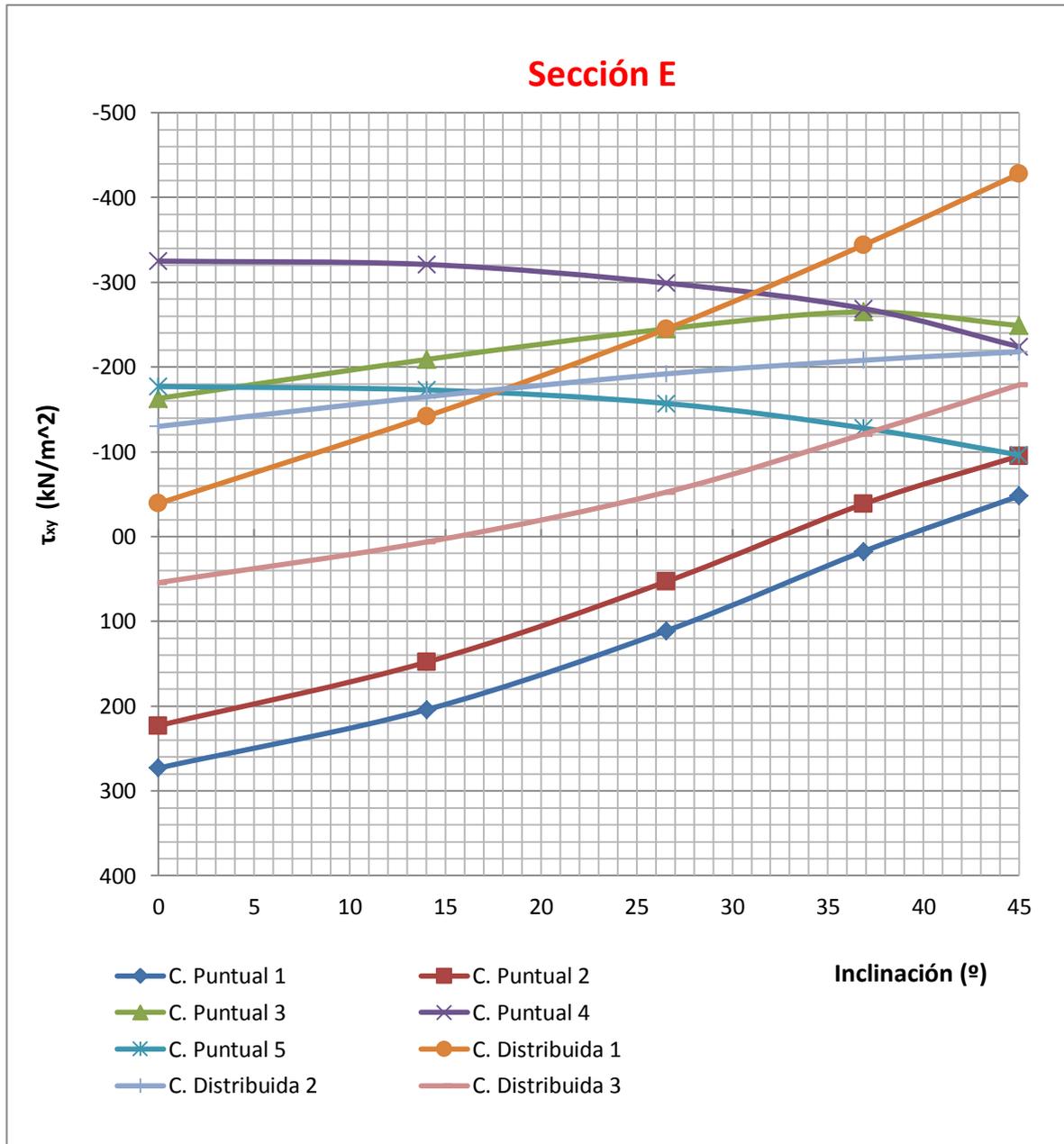


Figura 4.70 – Distribución de τ_{xy} (kN/m^2) en la sección E

Conclusiones de las tensiones tangenciales:

Las cargas puntuales provocan un incremento notable en las tensiones tangenciales si comparamos las que provocan las cargas distribuidas, donde se puede observar en las figuras superiores que las cargas distribuidas están más cercanas al valor cero que si se trata de las cargas puntuales (sea cual sea la posición de éstas).

Por otra parte, en la parte superior del alma, sección 'D', **se produce un incremento de tensiones tangenciales a medida que la sección tiene las almas más inclinadas** como dijimos anteriormente, mientras que en la sección 'E' esta redistribución no se ve tan clara aunque sigue la misma tendencia.

Por lo tanto, el resto de cargas, ya sean puntuales o distribuidas, corroboran los resultados obtenidos en el apartado 4.4.

En base a los resultados de las tensiones longitudinales y tangenciales podemos concluir

La inclinación progresiva de las almas se traduce en una redistribución de las tensiones, las tensiones longitudinales van disminuyendo a medida que aumentan las tensiones tangenciales.

Este hecho se aprecia de forma **más determinante en los casos de las cargas puntuales**, donde la relación establecida entre las tensiones y la inclinación de almas se puede apreciar de una manera más clara que cuando se trata de cargas distribuidas, que siguen la misma tendencia pero no tienen tanta importancia.

Las cargas distribuidas no producen los picos tensionales que generan las cargas puntuales, por lo que la redistribución de tensiones que se produce en las inmediaciones de dicha carga no existe. Por lo tanto, la influencia de la inclinación o no de almas para cargas distribuidas es bastante menor que cuando se trata para cargas puntuales.

Además, **la progresiva inclinación de almas se traduce en la aparición de otros esfuerzos, causados por la descomposición de la carga** (como aparece en el apartado 4.5 y 4.6.4 de este capítulo); donde la distribución de ambas tensiones son fundamentales para determinar su real influencia ante la inclinación de las almas.

4.6.4 Esfuerzos

Para la comprobación de las conclusiones obtenidas anteriormente, comprobaremos la influencia para el resto de cargas en las secciones más interesantes para cada esfuerzo estudiado.

Momentos flectores transversales (M_y):

Los momentos flectores actúan principalmente sobre la losa superior e inferior. Por ello, para la comprobación de las diferentes cargas observaremos la variación que se produce en varios puntos (secciones de la sección). Se ha escogido los nudos 3, 5 y 10, cuyas secciones estudiadas son las denominadas 'A', 'B' y 'C' según la Figura 4.65. También para ver la influencia sobre las almas, se estudiarán las secciones 'D' y 'E'.

A continuación aparecen las tablas de dichas secciones para las diferentes cargas y modelos. Posteriormente, aparece la representación gráfica de dichos valores pudiendo obtener las conclusiones finales.

Los valores están expresados en $kN \cdot m/m$.

