

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

COMPORTAMIENTO DE PUENTES
FORMADOS POR DOS VIGAS CAJÓN

Autor: María Rodríguez de Francisco

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

Grupo de Estructuras
Dpto. Teoría de Mecánica de Medios Continuos
y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

COMPORTAMIENTO DE PUENTES FORMADOS POR DOS VIGAS CAJÓN

Autor:

María Rodríguez de Francisco

Tutor:

Antonio Martínez de la Concha

Profesor titular

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

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: COMPORTAMIENTO DE PUENTES FORMADOS POR DOS VIGAS CAJÓN

Autor: María Rodríguez de Francisco

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En este capítulo se procede a mencionar a aquellas personas sin las que habría sido posible llegar hasta este momento. Cuando el camino es largo y duro se hace fácil destacar a quienes te han ayudado a que sea más llevadero.

En primer lugar, a todos los profesores que durante estos años me han transmitido los conocimientos y el aprendizaje necesario para poder desarrollarme como ingeniera y como persona. Mención especial a mi tutor Antonio Martínez de la Concha que ha sido un apoyo importante para la realización de mi trabajo de fin de grado.

En segundo lugar, a mi familia, sobre todo a mis padres y a mis hermanas que durante toda mi etapa universitaria me han acompañado y ayudado en los momentos en los que más los he necesitado.

Para continuar, a mis compañeros que con el paso de los años se han convertido en amigos. El hecho de que a todos nos una la ingeniería ha permitido que podamos compartir los buenos momentos y superar los malos juntos.

No podría olvidarme de mis amigos de toda la vida que siempre confiaron en mi para poder cumplir mi objetivo de convertirme en ingeniera.

Sin la ayuda y el cariño de todas estas personas habría sido mucho más difícil haber afrontado los problemas y momentos complicados, por lo que solo tengo palabras de agradecimiento hacia ellos.

María Rodríguez de Francisco

Alumna de Ingeniería en Tecnologías Industriales

Sevilla, 2022

Resumen

En el presente trabajo se ha realizado un estudio de sensibilidad al cambio de las características geométricas de un puente formado por dos vigas cajón. En primer lugar, se ha llevado a cabo un estudio similar al que realiza D. Javier Manterola en su libro 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I', con el objetivo de comprobar que los resultados obtenidos eran correctos.

Una vez comparados estos resultados, se ha modificado el modelo de referencia, variando la luz, la inclinación de las almas, el ancho de los cajones y la separación entre cajones. Así mismo, se ha modificado la posición de la carga, estableciendo cinco puntos de aplicación diferentes.

Para este análisis se ha estudiado la variación de los desplazamientos, la distorsión, los esfuerzos y las tensiones y a partir de ellos, se han obtenidos las conclusiones más relevantes sobre el comportamiento de estos puentes al modificar su geometría y el punto donde se aplica la carga puntual.

Abstract

In the present work it has performed a sensitivity study to the change of the geometric characteristics in bridges by two box girders. Firstly, it has been carried out a study like the one done by D. Javier Manterola in his book 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I', to corroborate the results.

Once the results are checked, we have modified the reference model, changing the span of the bridge, the inclination of the souls, the width of the booths and the separation between the booths. Besides, the load's position has been varied.

In the analysis, we have studied displacements, distortion, stresses and strain in order to extract the most relevant conclusions of the behaviour of this kind of bridges when the geometry and the load application point have been modified.

Índice

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
Índice	XIII
Índice de Tablas	XV
Índice de Figuras	XVI
1 Introducción	1
2 Base metodológica	3
2.1. <i>Consideraciones generales</i>	3
2.1 <i>Descripción de los casos considerados</i>	5
2.1.1 Caso 1: Variación de la luz	5
2.1.2 Caso 2: Variación de la inclinación de las almas	5
2.1.3 Caso 3: Variación del ancho de los cajones	5
2.1.4 Caso 4: Variación de la separación entre cajones	6
3 Comportamiento de un tablero formado por dos vigas cajón	7
3.1. <i>Descripción del modelo</i>	7
3.2. <i>Respuesta ante carga puntual</i>	8
3.1.1 Desplazamientos	8
3.1.2 Distorsión	10
3.1.3 Esfuerzos	12
3.1.4 Tensiones	16
3.1.5 Influencia de la situación de la carga	19
4 Estudio Paramétrico y el comportamiento de un tablero formado por dos vigas cajón	25
4.1 <i>Caso 1: Variación de la luz</i>	25
4.1.1 Descripción del modelo	25
4.1.2 Respuesta ante cargas puntuales	25
4.2 <i>Caso 2: Variación de la inclinación de las almas</i>	49
4.2.1 Descripción del modelo	49
4.2.2 Respuesta ante cargas puntuales	49
4.3 <i>Caso 3: Variación del ancho de los cajones</i>	69
4.3.1 Descripción del modelo	69
4.3.2 Respuesta ante cargas puntuales	70
4.4 <i>Caso 4: Variación de la separación entre cajones</i>	92
4.4.1 Descripción del modelo	92
4.4.2 Respuesta ante cargas puntuales	92

5 Conclusiones

117

Referencias

121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades del hormigón HP-30	4
Tabla 2. Ángulos y distorsión del modelo de referencia a lo largo de la luz del cajón izquierdo	11
Tabla 3. Ángulos y distorsión del modelo de referencia a lo largo de la luz del cajón derecho	11
Tabla 4. Desplazamientos verticales máximos (mm) según la separación entre cajones y la posición de la carga	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Geometría básica de la sección transversal	4
Figura 2. Posición cargas puntuales	4
Figura 3. Distintos modelos variando la inclinación de las almas	5
Figura 4. Distintos modelos variando el ancho de los cajones (m)	6
Figura 5. Distintos modelos variando la separación entre cajones (m)	6
Figura 6. Modelo de D. Javier Manterola	7
Figura 7. Desplazamientos (m) del modelo de D. Javier Manterola	8
Figura 8. Desplazamientos (m) de la sección $x=20$ m	8
Figura 9. Desplazamientos (m) de la sección $x=15$ m	9
Figura 10. Puntos de estudio para la distribución de la flecha	9
Figura 11. Distribución de la flecha a lo largo de la luz en los nodos 2, 5, 8 y 11	9
Figura 12. Desplazamientos de la sección $x=20$ m (Estudio D. Javier Manterola)	10
Figura 13. Desplazamientos de la sección $x=15$ m (Estudio D. Javier Manterola)	10
Figura 14. Desplazamientos a lo largo de la luz de los nudos 2, 5, 8 y 11 (Estudio D. Javier Manterola)	10
Figura 15. Ángulos para el cálculo de la distorsión	11
Figura 16. Distribución de la distorsión a lo largo de la luz (estudio D. Javier Manterola)	12
Figura 17. Distribución de los momentos M_y a lo largo de la luz (estudio D. Javier Manterola)	12
Figura 18. Distribución del cortante Q_y a lo largo de la luz (estudio D. Javier Manterola)	13
Figura 19. Distribución del cortante Q_y a lo largo de la luz (estudio D. Javier Manterola)	13
Figura 20. Distribución del axil N_y a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)	14
Figura 21. Distribución del axil N_y a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)	14
Figura 22. Distribución del cortante N_{xy} a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)	15
Figura 23. Distribución del cortante N_{xy} a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)	15
Figura 24. Esfuerzos obtenidos por D. Manterola	16
Figura 25. Distribución de las tensiones normales (MPa) a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)	17
Figura 26. Distribución de las tensiones normales (MPa) en $x = 20$ m (estudio D. Manterola)	17
Figura 27. Distribución de las tensiones normales (MPa) en $x = 15$ m (estudio D. Manterola)	17
Figura 28. Distribución de σ_{xx} (MPa) a lo largo de la luz en los nudos 2, 3, 5 y 6 obtenidos por D. Manterola	18
Figura 29. Distribución de σ_{xx} (MPa) en el centro de la luz ($x=20$ m), obtenida por D. Manterola	18
Figura 30. Distribución de σ_{xx} (MPa) para $x=15$ m, obtenida por D. Manterola	18
Figura 31. Situación de las cargas puntuales	19
Figura 32. Desplazamientos (m) de la sección $x=20$ m para la carga P1	19
Figura 33. Desplazamientos (m) de la sección $x=20$ m para la carga P2	20
Figura 34. Desplazamientos (m) de la sección $x=20$ m para la carga P3	20
Figura 35. Desplazamientos (m) de la sección $x=20$ m para la carga P4	20
Figura 36. Desplazamientos (m) de la sección $x=20$ m para la carga P5	21

Figura 37. Distribución de la flecha según la situación de la carga	21
Figura 38. Distribución de la flecha máxima según la situación de la carga	22
Figura 39. Flecha la sección $x=20m$ según la posición de la carga obtenida por D. Javier Manterola	23
Figura 40. Desplazamientos (m) del modelo de 40 metros de luz	25
Figura 41. Desplazamientos (m) del modelo de 60 metros de luz	26
Figura 42. Desplazamientos (m) del modelo de 80 metros de luz	26
Figura 43. Desplazamientos del nudo 2 al variar la luz del puente y la posición de la carga	27
Figura 44. Desplazamientos del nudo 8 al variar la luz del puente y la posición de la carga	27
Figura 45. Desplazamientos máximos al variar la luz del puente y la posición de la carga.	28
Figura 46. Variación de la distorsión con la luz según la posición de la carga en el cajón izquierdo	28
Figura 47. Variación de la distorsión con la luz según la posición de la carga en el cajón derecho	29
Figura 48. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P1	30
Figura 49. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P2	30
Figura 50. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P3	31
Figura 51. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P4	31
Figura 52. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P5	32
Figura 53. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P1	33
Figura 54. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P2	33
Figura 55. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P3	34
Figura 56. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P4	34
Figura 57. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P5	35
Figura 58. Distribución del cortante Q_y al variar la posición de la carga	35
Figura 59. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P1	36
Figura 60. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P2	36
Figura 61. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P3	37
Figura 62. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P4	37
Figura 63. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P5	38
Figura 64. Distribución del axil N_y al variar la posición de la carga	38
Figura 65. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P1	39
Figura 66. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P2	39
Figura 67. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P3	40
Figura 68. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P4	40
Figura 69. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P5	41
Figura 70. Distribución del cortante N_{xy} al variar la posición de la carga para $L=40 m$	41
Figura 71. Distribución del cortante N_{xy} al variar la posición de la carga para $L=80 m$	42
Figura 72. Distribución de las tensiones normales según la luz para P1	43
Figura 73. Distribución de las tensiones normales según la luz para P2	43
Figura 74. Distribución de las tensiones normales según la luz para P3	44
Figura 75. Distribución de las tensiones normales según la luz para P4	44

Figura 76. Distribución de las tensiones normales según la luz para P5	45
Figura 77. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P1, del modelo de 40 m de luz	45
Figura 78. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P1, del modelo de 80 m de luz	46
Figura 79. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P2, del modelo de 40 m de luz	46
Figura 80. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P2, del modelo de 80 m de luz	46
Figura 81. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P3, del modelo de 40 m de luz	47
Figura 82. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P3, del modelo de 80 m de luz	47
Figura 83. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 40 m de luz	47
Figura 84. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 80 m de luz	48
Figura 85. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 40 m de luz	48
Figura 86. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 80 m de luz	48
Figura 87. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 80° sometido a la carga P2	49
Figura 88. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 60° sometido a la carga P2	49
Figura 89. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 40° sometido a la carga P2	50
Figura 90. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 80° sometido a la carga P3	50
Figura 91. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 60° sometido a la carga P3	51
Figura 92. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 40° sometido a la carga P3	51
Figura 93. Variación de la flecha máxima con la inclinación de las almas	52
Figura 94. Variación de la distorsión con la inclinación de las almas en el cajón izquierdo	52
Figura 95. Variación de la distorsión con la inclinación de las almas en el cajón derecho	53
Figura 96. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P1	53
Figura 97. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P2	54
Figura 98. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P3	54
Figura 99. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P4	55
Figura 100. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P5	55
Figura 101. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P1	56
Figura 102. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P2	56
Figura 103. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P3	57
Figura 104. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P4	57
Figura 105. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P5	58
Figura 106. Distribución del cortante Q_y según la posición de la carga para una inclinación de 40°	58
Figura 107. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P1	59
Figura 108. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P2	59
Figura 109. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P3	60
Figura 110. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P4	60
Figura 111. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P5	61
Figura 112. Distribución del esfuerzo axil N_y según la posición de la carga para una inclinación de 40°	61
Figura 113. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P1	62
Figura 114. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P2	62
Figura 115. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P3	63

Figura 116. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P4	63
Figura 117. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P5	64
Figura 118. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la posición de la carga para una inclinación de 40°	64
Figura 119. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la posición de la carga para una inclinación de 90°	65
Figura 120. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P1	66
Figura 121. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P2	66
Figura 122. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P3	67
Figura 123. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P4	67
Figura 124. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P5	68
Figura 125. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P1, del modelo de 40° de inclinación	68
Figura 126. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P2, del modelo de 40° de inclinación	68
Figura 127. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P3, del modelo de 40° de inclinación	69
Figura 128. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 40° de inclinación	69
Figura 129. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 40° de inclinación	69
Figura 130. Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de ancho de cajones para la carga P2	70
Figura 131. Desplazamientos (m) del modelo de 4 metros de ancho de cajones para la carga P2	70
Figura 132. Desplazamientos (m) del modelo de 6 metros de ancho de cajones para la carga P2	71
Figura 133. Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de ancho de cajones para la carga P2	71
Figura 134. Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de ancho de cajones para la carga P3	72
Figura 135. Desplazamientos (m) del modelo de 4 metros de ancho de cajones para la carga P3	72
Figura 136. Desplazamientos (m) del modelo de 6 metros de ancho de cajones para la carga P3	72
Figura 137. Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de ancho de cajones para la carga P3	73
Figura 138. Variación de la flecha con el ancho entre cajones según la posición de la carga en el nudo 2	73
Figura 139. Variación de la flecha con el ancho entre cajones según la posición de la carga en el nudo 8	74
Figura 140. Variación de la flecha máxima con el ancho entre cajones según la posición de la carga	74
Figura 141. Variación de la distorsión con el ancho de cajones en el cajón izquierdo	75
Figura 142. Variación de la distorsión con el ancho de cajones en el cajón derecho	76
Figura 143. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P1	76
Figura 144. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P2	77
Figura 145. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P3	77
Figura 146. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P4	78
Figura 147. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P5	78
Figura 148. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P1	79
Figura 149. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P2	79
Figura 150. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P3	80
Figura 151. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P4	80
Figura 152. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P5	81
Figura 153. Distribución del momento Q_y según la posición de la carga para un ancho de 2 m	81

Figura 154. Distribución del momento Q_y según la posición de la carga para un ancho de 8 m	82
Figura 155. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P1	82
Figura 156. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P2	83
Figura 157. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P3	83
Figura 158. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P4	84
Figura 159. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P5	84
Figura 160. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P1	85
Figura 161. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P2	85
Figura 162. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P3	86
Figura 163. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P4	86
Figura 164. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P5	87
Figura 165. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P1	88
Figura 166. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P2	88
Figura 167. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P3	89
Figura 168. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P4	89
Figura 169. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P5	90
Figura 170. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P1, del modelo de 2 m de ancho	90
Figura 171. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P2, del modelo de 2 m de ancho	91
Figura 172. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P3, del modelo de 2 m de ancho	91
Figura 173. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 2 m de ancho	91
Figura 174. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 2 m de ancho	92
Figura 175. Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de separación entre cajones para la carga P2	92
Figura 176. Desplazamientos (m) del modelo de 6 metros de separación entre cajones para la carga P2	93
Figura 177. Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de separación entre cajones para la carga P2	93
Figura 178. Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de separación entre cajones para la carga P5	94
Figura 179. Desplazamientos (m) del modelo de 6 metros de separación entre cajones para la carga P5	94
Figura 180. Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de separación entre cajones para la carga P5	95
Figura 181. Variación de la flecha con la separación entre cajones según la posición de la carga en el nudo 2	95
Figura 182. Variación de la flecha con la separación entre cajones según la posición de la carga en el nudo 8	96
Figura 183. Variación de la flecha máxima con la separación de los cajones según la posición de la carga	97
Figura 184. Variación de la distorsión con la separación de cajones en el cajón izquierdo	97
Figura 185. Variación de la distorsión con la separación de cajones en el cajón derecho	98
Figura 186. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P1	98
Figura 187. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P2	99
Figura 188. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P3	99
Figura 189. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P4	100
Figura 190. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P5	100
Figura 191. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P1	101

Figura 192. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P2	101
Figura 193. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P3	102
Figura 194. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P4	102
Figura 195. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P5	103
Figura 196. Distribución del momento Q_y según la posición de la carga para una separación de 2 m	103
Figura 197. Distribución del momento Q_y según la posición de la carga para una separación de 8 m	104
Figura 198. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P1	104
Figura 199. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P2	105
Figura 200. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P3	105
Figura 201. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P4	106
Figura 202. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P5	106
Figura 203. Distribución del momento N_y según la posición de la carga para una separación de 2 m	107
Figura 204. Distribución del momento N_y según la posición de la carga para una separación de 8 m	107
Figura 205. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P1	108
Figura 206. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P2	108
Figura 207. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P3	109
Figura 208. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P4	109
Figura 209. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P5	110
Figura 210. Distribución del momento N_{xy} según la posición de la carga para una separación de 2 m	110
Figura 211. Distribución del momento N_{xy} según la posición de la carga para una separación de 8 m	111
Figura 212. Distribución de las tensiones normales según la separación para P1	112
Figura 213. Distribución de las tensiones normales según la separación para P2	112
Figura 214. Distribución de las tensiones normales según la separación para P3	113
Figura 215. Distribución de las tensiones normales según la separación para P4	113
Figura 216. Distribución de las tensiones normales según la separación para P5	114
Figura 217. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P1, del modelo de 2 m de separación	114
Figura 218. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P2, del modelo de 2 m de separación	115
Figura 219. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P3, del modelo de 2 m de separación	115
Figura 220. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 2 m de separación	115
Figura 221. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 2 m de separación	115

1 INTRODUCCIÓN

Un puente es una estructura dedicada a salvar tanto obstáculos naturales, ríos o valles, como obstáculos artificiales en el caso de carreteras o vías férreas. Estas estructuras se realizan con la finalidad de poder transportar mercancías, facilitar el paso a las personas y trasladar sustancias de un sitio a otro. De otro lado, los puentes están formados por el tablero y los apoyos, y también podrían llevar una armadura.