Sección A								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	-23.022	-15.042	16.336	25.407	-2.325	0.961	0.118	0.346
Modelo 2	-24.230	-16.094	15.372	24.652	-2.414	0.453	0.109	0.342
Modelo 3	-25.524	-16.969	15.773	24.494	-2.297	0.075	0.106	0.324
Modelo 4	-26.860	-17.688	17.185	24.764	-2.015	-0.185	0.108	0.294
Modelo 5	-28.078	-18.195	19.027	25.076	-1.569	-0.382	0.122	0.238

Tabla 4.21 – Distribución de M_y ($kN \cdot m/m$) en la sección A

Sección B								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	-11.178	-6.668	2.775	58.904	356.452	1.477	2.614	0.340
Modelo 2	-11.149	-6.664	2.731	58.821	356.363	1.470	2.604	0.336
Modelo 3	-11.304	-6.753	2.757	58.909	356.460	1.460	2.601	0.318
Modelo 4	-11.592	-6.901	2.846	59.130	356.700	1.446	2.604	0.289
Modelo 5	-12.095	-7.141	2.988	59.491	357.107	1.425	2.618	0.232

Tabla 4.22 – Distribución de M_y ($kN \cdot m/m$) en la sección B

Sección C								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	14.116	12.359	8.062	2.234	-0.245	2.429	0.803	1.244
Modelo 2	18.934	16.539	11.011	3.327	0.094	3.047	1.364	2.146
Modelo 3	25.883	22.766	16.408	6.655	2.068	4.344	2.699	4.055
Modelo 4	37.986	35.091	30.192	18.740	11.339	8.424	6.805	8.807
Modelo 5	78.544	78.226	79.754	67.549	55.898	26.038	24.370	26.837

Tabla 4.23 – Distribución de M_y ($kN \cdot m/m$) en la sección C

Sección D								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	45.733	33.206	1.926	-21.986	-16.280	1.651	-1.429	2.151
Modelo 2	42.947	30.348	-2.535	-23.541	-16.717	0.981	-1.633	1.865
Modelo 3	40.175	27.652	-5.634	-24.426	-16.829	0.524	-1.768	1.578
Modelo 4	37.733	25.323	-7.061	-24.820	-16.749	0.243	-1.839	1.330
Modelo 5	38.919	25.495	-11.834	-26.952	-18.056	0.146	-2.022	1.367

Tabla 4.24 – Distribución de My (kN·m/m) en la sección D

Sección E								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	8.724	5.285	-2.758	-7.629	-4.289	-0.542	-0.362	0.543
Modelo 2	5.229	2.283	-4.701	-7.868	-3.939	-0.892	-0.497	0.156
Modelo 3	1.903	-0.255	-5.711	-7.206	-3.001	-0.973	-0.520	-0.292
Modelo 4	-0.214	-1.594	-5.629	-5.991	-1.853	-0.885	-0.471	-0.710
Modelo 5	-3.991	-3.600	-4.112	-2.544	0.306	-0.780	-0.315	-1.165

Tabla 4.25 – Distribución de My (kN·m/m) en la sección E

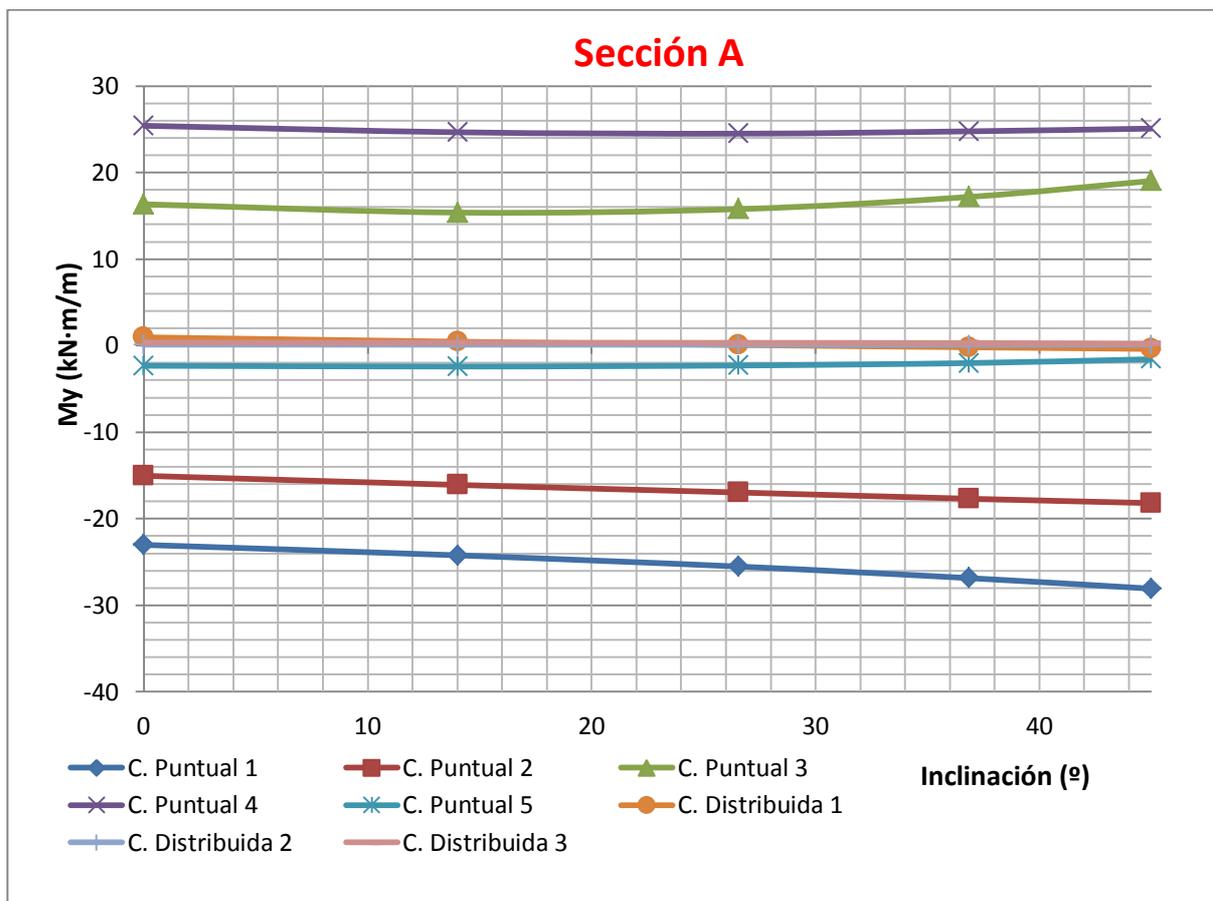


Figura 4.71 – Distribución de My (kN·m/m) en la sección A

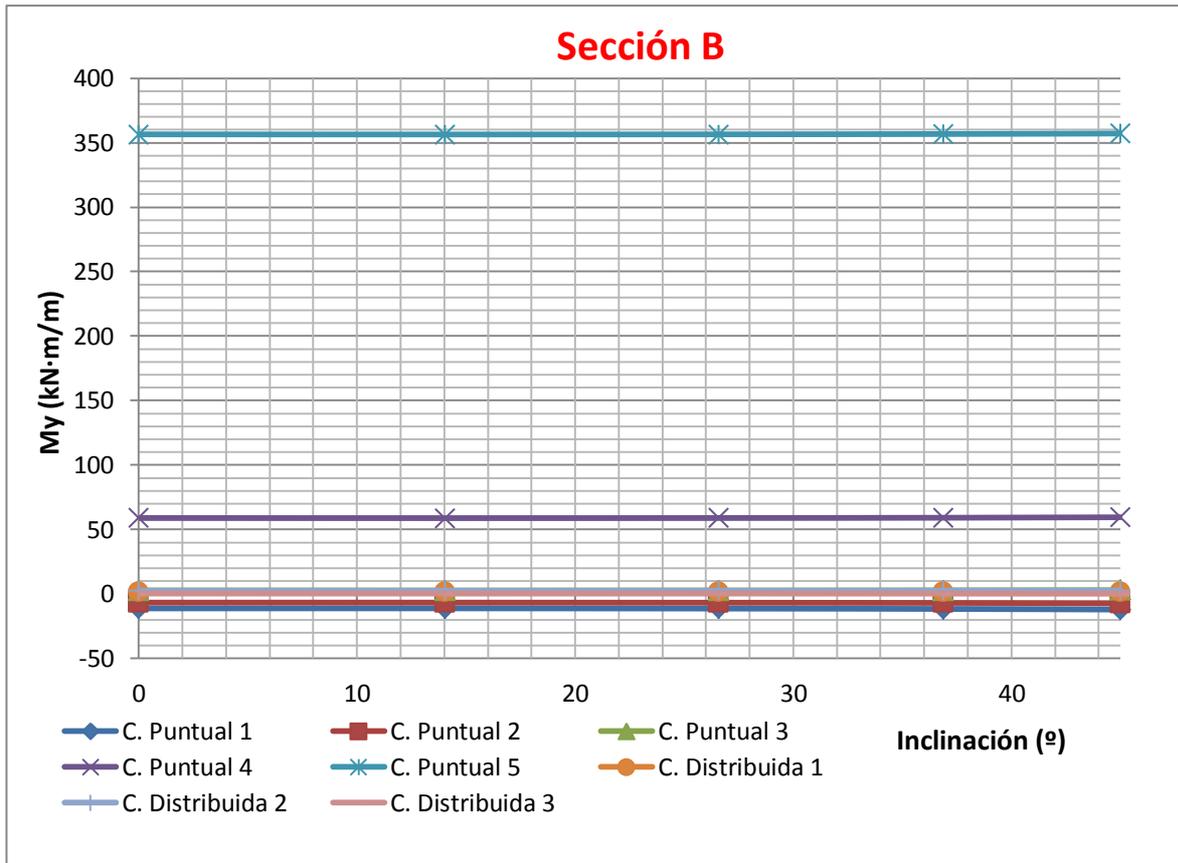


Figura 4.72 – Distribución de My (kN·m/m) en la sección B

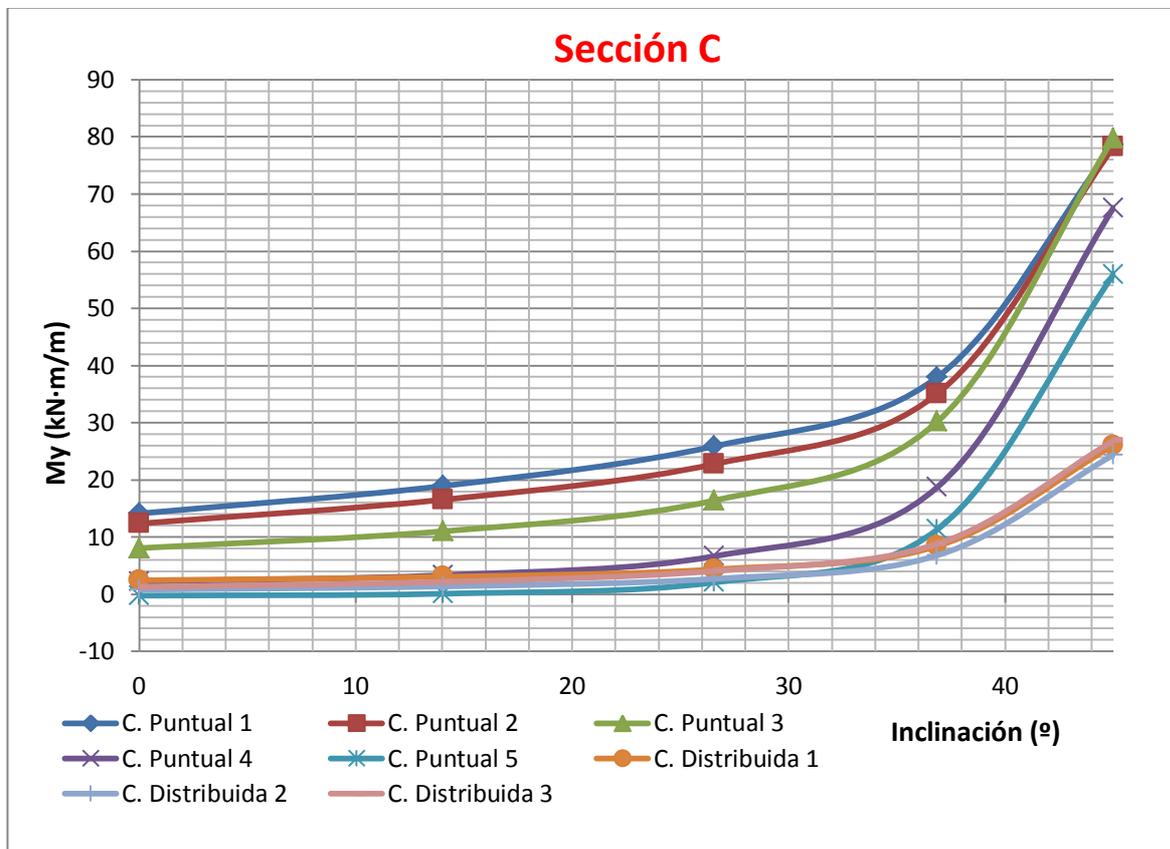


Figura 4.73 – Distribución de My (kN·m/m) en la sección C

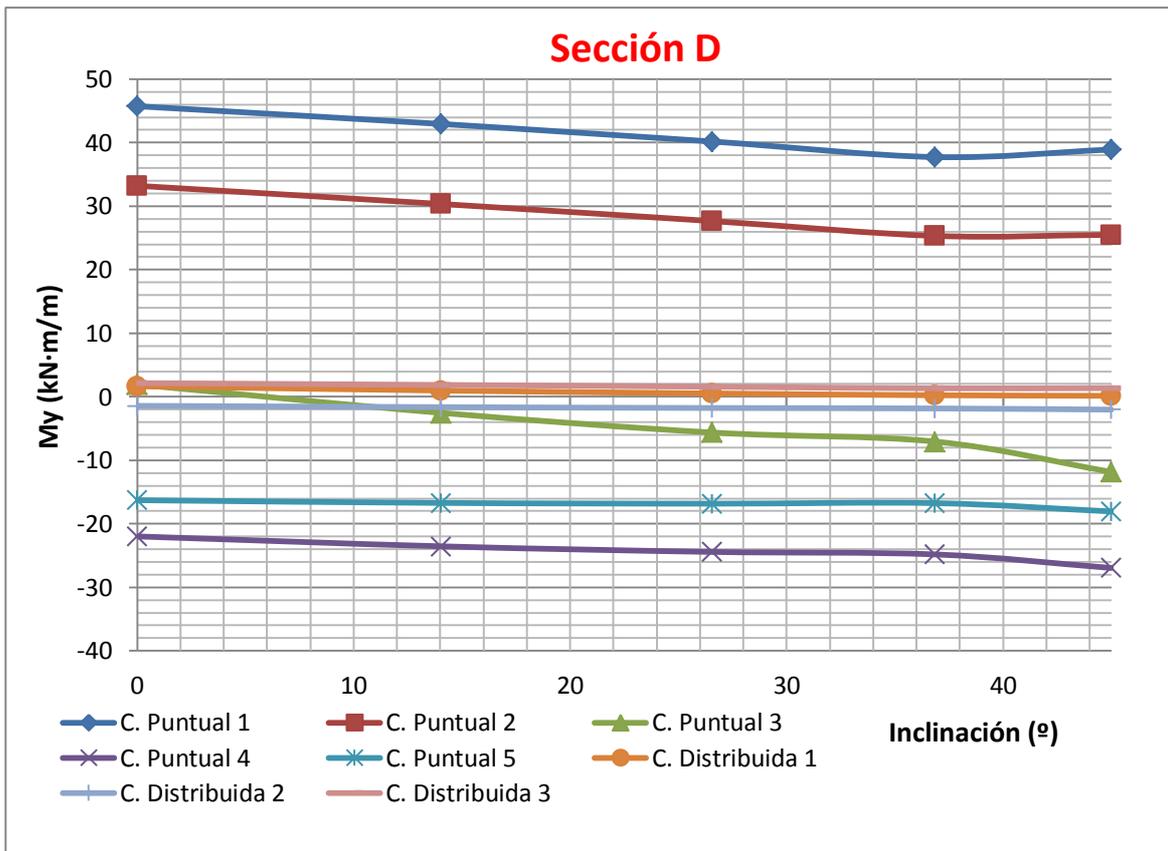


Figura 4.74 – Distribución de My (kN·m/m) en la sección D

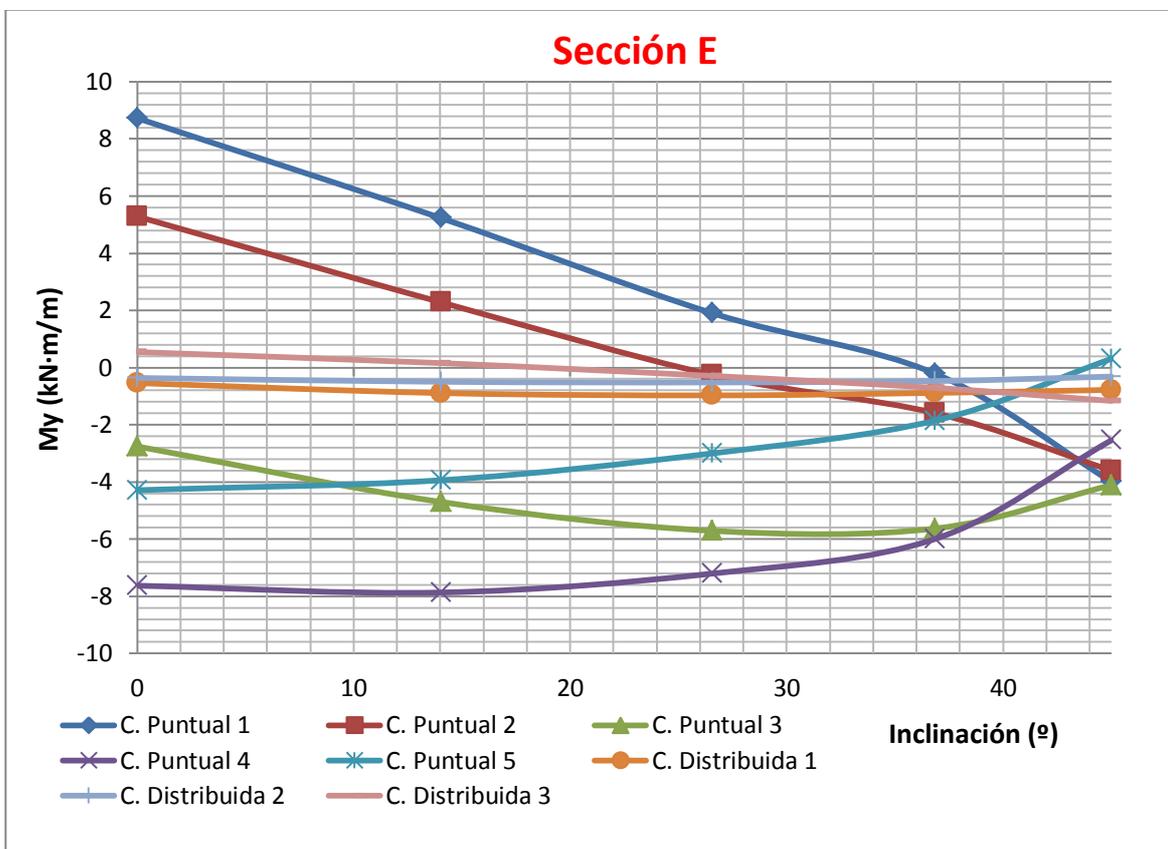


Figura 4.75 – Distribución de My (kN·m/m) en la sección E

Conclusiones de los momentos flectores transversales:

En base a los resultados obtenidos con las diferentes cargas, modelos y secciones estudiadas podemos afirmar que **la influencia de la inclinación de las almas en los momentos flectores transversales es más considerable en la losa inferior.**

Como se puede observar en dichos gráficos:

En el gráfico de la sección A, los valores prácticamente se mantienen constantes donde la mayoría de cargas tienen a bajar levemente a medida que se inclina la carga. En el gráfico de la sección B, la influencia es nula, siendo las rectas con pendiente nula (no influye por tanto).

En el gráfico C, los valores suben notablemente a medida que se inclina la carga, esto se debe a que la losa inferior se va reduciendo en cada modelo (se reduce la anchura, el área se mantiene constante por lo que se aumenta el espesor), todo ello hace que la losa inferior sea más rígida por lo que sus esfuerzos son cada vez mayores.

En el gráfico D y E, los valores se mantienen casi constantes, baja levemente en ambos (en el gráfico de la sección E, parece que influye más pero es por la escala del eje 'y' variando realmente prácticamente nada).