Los puentes se pueden clasificar de varias maneras, entre las que se destacan tres. En primer lugar, en función de la forma estructural que presente, teniendo en cuenta cómo soportan los esfuerzos. En segundo lugar, en función de cuál haya sido el material utilizado en su construcción. Por último, en función del uso para el que se construya el puente.

En relación con la forma estructural del puente se puede distinguir entre los puentes de viga, los puentes de arco y los puentes colgantes o tirantes. Los puentes de viga son aquellos que su tablero se encuentra apoyado en sus extremos sobre soportes o pilares. Los puentes de arco son aquellos que están constituidos por una sección curvada apoyada en unos soportes. Los puentes colgantes son aquellos que utilizan los tirantes como soporte principal del tablero.

En cuanto al material utilizado en su construcción se distinguen los puentes de madera, de piedra, metálicos y de hormigón armado. Los puentes de madera son rápidos de construir y de bajo coste pero poco resistentes porque son susceptibles de ser estropeados por los fenómenos atmosféricos. Los puentes de piedra tienen su origen en el mundo romano y son resistentes y duraderos aunque su construcción es muy costosa. Los puentes metálicos presentan versatilidad en el diseño y breve período de tiempo de construcción pero también suponen un gran desembolso económico. Los puentes de hormigón armado son aquellos que presentan una gran resistencia a los fenómenos atmosféricos y, además, soporta bien los esfuerzos de compresión.

Por último, en cuanto al uso del puente se diferencia el acueducto, el viaducto y la pasarela. El acueducto es para el paso del agua, el viaducto para el paso de carreteras y ferrocarriles y la pasarela se dedica para el paso de las personas.

En este trabajo se va a desarrollar el puente en viga, especialmente un puente con sección en doble cajón de hormigón. En lo que respecta a las características de este tipo de puentes, las ventajas a destacar son la aptitud para soportar grandes momentos flectores, gran rigidez a la torsión por ser una sección cerrada, el mínimo espesor de sus paredes debido a su gran rigidez transversal y un gran radio de giro.

Además, otras características generales de este tipo de puentes son sus tableros ligeros y resistentes. También que esta sección es apropiada para todo tipo de luces, grandes y pequeñas.

En el caso de nuestro trabajo se tiene en cuenta un modelo básico que se va a comparar con el estudio del ingeniero y catedrático D. Javier Manterola en el capítulo V de su libro “Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción”. Se pretende que los resultados sobre el comportamiento de nuestro modelo coincidan con los del catedrático. Además, se procederá a modificar las características geométricas (luz, inclinación de las almas, ancho de los cajones y separación de los cajones) y la posición de la carga para ver cómo influyen en dicho comportamiento.

Por último, para analizar el comportamiento se han estudiado los distintos desplazamientos, las distorsiones, los esfuerzos y las tensiones de cada modelo.

2 BASE METODOLÓGICA

El análisis de la sensibilidad de las distintas características geométricas en las secciones de doble viga cajón 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 D. Javier Manterola Armisen^[1].

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 tienen algunas de las características geométricas de los puentes formados por dos vigas cajón.

Para la realización del estudio se ha empleado el programa Midas Civil 2022^[3]. En él se han realizado los diferentes tipos de modelos, estableciendo analogías entre ellos para poder compararlos, y teniendo siempre como referencia el modelo propuesto por D. Javier Manterola en su libro.

Además, mediante el programa AutoCAD^[4] se han realizado los croquis.

Por último, se ha utilizado el programa Excel^[5] para la modificación de los nodos del puente para ir variando las características geométricas y para la representación de los desplazamientos, distorsión, esfuerzos y tensiones que han sido estudiados para cada uno de los casos.

2.1. Consideraciones generales

Con el fin de lograr un análisis pormenorizado de todos los casos, se ha establecido, en todos los modelos, elementos tipo placa gruesa (considerando la deformación por cortante) de 0.33 metros en la dirección X, 0.6 metros en la dirección Y, y un espesor igual a 0.2 metros.

Las direcciones de los ejes de coordenadas serán las siguientes:

- Eje X: determina la dirección del puente, la luz.
- Eje Y: la anchura del puente.
- Eje Z: la altura del puente.

Para las condiciones de contorno se ha empleado la herramienta “rigid link” del Midas Civil en ambos extremos del puente para representar dos diafragmas. A un lado del puente se han restringido todos los desplazamientos y giros alrededor del eje X (u_x , u_y , u_z y θ_x), mientras que en el otro apoyo solamente se restringen los desplazamientos en Y y Z y el giro alrededor del eje X (u_y , u_z y θ_x), dejando libre el desplazamiento del eje X (u_x) en comparación con el otro apoyo.

Como modelo de referencia se tomará un puente de 40 metros de longitud y 24 metros de ancho y, a partir de este, se irán modificando las características geométricas: luz, inclinación de almas, ancho y separación de cajones.

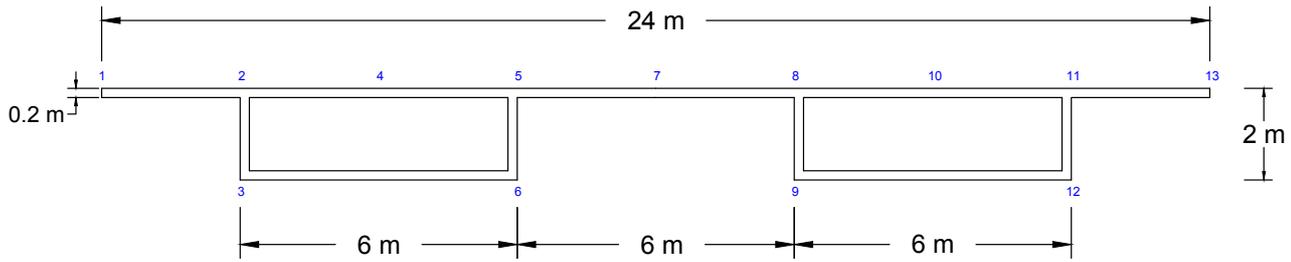


Figura 1. Geometría básica de la sección transversal

La carga aplicada para todos los casos será de 1000 kN y las cinco posiciones han sido representadas en la Figura 2. Estas se establecen en los nudos '1', '2', '4', '5' y '7' y, por simetría, los casos correspondientes a los nudos '8', '10', '11' y '13' son iguales a los anteriores. Todos los modelos aplican la carga puntual en la sección transversal del centro del vano.

Además, para facilitar la comparación con los resultados de D. Javier Manterola se ha establecido el mismo orden de nomenclatura de los nudos.

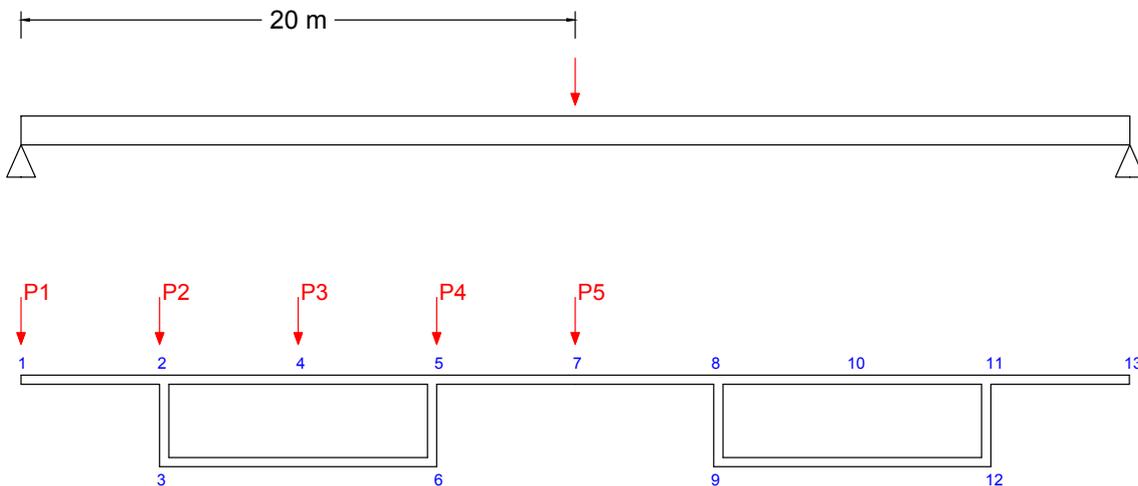


Figura 2. Posición cargas puntuales

Por último, el material empleado ha sido un hormigón HP-30, cuyas propiedades son las siguientes:

Características del hormigón HP-30	
Resistencia característica (f_{ck})	30 MPa
Módulo de elasticidad (E_c)	35220 MPa
Peso específico (γ_c)	25 kN/m ³
Coefficiente de Poisson (ν)	0.2

Tabla 1: Propiedades del hormigón HP-30

2.1 Descripción de los casos considerados

A continuación, se procede a describir cuales son las características geométricas que han ido variando para estudiar como cambia el comportamiento del puente con cada una de ellas.

2.1.1 Caso 1: Variación de la luz

Para el primer caso, se ha modificado la luz del puente. Se ha ido incrementando desde los 40 metros que utiliza D. Javier Manterola para su modelo hasta los 80 metros, aumentando 10 metros la longitud en cada modelo. La sección transversal se ha mantenido constante e igual al modelo básico de referencia.

2.1.2 Caso 2: Variación de la inclinación de las almas

Para este segundo caso, la característica geométrica que ha sido modificada ha sido la inclinación de las almas. Partiendo del modelo inicial donde las almas tienen un ángulo de 90° , se han realizado seis modelos más con las siguientes inclinaciones: 80° , 70° , 60° , 50° , 45° y 40° . No se han realizado estudios con inclinaciones menores de 40° porque no permiten mantener la anchura del cajón del modelo de referencia.

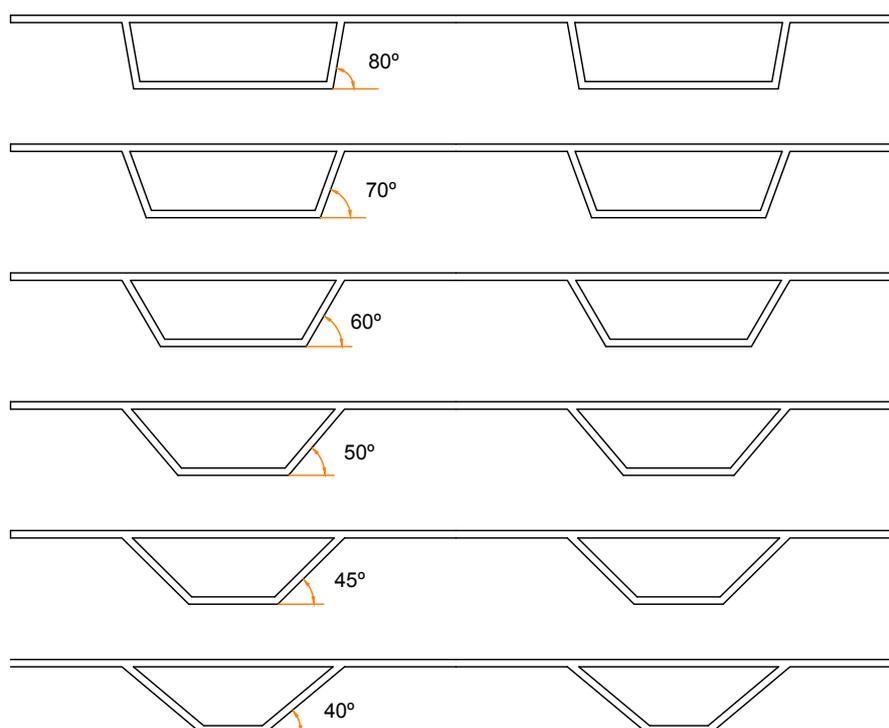


Figura 3. Distintos modelos variando la inclinación de las almas

2.1.3 Caso 3: Variación del ancho de los cajones

El caso 3 corresponde con la modificación del ancho de los cajones, donde se ha variado desde los 2 hasta los 8 metros, incrementando en cada modelo 1 metro. Este cambio supone una variación de la longitud de la losa de la sección transversal. Las demás características geométricas permaneces inalteradas: 40 metros de luz y 2 metros de canto.

A continuación, se representan algunos de los modelos, que sirven de guía para explicar como se ha realizado los cambios.

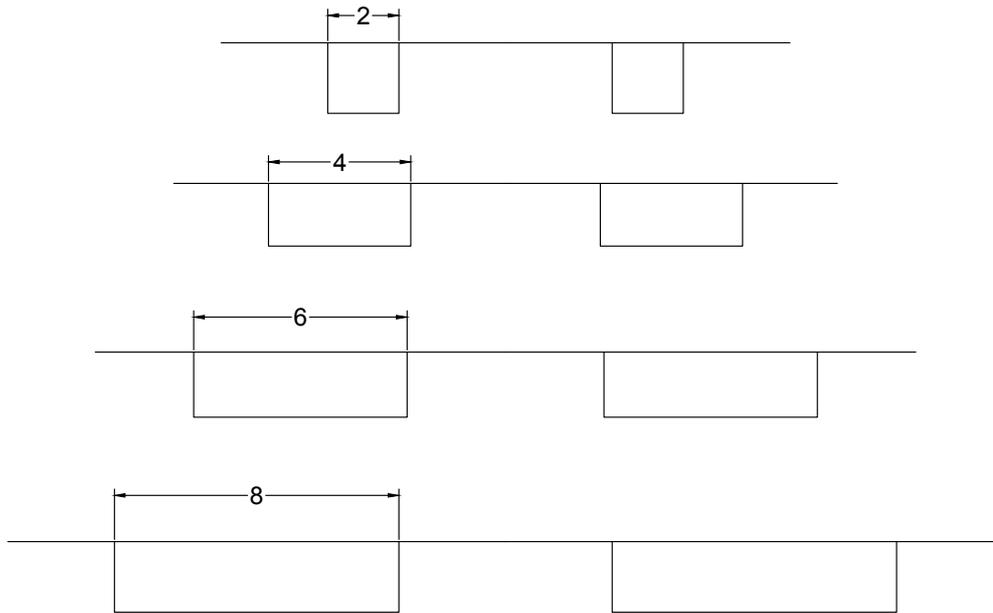


Figura 4. Distintos modelos variando el ancho de los cajones (m)

2.1.4 Caso 4: Variación de la separación entre cajones

Se han realizado otros 4 modelos variando el ancho de los cajones, variando desde los 2 hasta los 8 metros. Esto supone, lógicamente, una variación de la longitud de la losa de la sección transversal.

Las demás características geométricas permaneces inalteradas: 40 metros de luz y 2 metros de canto.

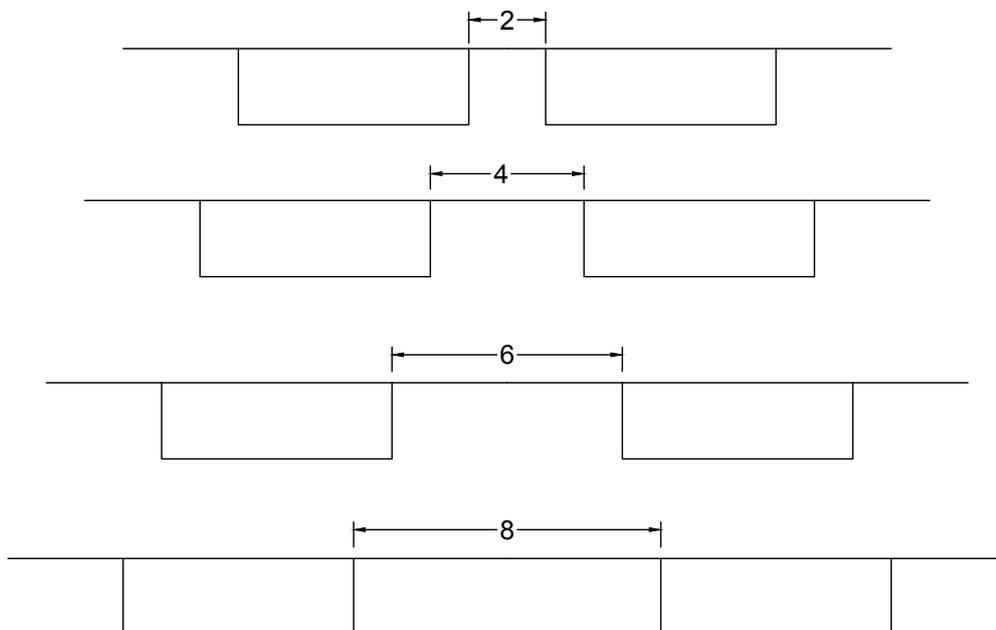


Figura 5. Distintos modelos variando la separación entre cajones (m)

3 COMPORTAMIENTO DE UN TABLERO FORMADO POR DOS VIGAS CAJÓN

En el presente trabajo se procede a estudiar el comportamiento de un tablero formado por dos vigas cajón. En primer lugar se estudiará la respuesta ante una carga puntual de 100 toneladas colocadas en la losa superior sobre el alma izquierda del cajón izquierdo, con el objetivo de comparar los resultados con los obtenidos por D. Javier Manterola en su estudio del capítulo V de su libro ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I’^[1].

La finalidad de este capítulo es comprobar que los resultados obtenidos coinciden con los de D. Javier Manterola y, por ello, se obtendrán los desplazamientos, distorsión, esfuerzos y tensiones, al igual que el autor.

3.1. Descripción del modelo

El modelo utilizado para el estudio de D. Javier Manterola se trata se un tablero formado por dos vigas cajón, biapoyado, con una luz de 40 metros y una carga de 100 toneladas colocada en el alma izquierda del cajón izquierdo de la sección central.

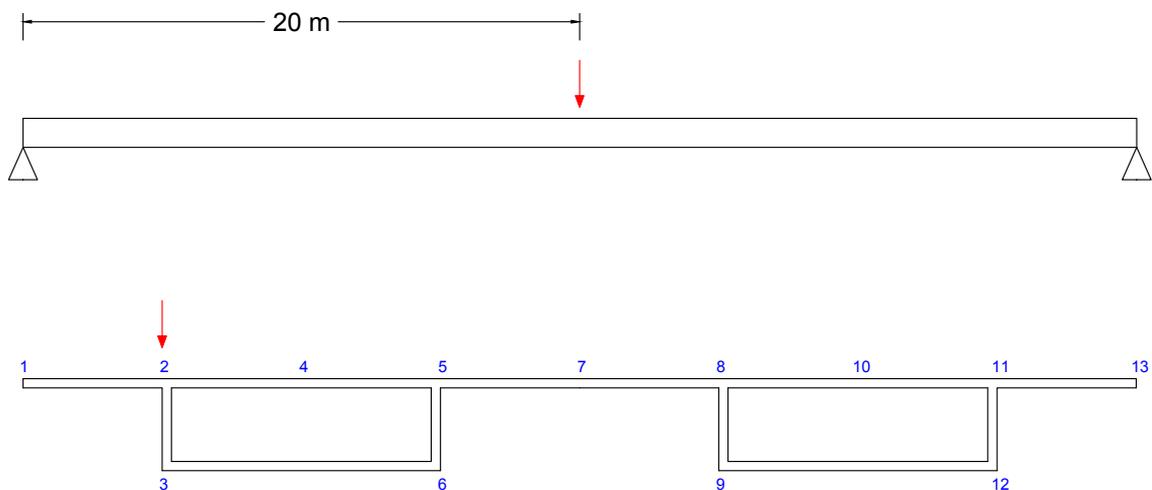


Figura 6. Modelo de D. Javier Manterola

El método de análisis empleado para obtener los resultados es el Método de los Elementos Finitos (MEF), que se implementa en MIDAS^[3].

3.2. Respuesta ante carga puntual

3.1.1 Desplazamientos

Los mayores desplazamientos se producen en las proximidades de la carga, atenuándose a medida que nos alejamos de esta, tanto en la dirección 'x' como en la dirección 'y'.

En las figuras 7 y 8, se muestran dichos desplazamientos para las secciones $x = 20$ m (que corresponde con la sección en la que se aplica la carga) y $x = 15$ m, para mostrar como los desplazamientos van disminuyendo conforme se va alejando del punto de aplicación de la carga.

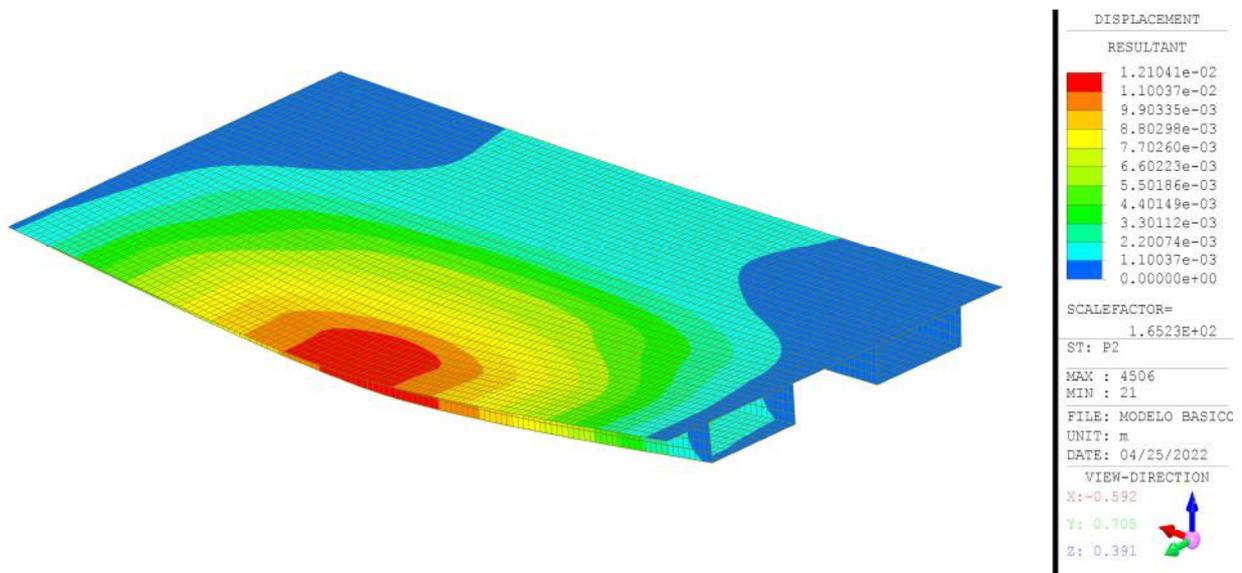


Figura 7. Desplazamientos (m) del modelo de D. Javier Manterola

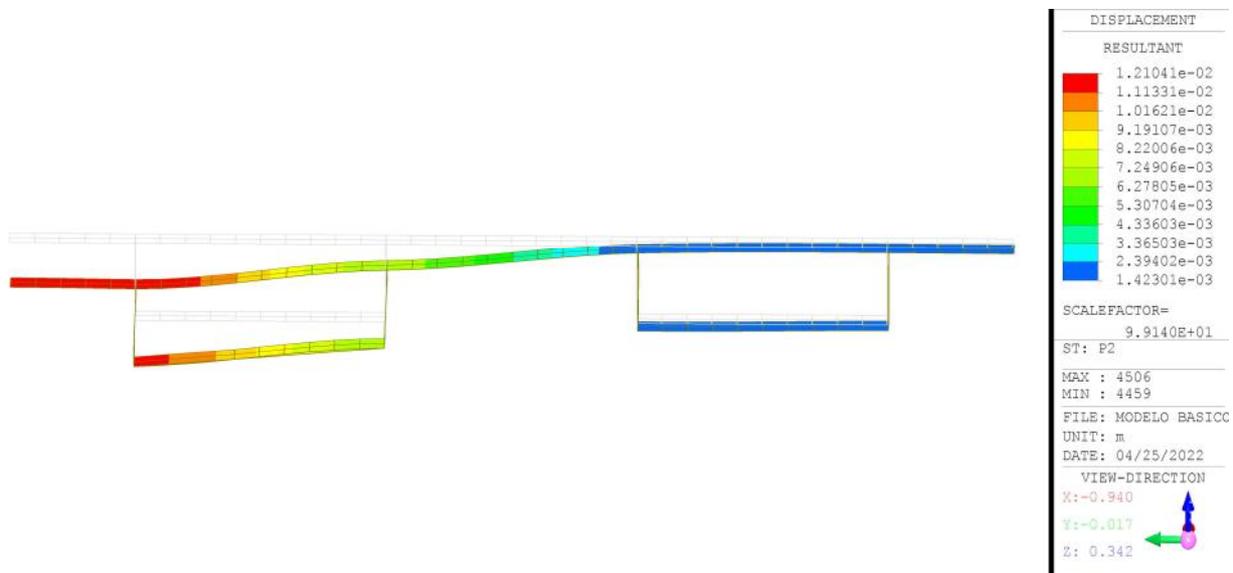


Figura 8. Desplazamientos (m) de la sección $x=20$ m

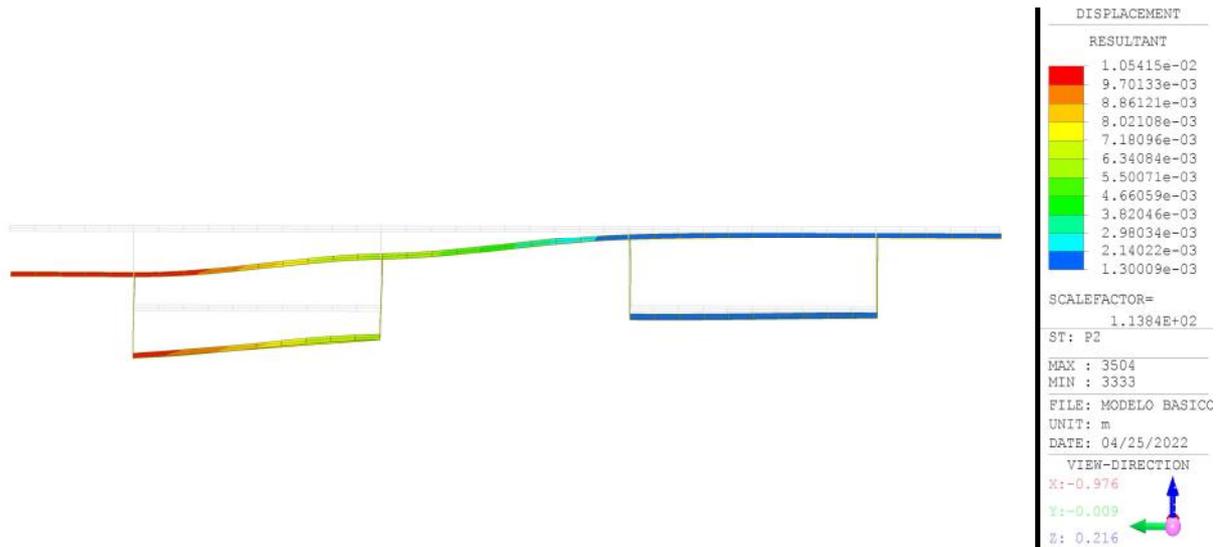


Figura 9. Desplazamientos (m) de la sección x=15 m

Realizando una comparación entre los diferentes valores del desplazamiento en el eje z que sufren distintos puntos del puente (Figura 10) se obtiene la siguiente gráfica (Figura 11).

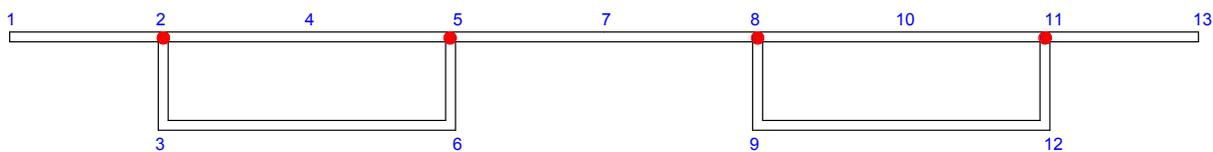


Figura 10. Puntos de estudio para la distribución de la flecha

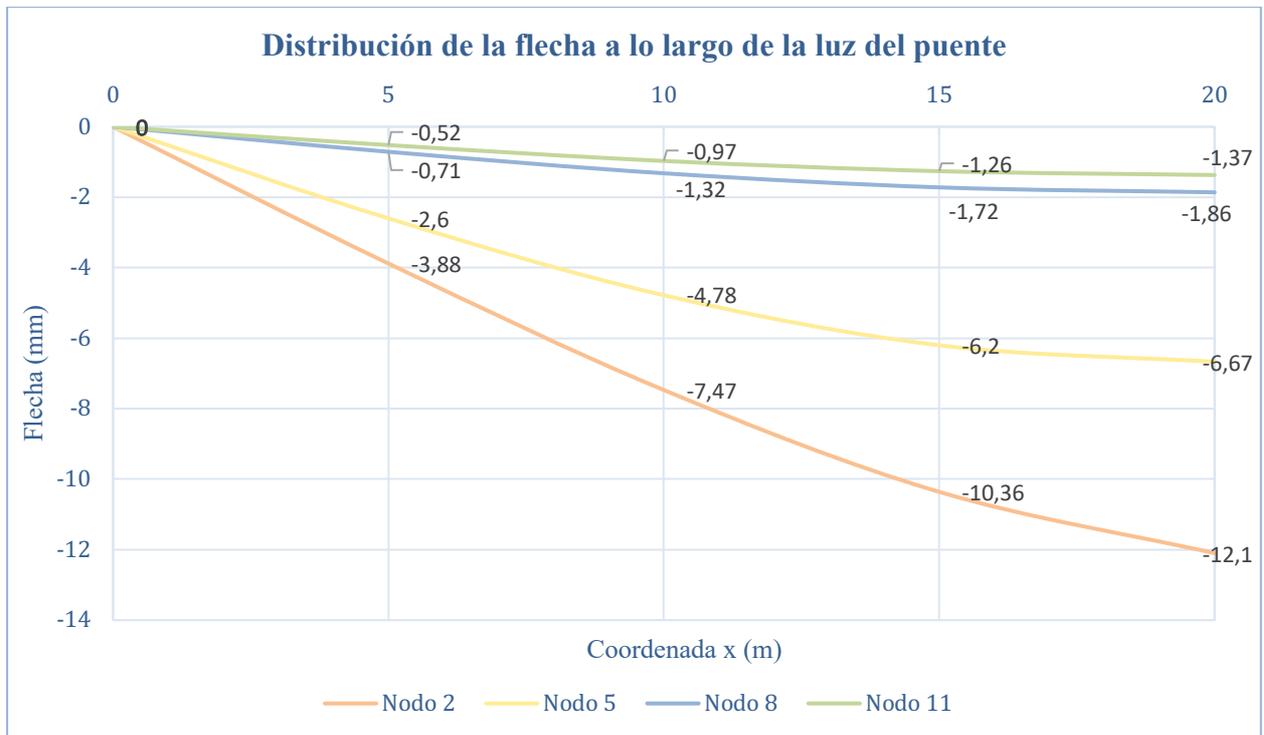


Figura 11. Distribución de la flecha a lo largo de la luz en los nodos 2, 5, 8 y 11

En la figura anterior (Figura 11) se observa que el nudo 2 presenta la flecha máxima y el nudo 11 la flecha

mínima. Por tanto, se comprueba que los desplazamientos se van atenuando a medida que se van alejando del punto de aplicación de la carga.

Atendiendo a los resultados obtenidos por D. Javier Manterola para los desplazamientos de las secciones $x=20$ m y $x=15$ m y la distribución de los mismo a lo largo de los nudos 2, 5, 8 y 11, se puede apreciar la similitud de las gráficas.