Por lo tanto, **la variación que produce la inclinación de las almas es más considerable en la losa inferior, y en el resto de elementos es menos importante.**

Axiles transversales (Ny):

Con el objetivo de corroborar que la redistribución que se produce al inclinar las almas no viene determinada exclusivamente por la carga aplicada, procedemos al análisis del resto de cargas puntuales y distribuidas observando si ocurre el mismo fenómeno.

Para ello, nos detenemos en los nudos 3, 5 y 10, concretamente en las secciones ‘A’, ‘B’ y ‘C’ de la Figura 4.65, que pertenecen a la losa superior e inferior de la sección central. A continuación aparecen las tablas con los valores para cada modelo, carga y sección y finalmente su representación gráfica.

Sección A								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	169.766	128.663	55.403	-12.598	-29.239	12.154	-2.189	11.218
Modelo 2	218.013	191.161	185.478	31.438	-6.294	15.802	0.452	14.713
Modelo 3	266.993	241.867	314.917	73.672	15.339	19.597	2.875	18.503
Modelo 4	314.652	295.938	419.881	113.963	36.635	23.580	5.249	22.328
Modelo 5	359.328	346.600	507.213	152.062	59.605	27.615	7.936	25.643

Tabla 4.26 – Distribución de Ny (kN/m) en la sección A

Sección B								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	65.307	33.506	-8.648	-40.025	-47.656	1.447	-5.263	8.158
Modelo 2	90.416	58.276	16.476	-19.467	-29.008	4.520	-2.618	11.659
Modelo 3	117.348	83.952	41.474	0.256	-11.418	7.638	-0.185	15.460
Modelo 4	144.134	109.401	66.181	19.870	6.105	10.755	2.206	19.305
Modelo 5	166.969	132.573	90.465	40.921	25.647	13.788	4.924	22.652