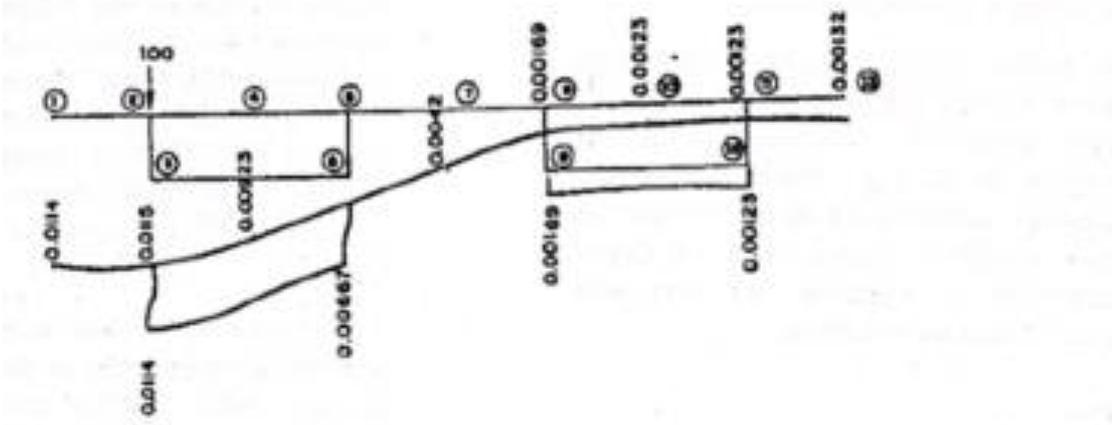


Figura 12. Desplazamientos de la sección $x=20$ m (Estudio D. Javier Manterola)

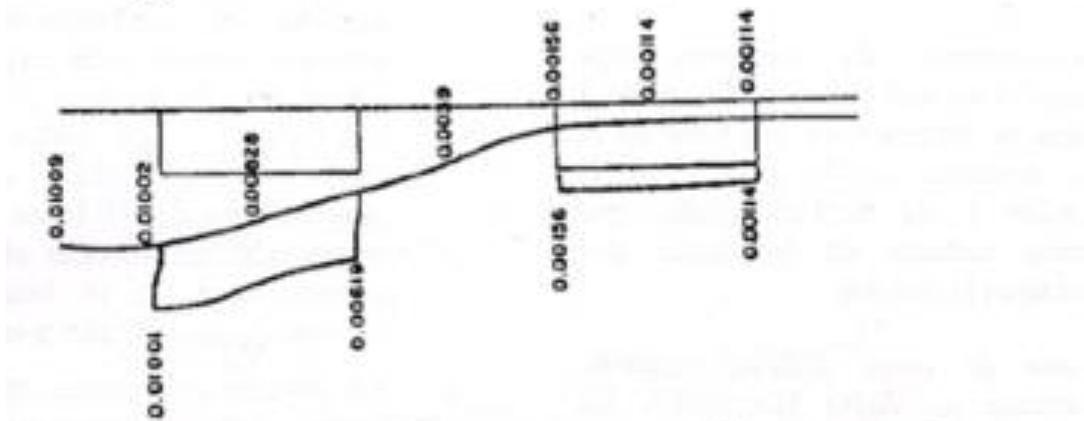


Figura 13. Desplazamientos de la sección $x=15$ m (Estudio D. Javier Manterola)

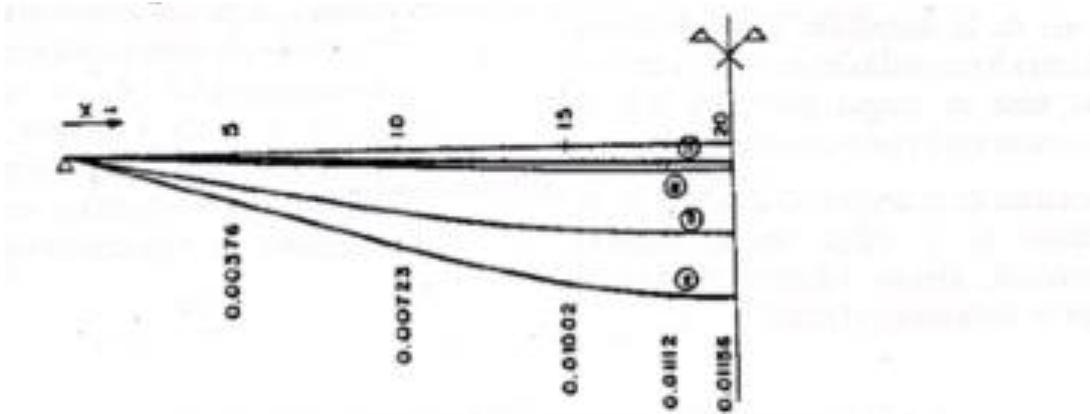


Figura 14. Desplazamientos a lo largo de la luz de los nudos 2, 5, 8 y 11 (Estudio D. Javier Manterola)

3.1.2 Distorsión

La distorsión es la deformación que presenta la sección ante la carga aplicada. Para calcular la distorsión de ambos cajones, se han obtenido los ángulos que forman los cajones deformados con respecto a su indeformada,

como se representa en la Figura 15, y se ha aplicado la siguiente fórmula:

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

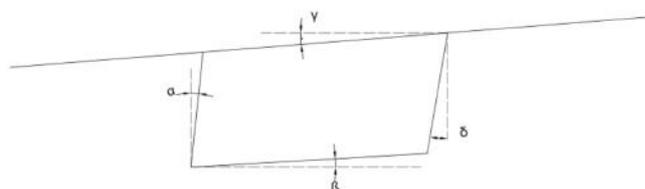


Figura 15. Ángulos para el cálculo de la distorsión

En las siguientes tablas se indican los valores de dichos ángulos y de la distorsión a lo largo de la luz del puente. Como el puente es simétrico, basta con estudiar hasta $x = 20$ m, pues la otra mitad tiene los mismos resultados.

Distancia desde el apoyo (eje x)	α (rad)	β (rad)	γ (rad)	δ (rad)	Distorsión (rad)
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
5	0,000045	0,000215	0,000214	0,000063	0,000268
10	0,000111	0,000448	0,000448	0,000147	0,000576
15	0,000195	0,000694	0,000694	0,000250	0,000916
16	0,000211	0,000740	0,000740	0,000269	0,000980
17	0,000225	0,000783	0,000783	0,000286	0,001038
18	0,000236	0,000821	0,000821	0,000300	0,001089
19	0,000243	0,000852	0,000854	0,000309	0,001129
20	0,000246	0,000864	0,000905	0,000313	0,001164

Tabla 2. Ángulos y distorsión del modelo de referencia a lo largo de la luz del cajón izquierdo

Distancia desde el apoyo (eje x)	α (rad)	β (rad)	γ (rad)	δ (rad)	Distorsión (rad)
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
5	0,000002	0,000031	0,000031	0,000004	0,000034
10	0,000001	0,000058	0,000058	0,000008	0,000062
15	0,000002	0,000076	0,000075	0,000013	0,000083
16	0,000003	0,000078	0,000078	0,000013	0,000085
17	0,000003	0,000080	0,000079	0,000013	0,000088
18	0,000004	0,000081	0,000081	0,000014	0,000090
19	0,000004	0,000082	0,000081	0,000014	0,000090
20	0,000004	0,000082	0,000082	0,000014	0,000091

Tabla 3. Ángulos y distorsión del modelo de referencia a lo largo de la luz del cajón derecho

Si se relacionan todos estos valores, se obtiene la siguiente gráfica, donde se aprecia que la distorsión es mayor en el cajón que se encuentra cargado (cajón izquierdo). Es decir, la carga puntual descentrada provoca una perturbación que distorsiona la sección en la zona de la carga, reduciéndose a medida que nos alejamos de esta.

Por ello, la distorsión apenas varía en el cajón derecho, mientras que en el cajón izquierdo se da el valor máximo en la sección central del puente.

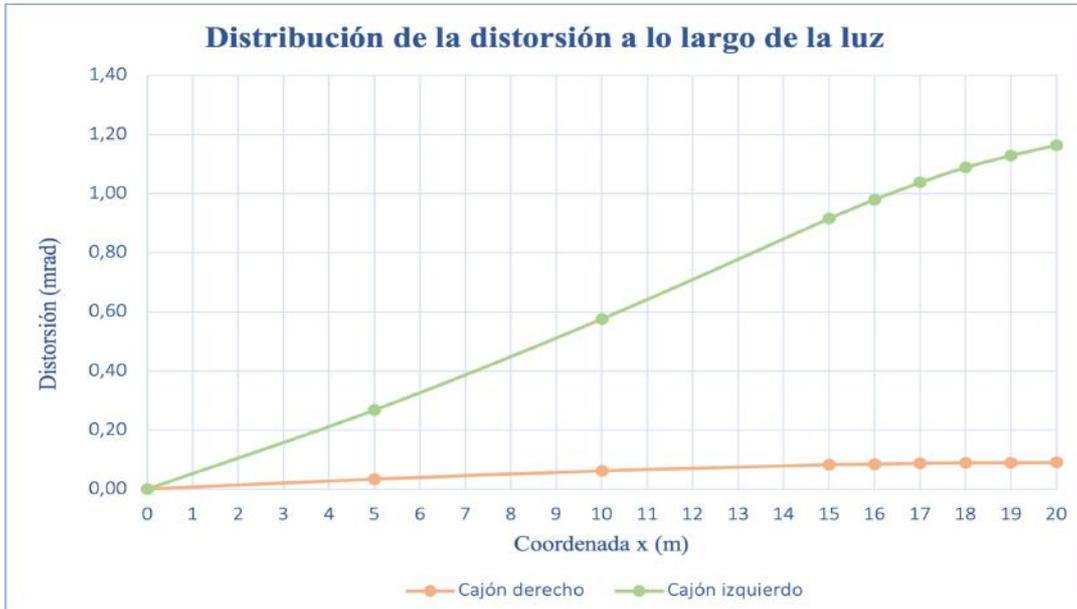


Figura 16. Distribución de la distorsión a lo largo de la luz (estudio D. Javier Manterola)

3.1.3 Esfuerzos

Para el estudio de los esfuerzos se procede a analizar los cuatro tipos que aparecen en el puente: los esfuerzos Q_x y M_y , que proporcionan el efecto tipo losa del intercambio de esfuerzos entre los dos cajones, y N_x y N_{xy} , que representan el efecto tipo membrana de la losa superior.

Para este caso de carga en concreto, el momento M_y es prácticamente despreciable, ya que, como se observa en la figura 17, únicamente alcanza el valor de 0,4099 kNm/m en la sección central.

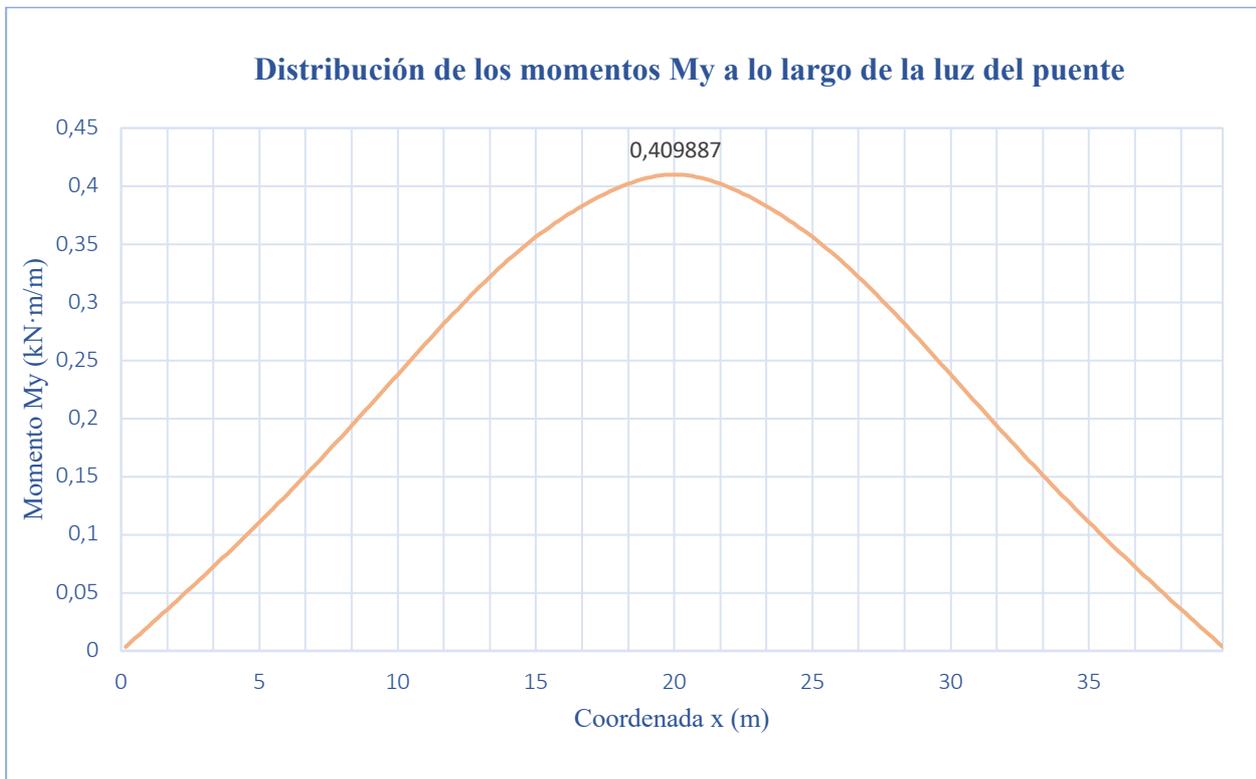


Figura 17. Distribución de los momentos M_y a lo largo de la luz (estudio D. Javier Manterola)

Por tanto, al ser el momento M_y despreciable, el efecto losa queda representado únicamente por el esfuerzo cortante Q_y , representado en las figuras 18 y 19.

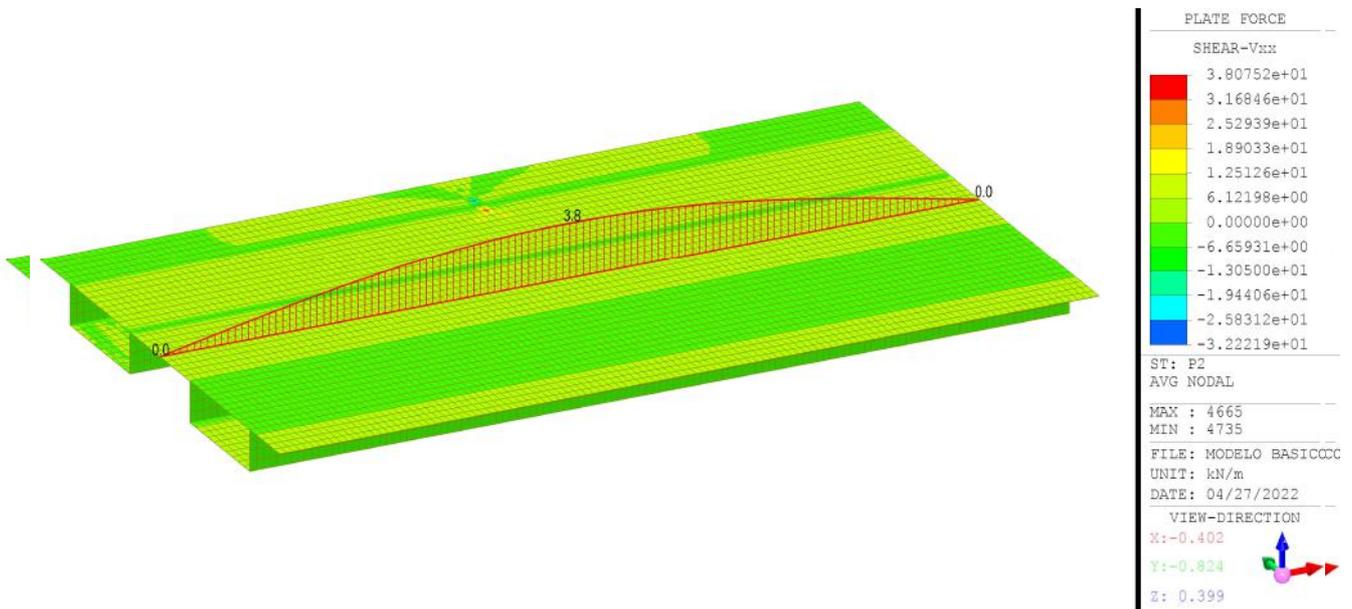


Figura 18. Distribución del cortante Q_y a lo largo de la luz (estudio D. Javier Manterola)

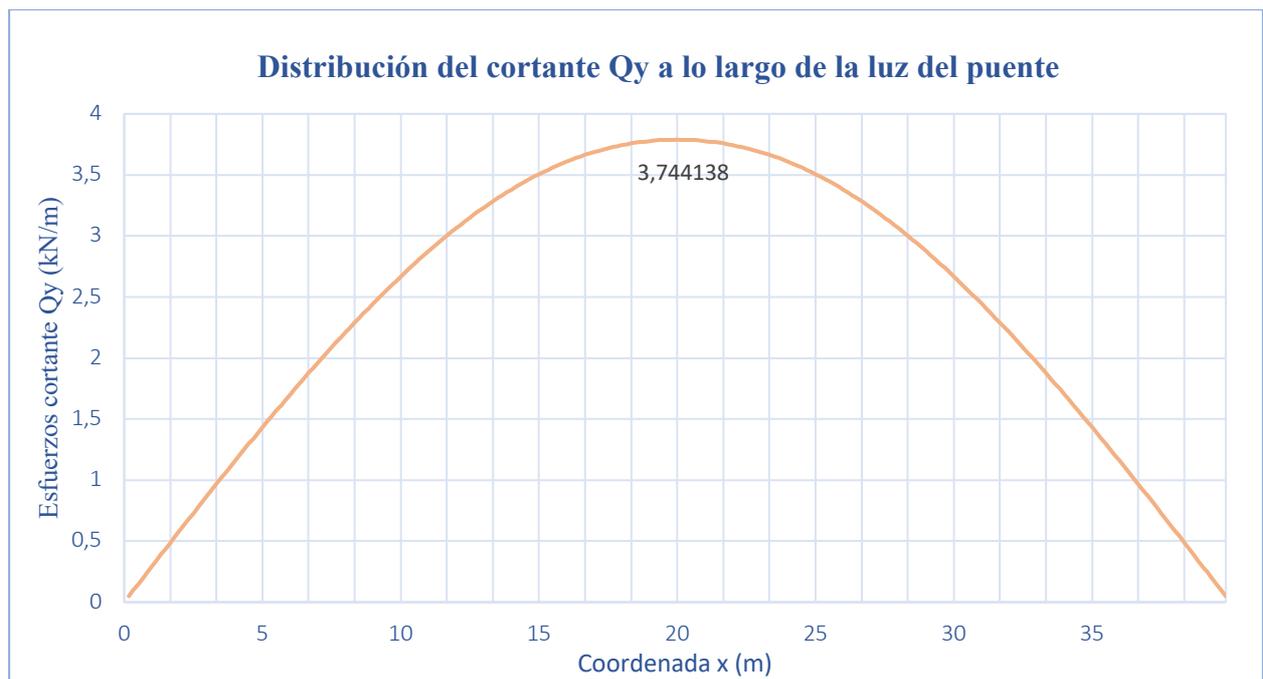


Figura 19. Distribución del cortante Q_y a lo largo de la luz (estudio D. Javier Manterola)

Se observa que el valor del esfuerzo cortante máximo se da en la sección central ($x = 20$ m), alcanzando un valor de 3,8 kN/m, y que en los extremos los esfuerzos son nulos.