Tabla 4.27 – Distribución de Ny (kN/m) en la sección B

Sección C								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	-128.412	-72.926	24.475	80.209	70.611	-7.200	7.567	-5.807
Modelo 2	-135.383	-78.197	23.765	83.948	74.782	-6.346	7.832	-6.395
Modelo 3	-143.022	-84.449	19.556	85.329	79.148	-5.203	8.253	-7.335
Modelo 4	-145.831	-88.842	9.886	80.081	81.259	-3.880	8.627	-8.408
Modelo 5	-134.474	-86.347	-7.923	61.476	75.316	-2.523	8.458	-9.201

Tabla 4.28 – Distribución de Ny (kN/m) en la sección C

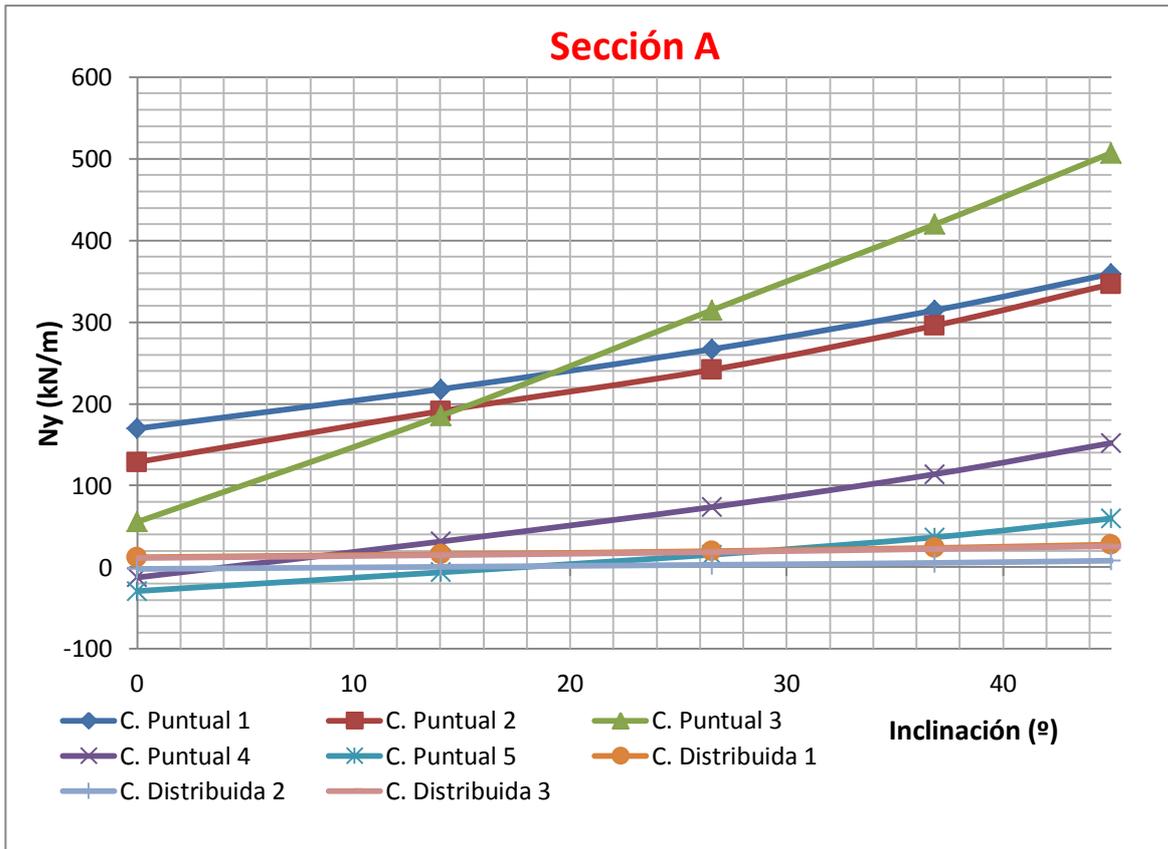


Figura 4.76 – Distribución de Ny (kN/m) en la sección A

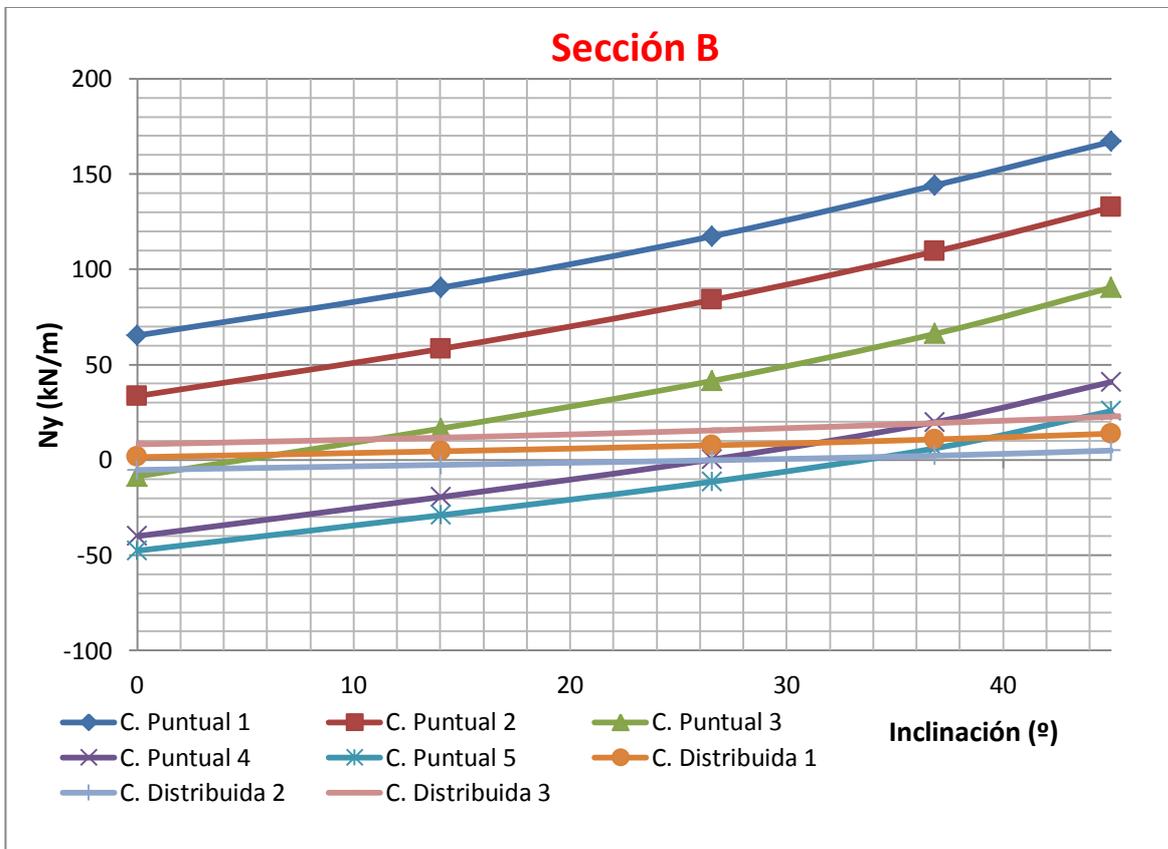


Figura 4.77 – Distribución de Ny (kN/m) en la sección B

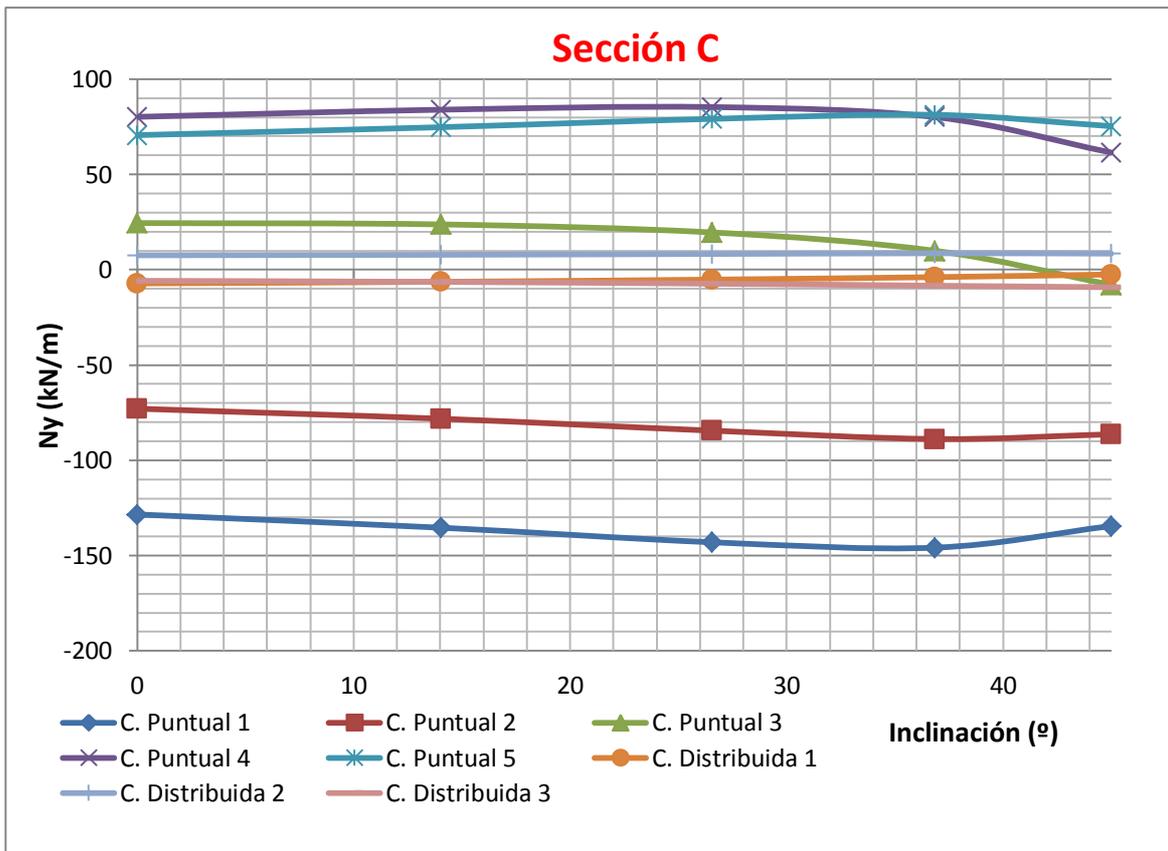


Figura 4.78 – Distribución de Ny (kN/m) en la sección C

Conclusiones de los axiles transversales:

Las cargas puntuales generan un incremento en dichos axiles de mayor magnitud que las cargas distribuidas, además cuanto más excéntrica sea la carga, los esfuerzos son mayores donde también es más importante la influencia que tiene la inclinación del alma.

En los esfuerzos de la losa superior influye notablemente la inclinación del alma mientras que en la losa inferior la inclinación es indiferente, como se puede observar en las tres secciones graficadas anteriormente.

Luego, la aparición de los esfuerzos axiles transversales depende de:

- **La inclinación del alma** (mayor inclinación implica mayores valores).
- **Excentricidad de la carga** (mayor excentricidad implica mayores valores en general).
- **Especialmente importantes en las cargas puntuales**
- **Dichos esfuerzos se concentran en la losa superior fundamentalmente.**

Cortantes (Nxy):

En base a los resultados obtenidos para la carga puntual 3, observaremos si para el resto de cargas sigue la misma tendencia anterior. Para ello evaluaremos los diferentes modelos para las distintas cargas puntuales y cargas distribuidas.

En este caso, la sección más desfavorable para las cargas puntuales sigue siendo la sección $x = 19.5$ m, mientras que en las cargas distribuidas, la sección más desfavorable se encuentra en los extremos, es decir, la sección $x = 0$ m.

En dichos casos, observaremos la evolución que tienen en las secciones 'D' y 'E' de la Figura 4.65. Los valores están expresados en kN/m.

Sección D								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	-71.624	-101.973	-307.876	-90.867	-38.127	-186.947	-119.448	-119.410
Modelo 2	-70.729	-101.602	-304.775	-89.209	-37.445	-188.399	-119.148	-119.195
Modelo 3	-69.799	-101.259	-298.395	-87.450	-36.735	-190.986	-118.914	-119.027
Modelo 4	-69.328	-100.888	-288.134	-84.835	-35.921	-186.875	-110.914	-111.436
Modelo 5	-70.167	-102.474	-299.134	-81.196	-34.644	-198.135	-117.018	-117.436

Tabla 4.29 – Distribución de Nxy (kN/m) en la sección D

Sección E								
Modelos	C. Puntual 1	C. Puntual 2	C. Puntual 3	C. Puntual 4	C. Puntual 5	C. Distribuida 1	C. Distribuida 2	C. Distribuida 3
Modelo 1	-64.622	-81.842	-135.426	-69.378	-33.236	-175.530	-111.657	-111.815
Modelo 2	-65.052	-81.939	-132.688	-68.937	-33.346	-178.433	-111.688	-111.954
Modelo 3	-65.152	-80.666	-124.093	-67.037	-33.150	-182.170	-111.470	-111.470
Modelo 4	-65.361	-78.315	-111.589	-63.191	-32.455	-194.601	-118.582	-118.816
Modelo 5	-65.704	-73.142	-91.419	-54.087	-30.001	-190.346	-107.359	-108.163