Igualmente, se han representado los esfuerzos N_x y N_{xy} , que representan el efecto tipo membrana de la losa superior.

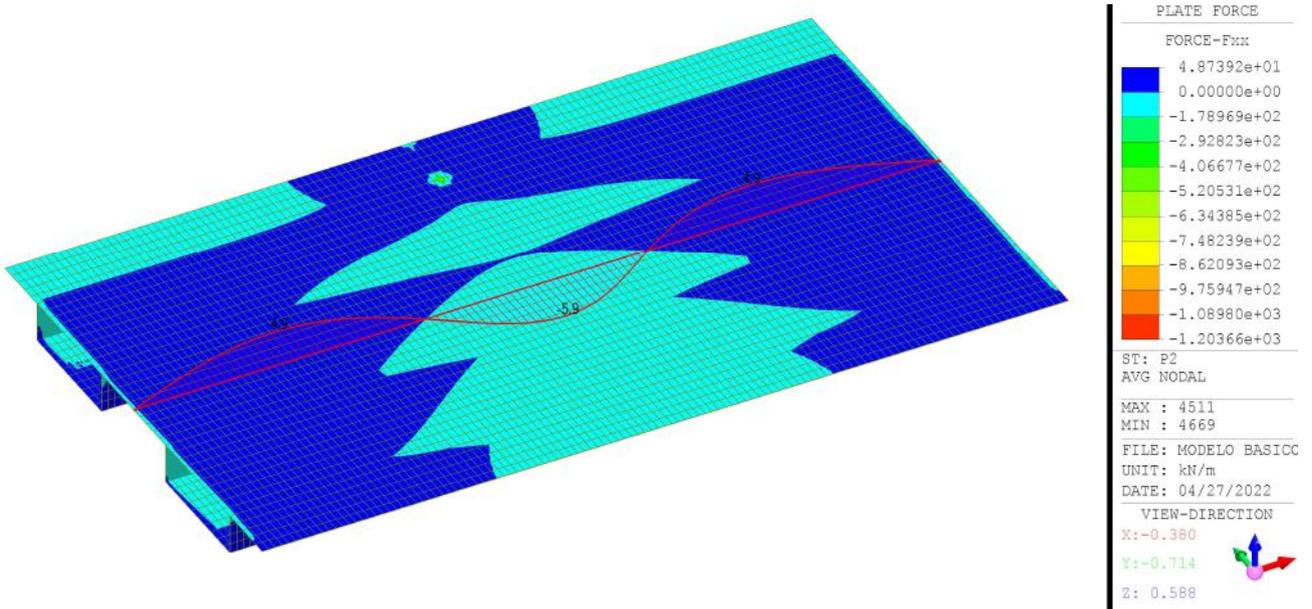


Figura 20. Distribución del axil N_y a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)

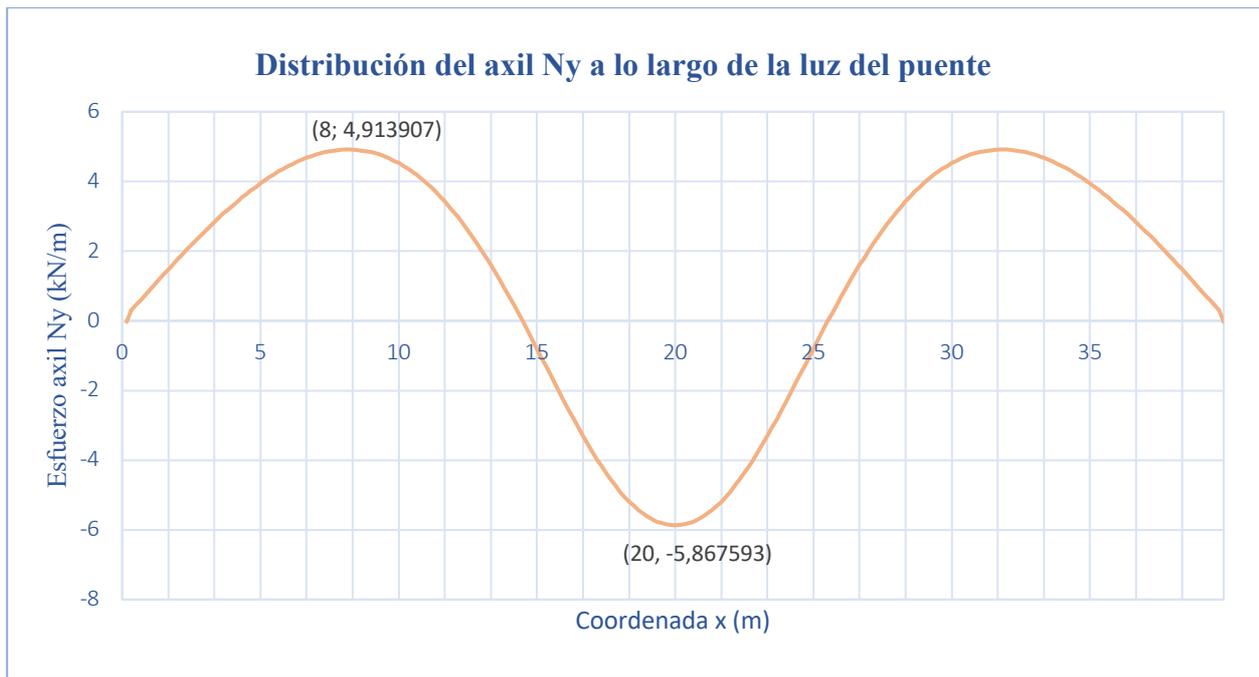


Figura 21. Distribución del axil N_y a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)

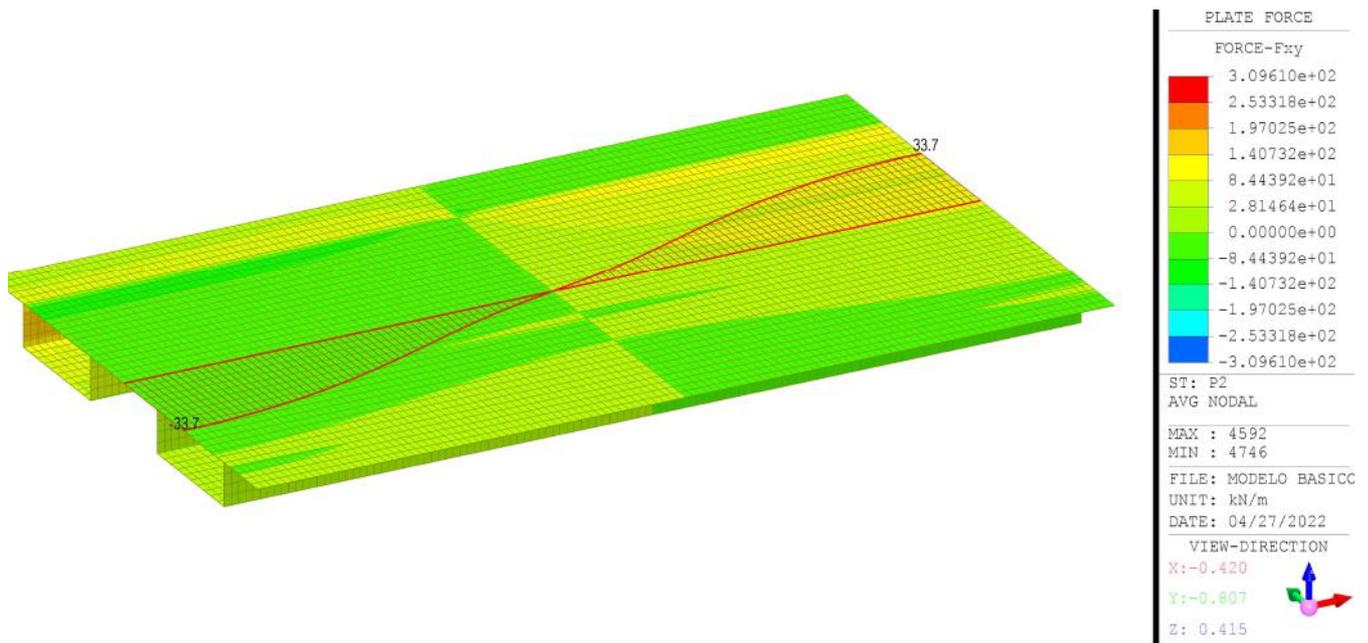


Figura 22. Distribución del cortante N_{xy} a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)

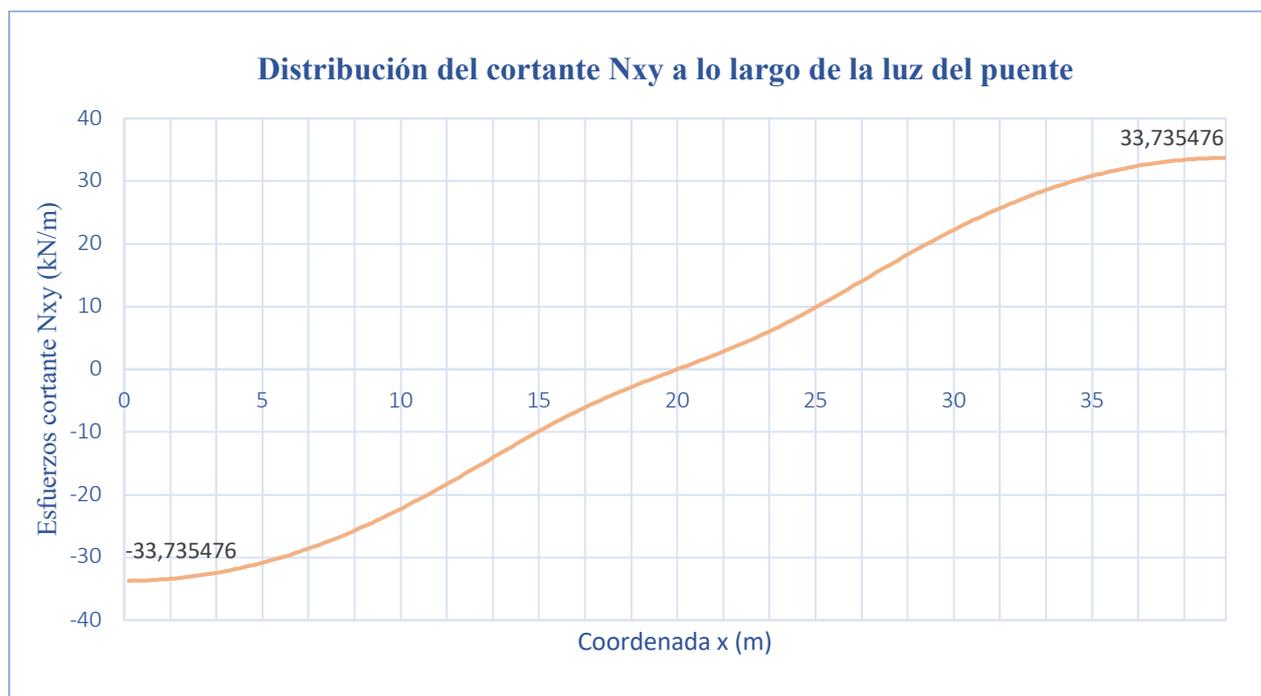


Figura 23. Distribución del cortante N_{xy} a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)

Analizando la gráfica del cortante N_{xy} , se aprecia que en la sección central presenta un valor nulo, es decir, no se deforma longitudinalmente, y en los extremos se dan los valores máximos. Este cortante corresponde en efecto a uno de una viga biapoyada.

Comparando los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que los esfuerzos correspondientes al efecto losa tienen una menor influencia. La cuantía del esfuerzo Q_x depende de la relación entre la rigidez de la losa y la rigidez de los cajones. Por tanto, debido a las dimensiones de la estructura consideradas, la cuantía de este esfuerzo es muy pequeña.

Por último, se muestran los esfuerzos obtenidos por D. Javier Manterola en su estudio para comprobar la similitud entre los resultados.

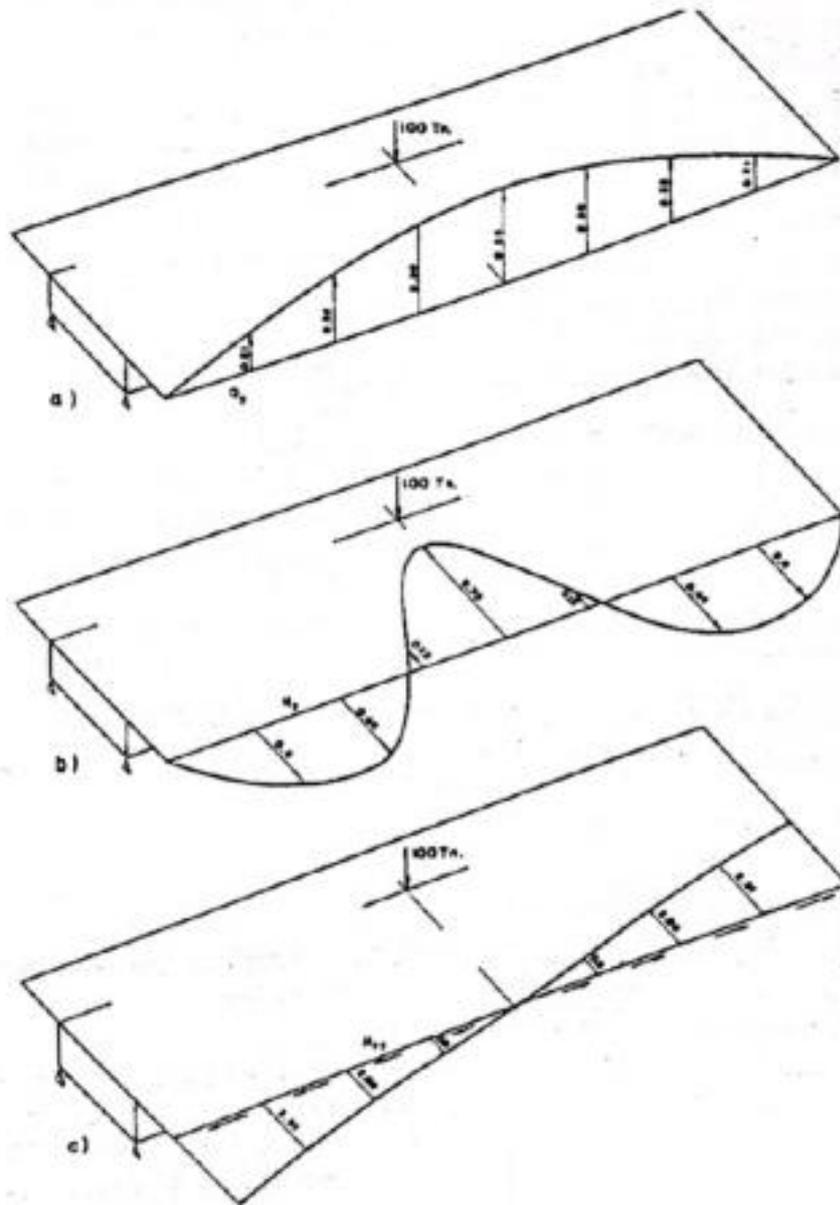


Figura 24. Esfuerzos obtenidos por D. Manterola

3.1.4 Tensiones

En este apartado se va a realizar un análisis de las tensiones.