Tabla 4.30 – Distribución de Nxy (kN/m) en la sección E

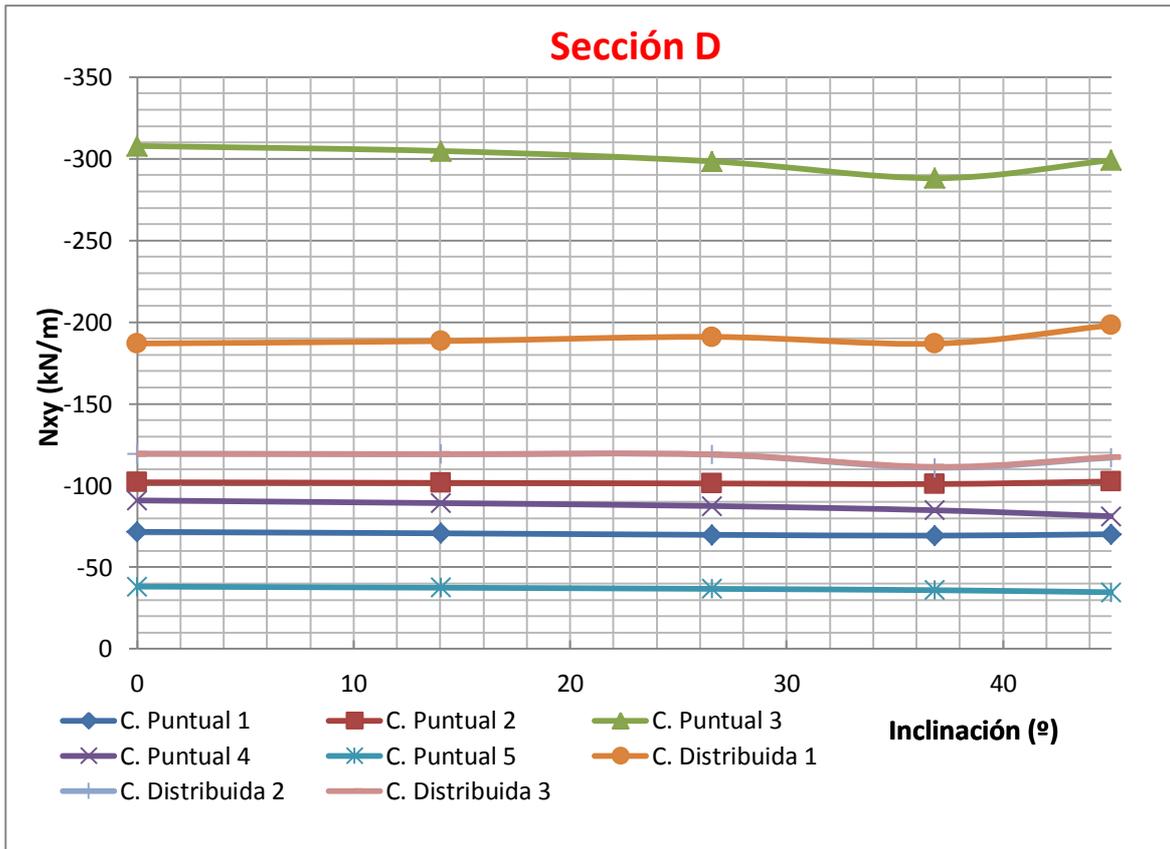


Figura 4.79 – Distribución de Nxy (kN/m) en la sección D

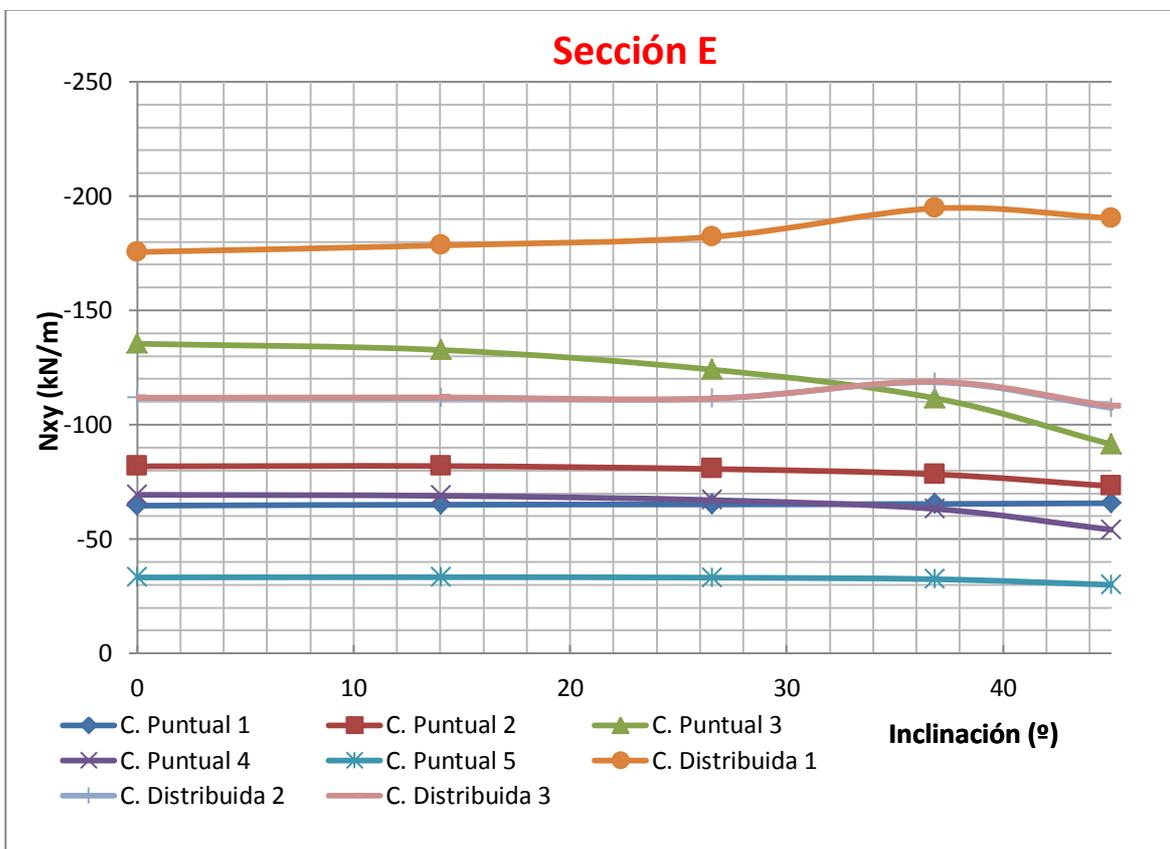


Figura 4.80 – Distribución de Nxy (kN/m) en la sección E

Conclusiones de los esfuerzos cortantes:

Los esfuerzos cortantes van disminuyendo a lo largo del alma, siendo mayores en la parte superior.

A medida que se inclina el alma van disminuyendo ligeramente dichos esfuerzos.

En base a los resultados de los esfuerzos podemos concluir:

En los esfuerzos flectores la variación que produce la inclinación de las almas es más considerable en la losa inferior, y en el resto de elementos es menos importante ya que los valores y distribución son muy similares entre los diferentes modelos.

Por otra parte, se produce una redistribución de las cargas al inclinar las almas generando esfuerzos cortantes y axiles, a mayor inclinación de carga, mayores esfuerzos axiles y disminución de los esfuerzos cortantes soportados por las almas.

Existe una relación directamente proporcional con el incremento de la inclinación e incremento de los esfuerzos axiles; mientras que en el otro extremo, se produce un decremento con los esfuerzos cortantes de las almas, siendo más homogéneas, suaves y con valores ligeramente menores.

En las cargas puntuales, este efecto es más importante y favorece que se disperse más rápidamente (en el caso de las almas inclinadas).

4.7 Resumen

En el análisis de sensibilidad hemos obtenido las siguientes conclusiones:

- **Desplazamientos:** Los desplazamientos verticales no dependen de la inclinación de las almas pero en los desplazamientos transversales existe una relación inversamente proporcional entre la excentricidad de la carga y la inclinación del alma para conseguir optimizar (minimizar) su valor.

Las cargas distribuidas presentan desplazamientos mucho menores que las cargas puntuales.

- **Distorsión:** No existe un rango de inclinación del alma óptimo que englobe todas las cargas y situaciones aunque si existe una relación inversamente proporcional entre la excentricidad de la carga y el valor óptimo de la inclinación. Véase la Figura 4.64.

Las cargas puntuales provocan una gran perturbación en el puente, lo que provoca mayores distorsiones que las que generarían las cargas distribuidas. Además, la inclinación de las almas es más determinante para cargas puntuales que en las cargas distribuidas, no siendo tan acusada la relación para dichas cargas distribuidas.

Existe aproximadamente un desfase del 10° para la solución óptima entre cargas puntuales y distribuidas, es decir, la inclinación óptima requerida para una sollicitación cualquiera que fuese puntual necesita 10° más que la misma carga si fuese distribuida.

- **Tensiones:** La inclinación progresiva de las almas se traduce en una redistribución de las tensiones, las tensiones longitudinales van disminuyendo a medida que aumentan las tensiones tangenciales.

Más determinante en las cargas puntuales, donde la gran perturbación que provoca requiere una redistribución de esfuerzos en las inmediaciones; donde las secciones con las almas inclinadas actúan más eficazmente.

La aparición de tensiones tangenciales mayores debido a la inclinación de almas se traduce en la aparición y redistribución de esfuerzos, que son causadas por la descomposición de la carga en dichas almas.

- **Esfuerzos:** La inclinación de las almas está directamente relacionada con los esfuerzos axiales transversales y los esfuerzos cortantes transversales. A medida que aumenta la inclinación de las almas, aumenta los esfuerzos axiales y disminuyen los esfuerzos cortantes soportados por las almas.

Este efecto es más importante en las cargas puntuales, donde la inclinación de las almas favorece la rápida dispersión del gran efecto perturbador que se produce.

Este fenómeno se produce gracias a la descomposición de cargas debido a la inclinación, requiriendo el aporte de los esfuerzos axiales transversales en la losa superior especialmente que compense dichas cargas (sea tanto puntuales o distribuidas).

Por otra parte, en los esfuerzos flectores transversales, la variación que produce la inclinación de las almas es más considerable en la losa inferior y en el resto de elementos es menos importante.

5 CONCLUSIONES

En el trabajo presente tenía como objetivo principal el análisis de sensibilidad a la inclinación de las almas en las secciones tipo cajón en puentes. Como punto de partida y objetivo secundario, se debía reproducir los modelos y resultados de Javier Manterola, del Capítulo 5 de su libro ‘Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción’, para corroborar los resultados fiables de este trabajo y poder extender el análisis realizado.

Se han reproducido los modelos y resultados de Manterola correctamente, pues si bien en sus modelos utiliza como método de análisis el de las láminas plegadas de 99 armónicos y utiliza unidades diferentes (kg, ton., cm...) y en nuestro modelo hemos utilizado como método de análisis el método de los elementos finitos (MEF) implantado en el programa de Midas Civil 2016 y hemos utilizado las unidades del S.I. (metros, newtons...), hemos conseguido los mismos resultados aproximadamente (teniendo en cuenta las pequeñas diferencias entre los métodos de análisis y unidades empleadas) y corroborando las conclusiones que Manterola afirmaba.

Por lo tanto, hemos conseguido este objetivo secundario, donde hemos reproducido dos modelos, uno con las almas rectas y otro de armas inclinadas; en el que hemos podido observar el comportamiento que tienen cada una de ellas cuando se someten a cargas puntuales y cargas distribuidas. También hemos podido obtener ciertas conclusiones, al igual que afirmaba Manterola, sobre el comportamiento y tendencia que seguía, por simple comparación de los resultados de los dos modelos.

Una vez analizado los dos modelos básicos y haber obtenido unos resultados, hemos podido esbozar unas primeras diferencias sobre la influencia que tienen la inclinación de las almas. Si bien posteriormente, las hemos desmentido o corroborado, con ello se ha marcado la tendencia de actuación a la hora de comparar en profundidad los 5 modelos utilizados.

Por último, se ha logrado realizar el análisis de sensibilidad a la inclinación de las almas, donde se han obtenido los siguientes resultados para los parámetros estudiados (desplazamientos, distorsión, tensiones y esfuerzos):

- **Desplazamientos:**

Los desplazamientos verticales no dependen de la inclinación de las almas.

Los desplazamientos transversales tienen una relación inversamente proporcional entre la excentricidad de la carga y la inclinación del alma para conseguir optimizar (minimizar) su valor.

Las cargas distribuidas presentan desplazamientos mucho menores que las cargas puntuales.

- **Distorsión:**

No existe un rango de inclinación del alma óptimo que englobe todas las cargas y situaciones posibles.

Si existe una relación inversamente proporcional entre la excentricidad de la carga y el valor óptimo de la inclinación.

Las cargas puntuales provocan una gran perturbación generando mayores distorsiones que las que generarían las cargas distribuidas.

La inclinación de las almas es más determinante para cargas puntuales que en las cargas distribuidas, no siendo tan acusada la relación para dichas cargas distribuidas.

Existe aproximadamente un desfase del 10° para la solución óptima entre cargas puntuales y distribuidas, en otras palabras, la inclinación óptima requerida para una sollicitación cualquiera que fuese puntual necesita 10° más que la misma carga si fuese distribuida.

Nota: En el estudio de la distorsión hemos obtenido la principal diferencia respecto al libro de Javier Manterola ya que afirmaba que ‘La cuantía de la distorsión depende de la carga en la sección transversal, siendo máxima cuando la carga se sitúa sobre el alma’ al igual que ‘Un mismo cajón con almas inclinadas tienen menos distorsión que si tiene almas verticales’.

Esto no es totalmente cierto para las diferentes cargas y posiciones que pueda tener como hemos demostrado anteriormente, aunque para el caso concreto que ha estudiado en su libro si lo sea.

- **Tensiones:**

La inclinación progresiva de las almas se traduce en una redistribución de las tensiones, las tensiones longitudinales van disminuyendo a medida que aumentan las tensiones tangenciales.

Más determinante en las cargas puntuales, donde la gran perturbación que provoca requiere una redistribución de esfuerzos en las inmediaciones; donde las secciones con las almas inclinadas actúan más eficazmente.

La aparición de tensiones tangenciales mayores debido a la inclinación de almas se traduce en la aparición y redistribución de esfuerzos, que son causadas por la descomposición de la carga en dichas almas.

- **Esfuerzos:**

Los esfuerzos flectores transversales tienen relación con la inclinación de las almas, de forma más notoria en la losa inferior aumentando a medida que se inclinan las almas.

La inclinación de las almas está directamente relacionada con los esfuerzos axiales transversales (relación directamente proporcional) y los esfuerzos cortantes transversales (inversamente proporcional).

Este efecto es más importante en las cargas puntuales, donde la inclinación de las almas favorece la rápida dispersión del gran efecto perturbador que se produce.

La aparición de ambos tipos de esfuerzos (axiales y cortantes) se debe a la descomposición de cargas debido a la inclinación de las almas.

En resumen:

La inclinación de las almas tiene especial incidencia en la distorsión de la sección (y por tanto, en los desplazamientos), donde el tipo de cargas y excentricidad requerirá una inclinación u otra que optimice la mínima distorsión posible.

En las tensiones se produce un cambio entre tensiones longitudinales (donde la inclinación no es tan determinante) y tensiones tangenciales (donde la inclinación tiene mayor interés), que se traduce en la generación de los diferentes esfuerzos, haciendo dicha variación entre los esfuerzos cortantes transversales y esfuerzos axiales transversales. Mientras que en los momentos flectores transversales influye dicha inclinación especialmente en la losa inferior.

Por lo tanto, hemos observado en el análisis realizado que cambios se van produciendo a medida que se va inclinando el alma, donde el tipo de carga, excentricidad, etc. determinará que sección es la más adecuada ante dichos parámetros.

REFERENCIAS

[1] Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción – Javier Manterola. 2006

[2] EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2010).

[3] Eurocódigos Estructurales

[4] IAP – 11. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2012)

[5] IAP. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento. Gobierno de España (1998)