En primer lugar, se representan las tensiones normales a lo largo de la luz del puente en los nudo 2, 3, 5 y 6, que corresponden con los nudos del cajón izquierdo, que resulta de mayor interés, pues es el que tendrá las mayores tensiones por estar cargado directamente.

La tensión normal provoca una gran perturbación en el punto de aplicación de la carga, que se va atenuando y distribuyendo conforme nos alejamos de dicho punto.

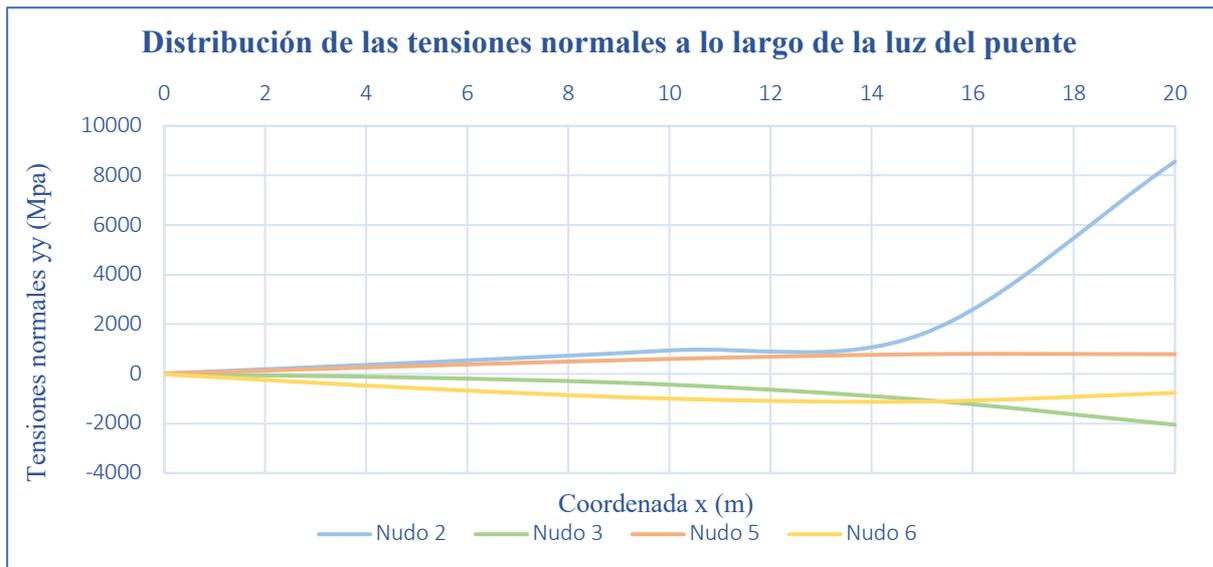


Figura 25. Distribución de las tensiones normales (MPa) a lo largo de la luz (estudio D. Manterola)

Se observa que el valor máximo de la tensión de compresión se da en el nudo 2, mientras que la tensión máxima de tracción se encuentra en el nudo 5, ambos en la sección central.

Además, cabe destacar que al alejarnos de la sección central, las tensiones se reducen, hasta alcanzar valores nulos en la sección $x = 0$ m.

Al igual que D. Javier Manterola, se han obtenido las tensiones normales en las secciones $x = 20$ m y $x = 15$ m.

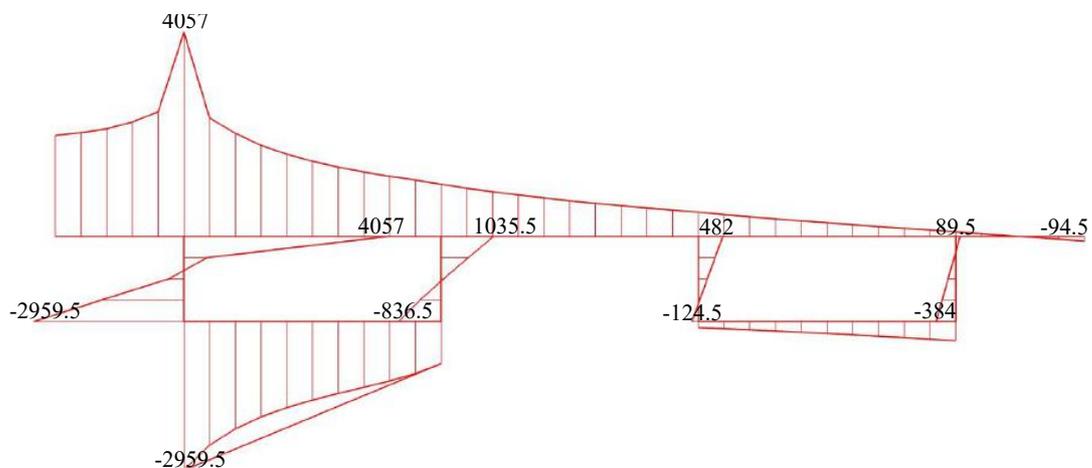


Figura 26. Distribución de las tensiones normales (MPa) en $x = 20$ m (estudio D. Manterola)

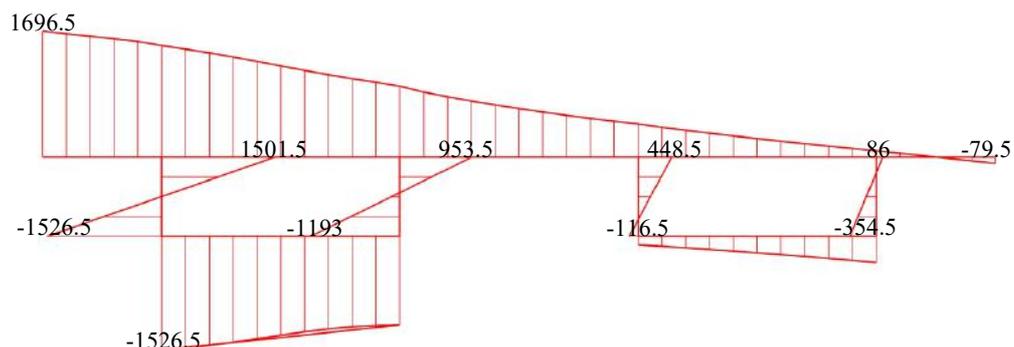


Figura 27. Distribución de las tensiones normales (MPa) en $x = 15$ m (estudio D. Manterola)

Por último, se comprueba que los resultados obtenidos se asemejan con los obtenidos por D. Javier Manterola en su estudio. La diferencia entre ellos se debe a la precisión del programa Midas Civil^[3], que no ha permitido emplear más nodos para que los resultados fueran más exactos.

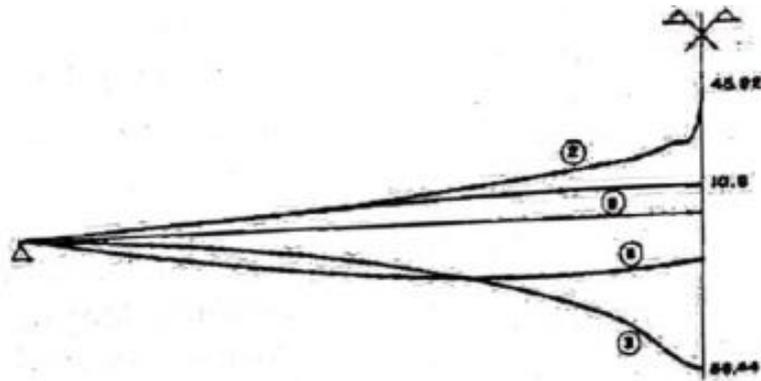


Figura 28. Distribución de σ_{xx} (MPa) a lo largo de la luz en los nudos 2, 3, 5 y 6 obtenidos por D. Manterola

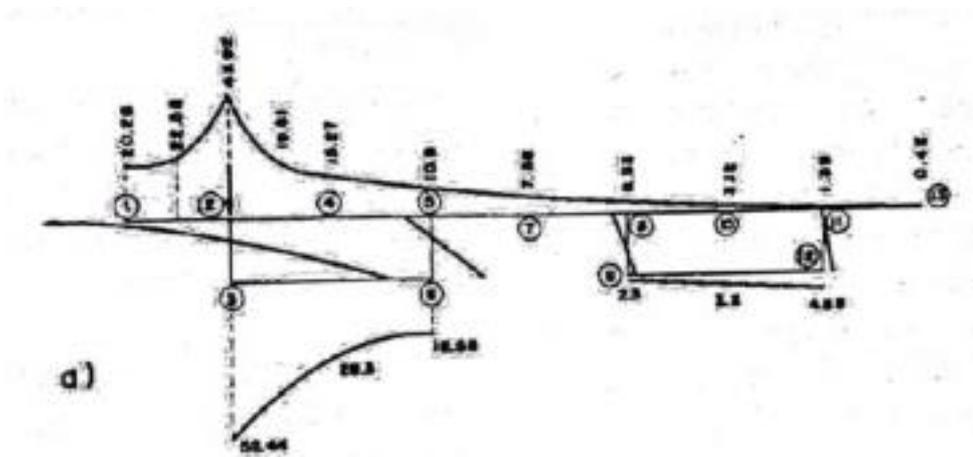


Figura 29. Distribución de σ_{xx} (MPa) en el centro de la luz ($x=20m$), obtenida por D. Manterola

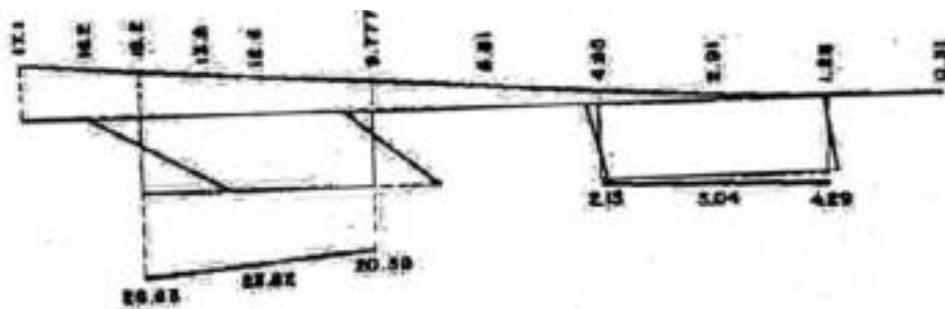


Figura 30. Distribución de σ_{xx} (MPa) para $x=15m$, obtenida por D. Manterola

3.1.5 Influencia de la situación de la carga

A continuación, se analiza la influencia que tiene la situación de la carga puntual. Se estudia como varían los desplazamientos para compararlos con los obtenidos por D. Javier Manterola.

Para ello, se aplica una carga igual que la anterior (de 1000 kN) en los puntos 1, 2, 4, 5, y 7 del tablero en la sección central. Solo se estudian estos casos porque al ser la estructura simétrica, los resultados si la carga se sitúa en los puntos 8, 10, 11 y 12 son los mismos.

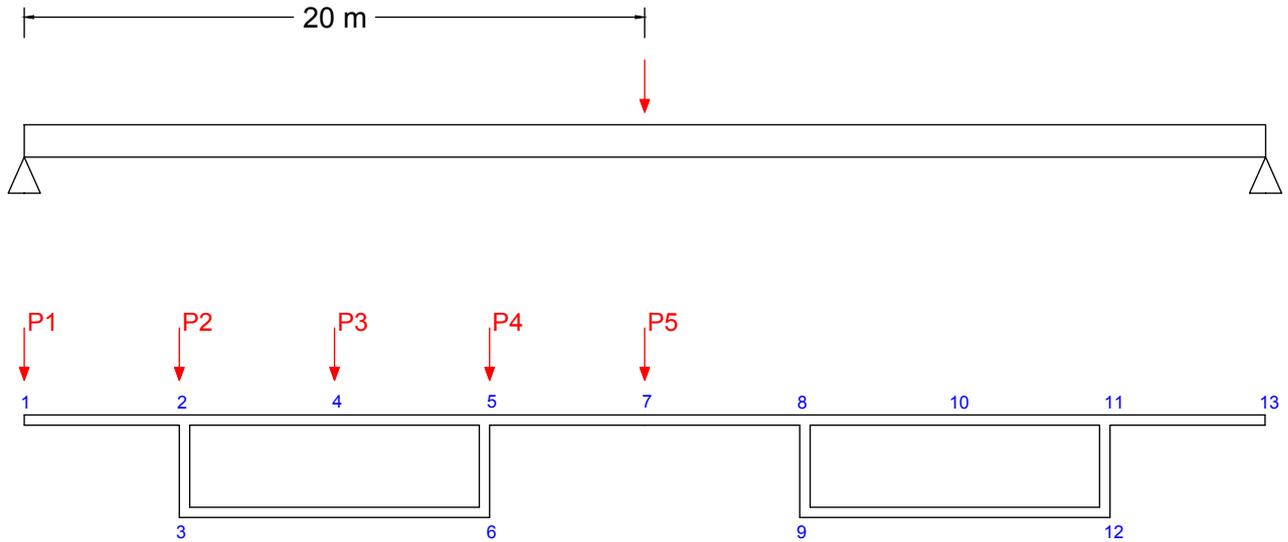


Figura 31. Situación de las cargas puntuales

Para cada uno de los distintos casos de cargas, los desplazamientos obtenidos para la sección central ($x = 20\text{ m}$) son los siguientes:

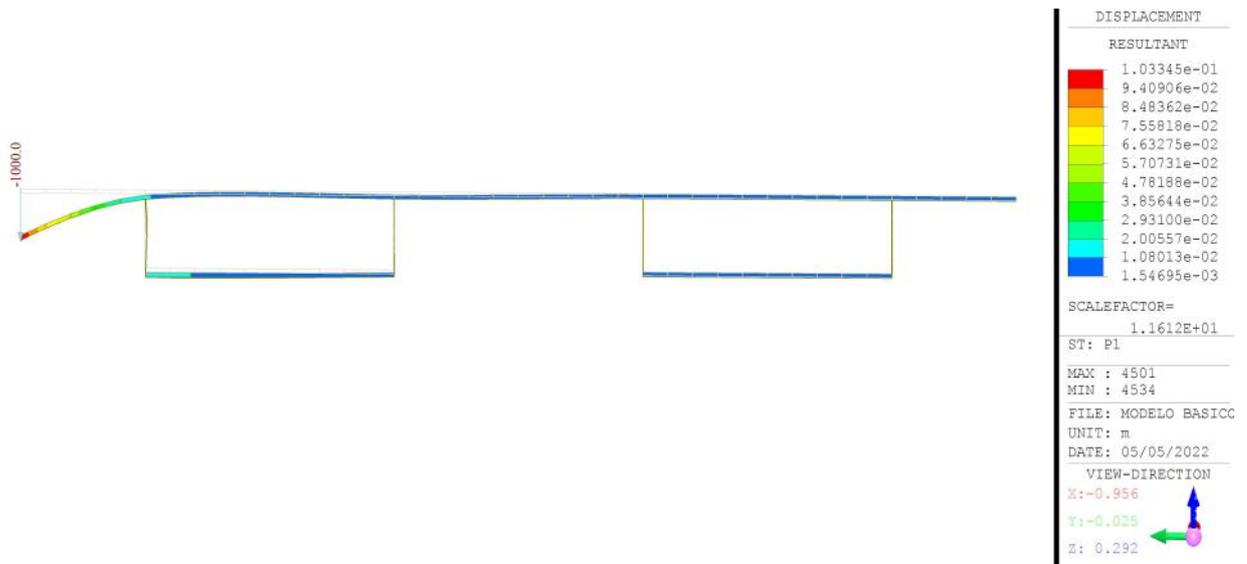


Figura 32. Desplazamientos (m) de la sección $x=20\text{ m}$ para la carga P1

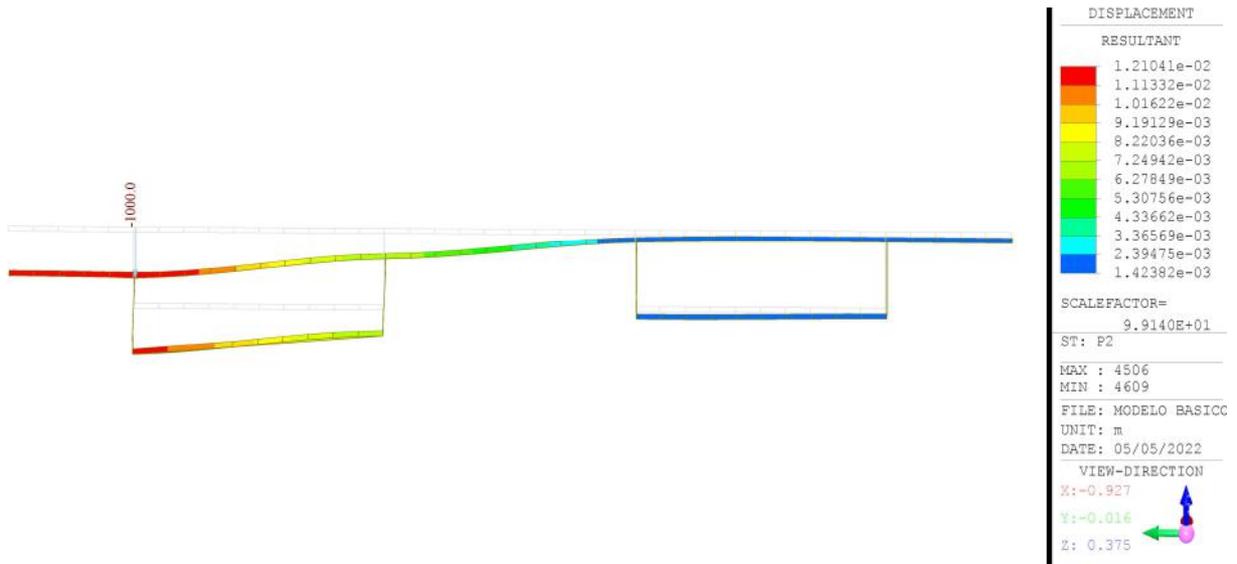


Figura 33. Desplazamientos (m) de la sección x=20 m para la carga P2

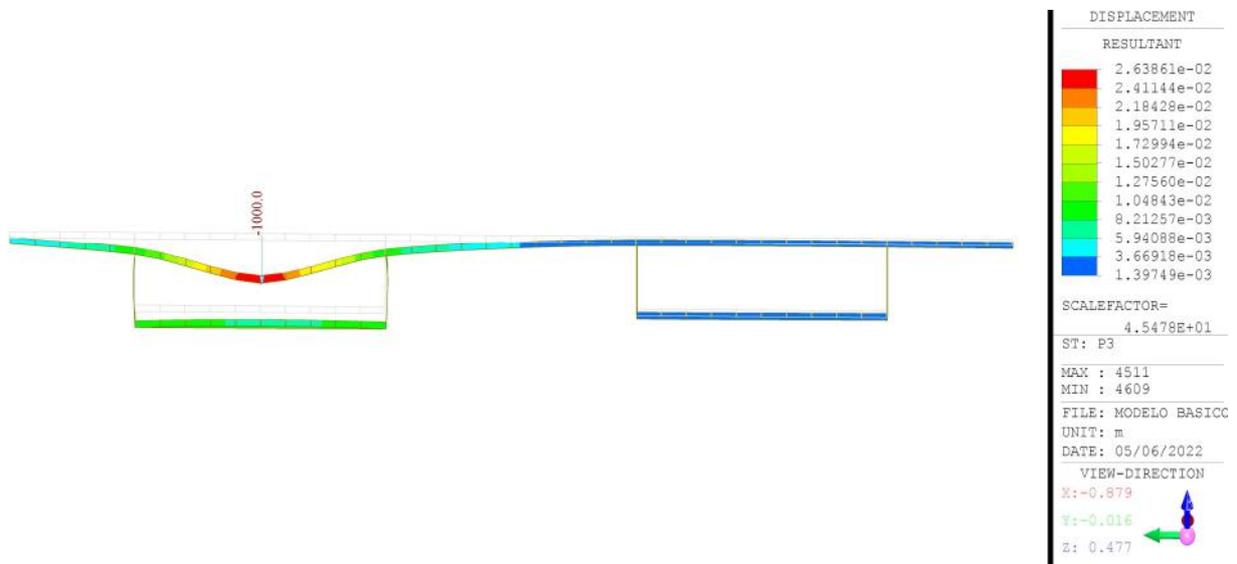


Figura 34. Desplazamientos (m) de la sección x=20 m para la carga P3

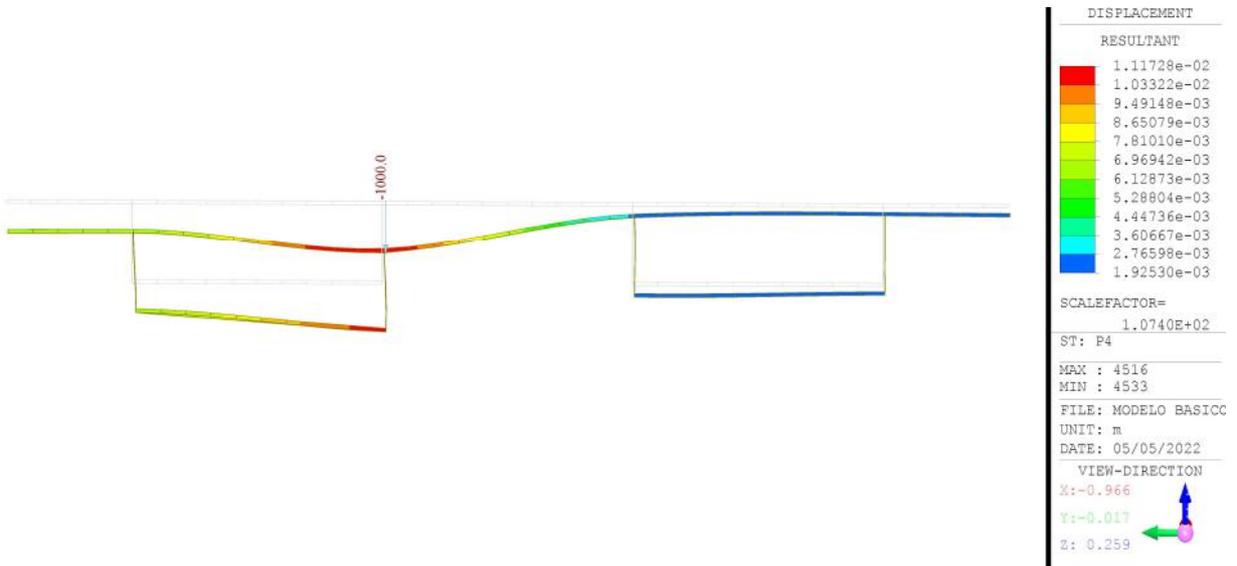


Figura 35. Desplazamientos (m) de la sección x=20 m para la carga P4

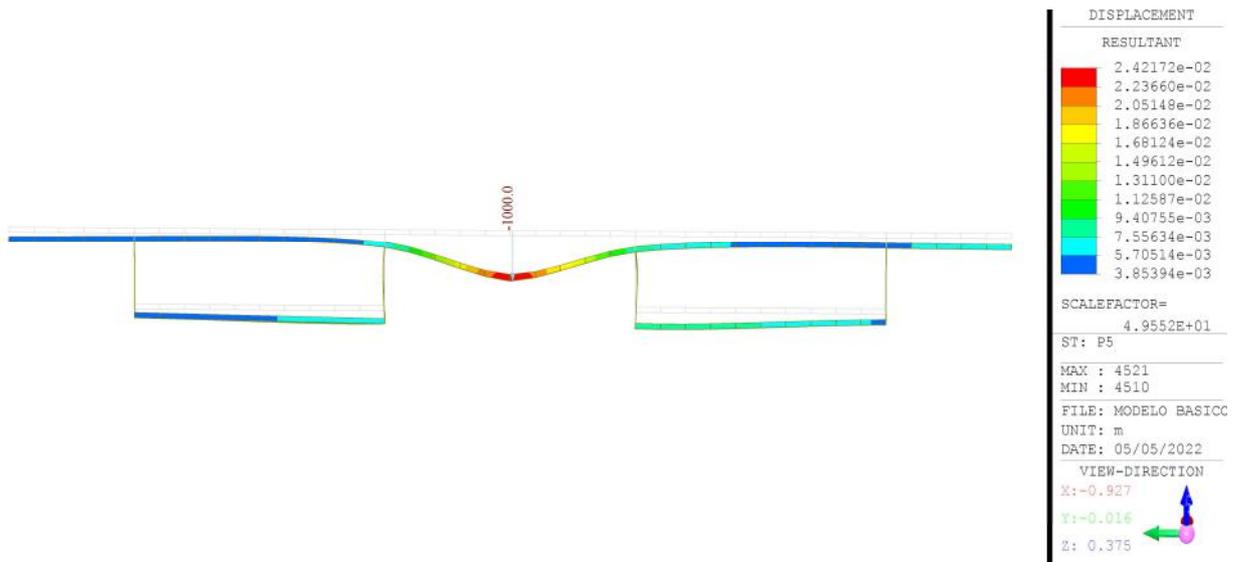


Figura 36. Desplazamientos (m) de la sección x=20 m para la carga P5

Se estudia la variación de la flecha en los nudos 2 y 8 de la sección central según la situación de la carga.

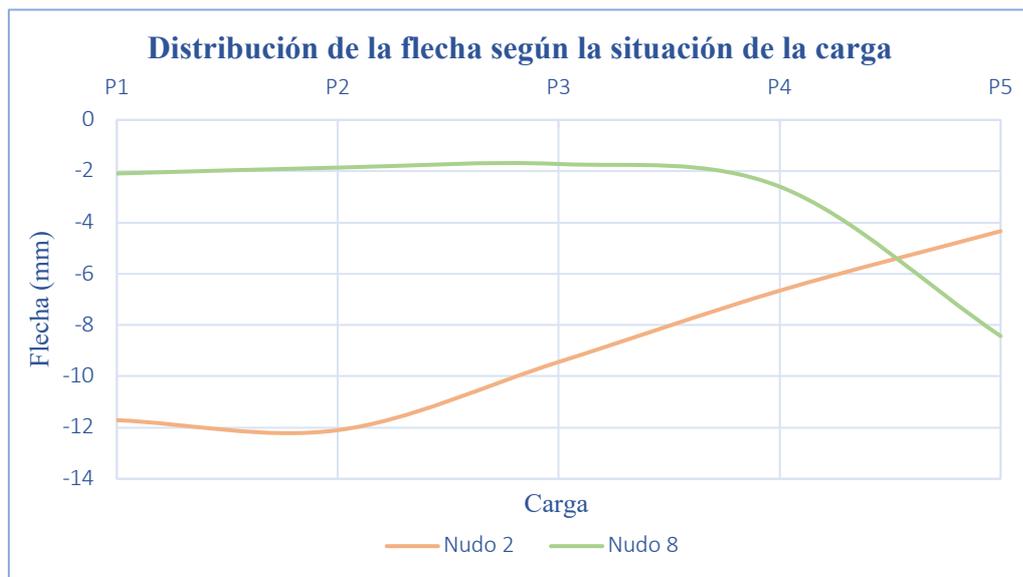


Figura 37. Distribución de la flecha según la situación de la carga

Se observa como a medida que la carga se va acercando a la zona central (nudo 7) el desplazamiento en la dirección z del nudo 2 va disminuyendo y el del nudo 8 va aumentando. Además, el nudo 2 presenta deformaciones mayores por estar situado a un extremo y recibir en menor medida la ayuda de la otra alma para soportar las cargas.



Figura 38. Distribución de la flecha máxima según la situación de la carga

Si relacionamos los desplazamientos en el eje z máximos que provocan las distintas cargas, se observa como los menores desplazamientos se presentan cuando las cargas se encuentran sobre el tablero coincidiendo con las almas de los cajones (P2 y P4), siendo ligeramente mayores cuando la carga se encuentra en una zona del ala entre dos almas (P3 y P5). Para P1 se da un valor mucho mayor ya que, al estar la carga en el extremo, el nudo 1 sufre la mayor parte de la presión.

Por último, comparamos los resultados obtenidos con los que obtiene D. Javier Manterola en su estudio para cuando la carga puntual va cambiando. Se puede apreciar la similitud entre ambos estudios para los desplazamiento del eje z.

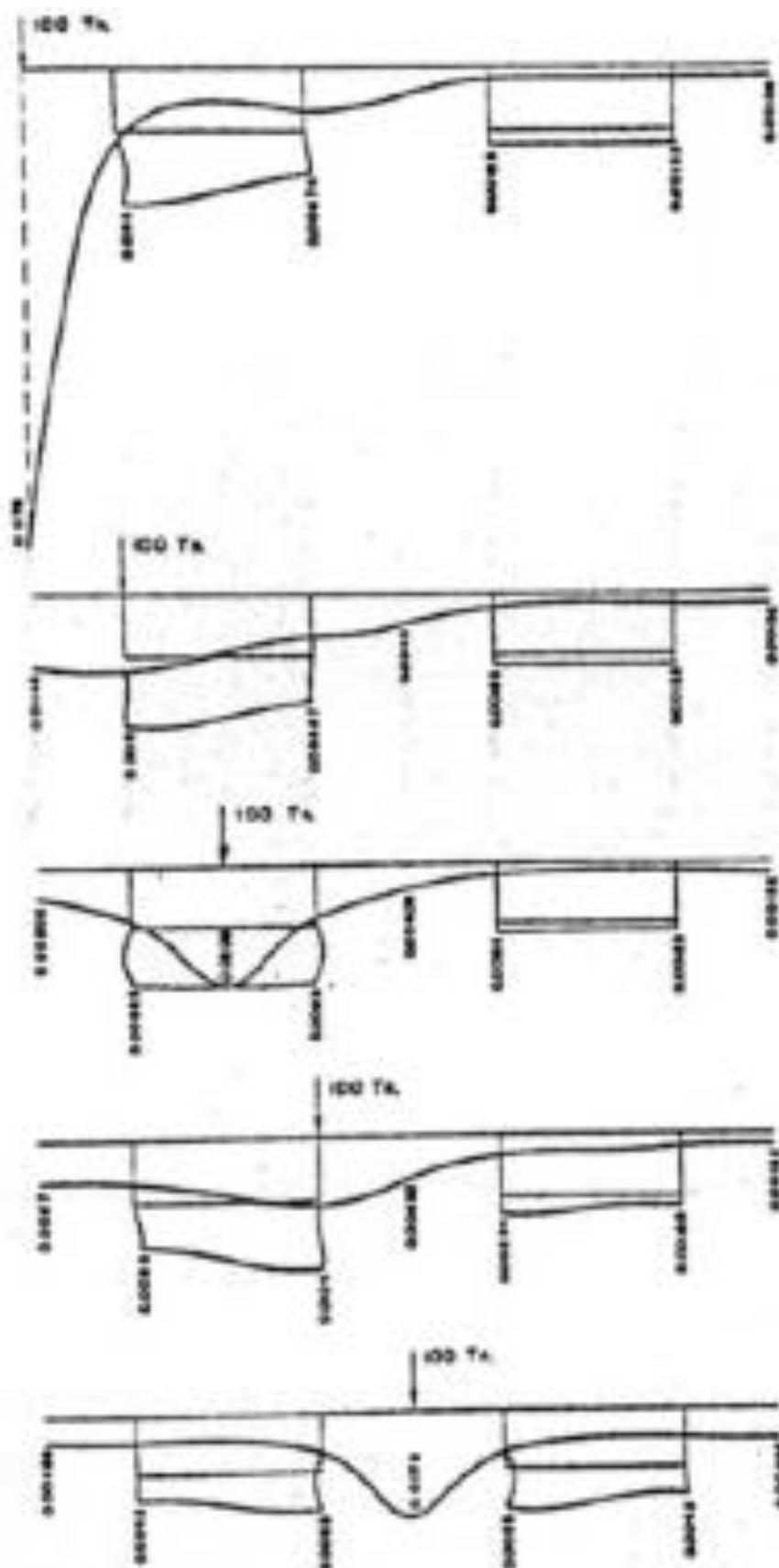


Figura 39. Flecha la sección $x=20\text{m}$ según la posición de la carga obtenida por D. Javier Manterola

4 ESTUDIO PARAMÉTRICO Y EL COMPORTAMIENTO DE UN TABLERO FORMADO POR DOS VIGAS CAJÓN

En este capítulo se estudiará la influencia que tienen los parámetros geométricos escogidos en el comportamiento resistente del puente formado por dos vigas cajón dependiendo del lugar donde se sitúe la carga.

Al igual que en el caso anterior, se analizarán los desplazamientos, la distorsión, los esfuerzos y las tensiones mientras varía tanto la situación de la carga como cada una de las características geométricas del puente.

4.1 Caso 1: Variación de la luz

4.1.1 Descripción del modelo

Como se ha expuesto en el capítulo 2 de este trabajo, se va a realizar un estudio del comportamiento del puente a medida que se va aumentando la luz de este. La luz variará desde los 40 hasta los 80 metros, realizando un modelo cada 10 metros. Por tanto, se obtienen 5 modelos para realizar el estudio.

4.1.2 Respuesta ante cargas puntuales

4.1.2.1 Desplazamientos

En primer lugar, se estudia la influencia de la luz del puente en los desplazamientos verticales. Para ello, se emplea el modelo básico y se va variando la luz.

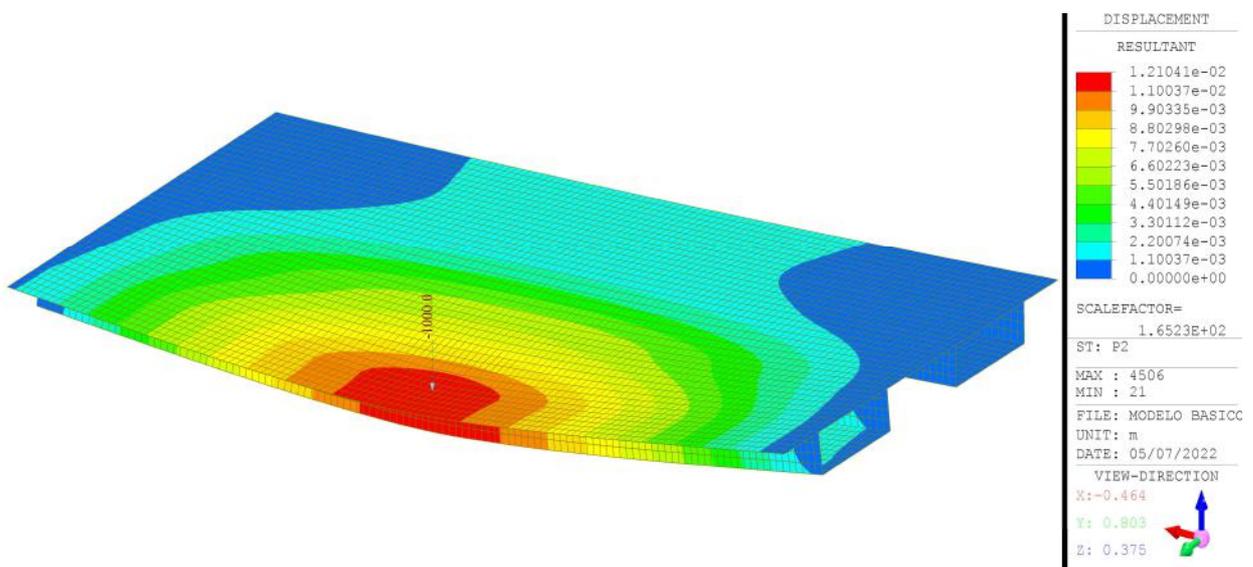


Figura 40. Desplazamientos (m) del modelo de 40 metros de luz

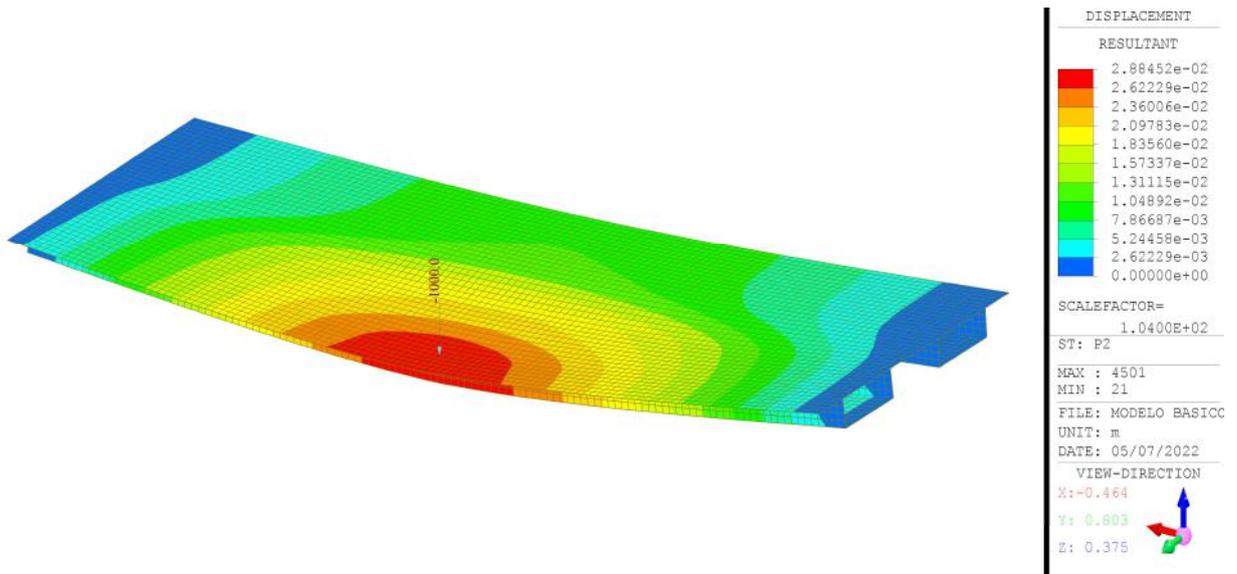


Figura 41. Desplazamientos (m) del modelo de 60 metros de luz

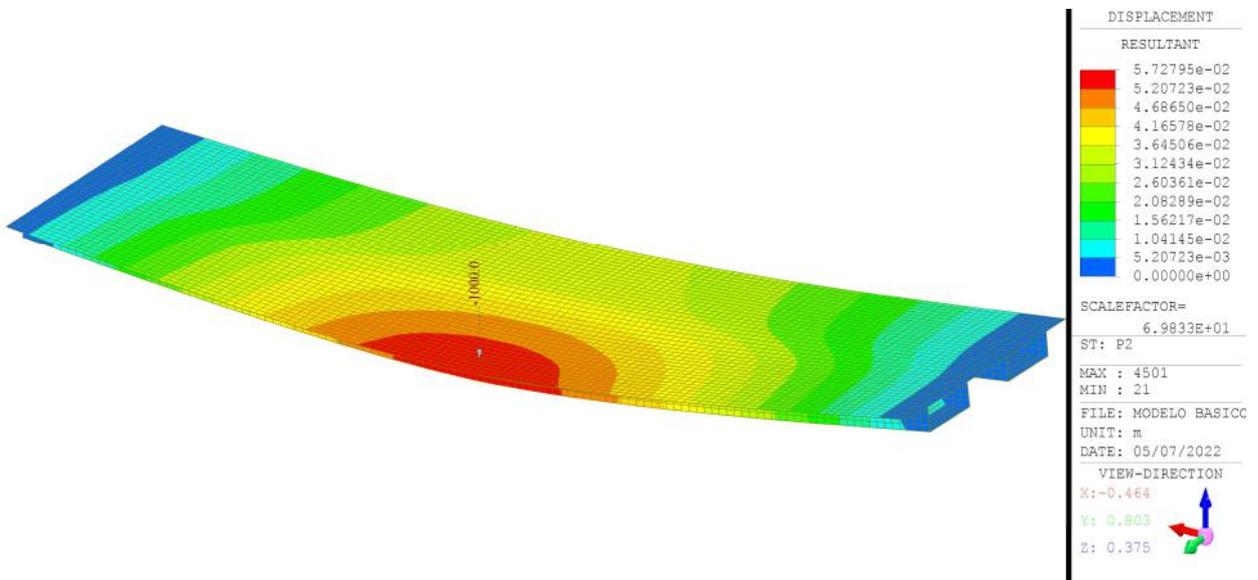


Figura 42. Desplazamientos (m) del modelo de 80 metros de luz

Cabe destacar que a medida que aumenta la luz del puente la zona de influencia de la carga es cada vez mayor y los desplazamientos van aumentando. Además, estos desplazamientos son cada vez más parecidos lo largo de la sección transversal, es decir, con una luz de 40 metros, el desplazamiento en el lado opuesto a la carga es menor del 20%, mientras que, cuando la luz es de 80 metros, esa proporción es mayor del 50%.

Para poder observar bien la relación entre la flecha y la posición de la carga, se toman como referencia los nudos 2 y 8 y se analiza la variación de flecha ante estos cambios.

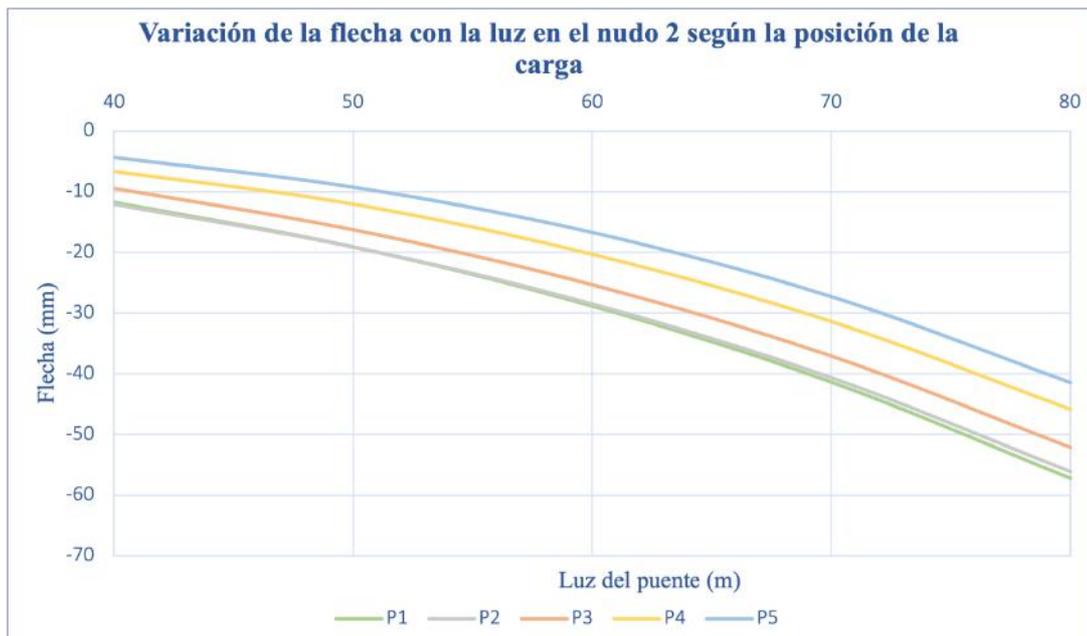


Figura 43. Desplazamientos del nudo 2 al variar la luz del puente y la posición de la carga



Figura 44. Desplazamientos del nudo 8 al variar la luz del puente y la posición de la carga

En cuanto a la influencia de la carga, en la figura 43 es lógico que cuanto más se acerca al nudo 2 mayores son los desplazamientos verticales en ese punto. De modo que cuando la carga está situada en el nudo 7 (P5) los desplazamientos son los mínimos. Igualmente ocurre en la figura 44, pero esta vez la flecha mínima se da cuando la carga se encuentra en el nudo 1 (P1).

Además, se observa que la flecha es mayor en el nudo 2, que pertenece al cajón cargado (cajón izquierdo), que en el nudo 8 (cajón derecho) para todos los casos de carga.

Si se relaciona la variación de la flecha máxima con la luz según la posición de la carga:



Figura 45. Desplazamientos máximos al variar la luz del puente y la posición de la carga.

Por tanto, se comprueba que la flecha aumenta con la luz del puente y que es mínima cuando la carga está situada en el tablero coincidiendo con las almas de los cajones (P2 y P4).

4.1.2.2 Distorsión

Para estudiar la distorsión se observa la sección central, que al ser la más deformada, es la más representativa.

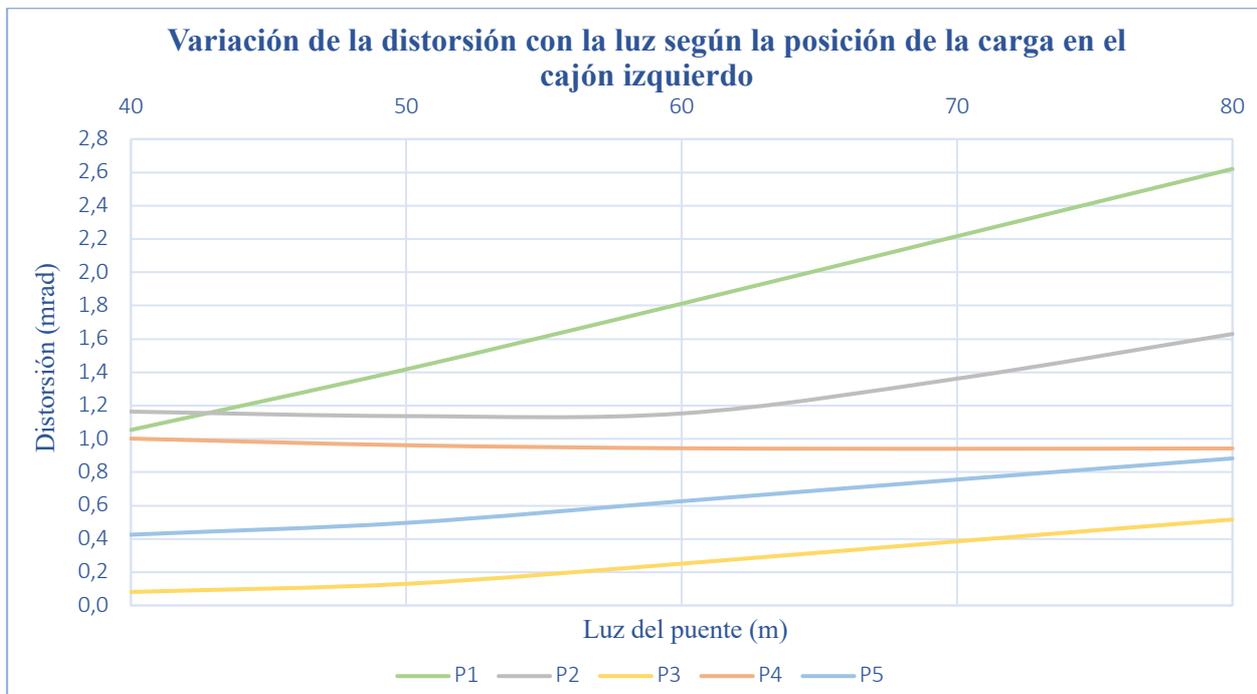


Figura 46. Variación de la distorsión con la luz según la posición de la carga en el cajón izquierdo

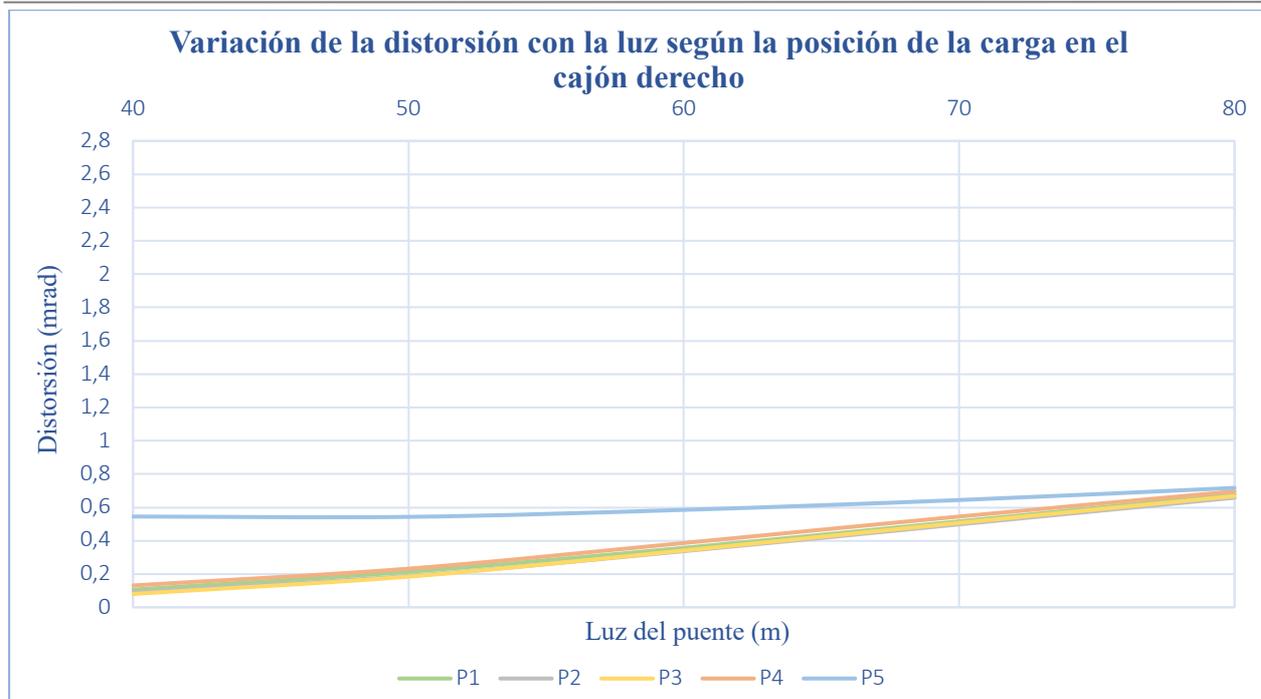


Figura 47. Variación de la distorsión con la luz según la posición de la carga en el cajón derecho

En primer lugar, cabe destacar que la distorsión depende de dos efectos: la rigidez a torsión y la flexibilidad de las barras de los cajones. Por tanto, para cada caso de carga, se hace un balance entre estas dos variables.

De la primera gráfica (figura 46) se observa como la distorsión aumenta con la luz del puente. Esto se da para todos los casos de carga, pues al aumentar la luz, disminuye la rigidez a torsión, y esto provoca un aumento en la distorsión.

El modelo más sensible frente a estos cambios es el de la carga situada en el extremo (P1), ya que presenta mayor torsión. Es por ello por lo que, aumenta de manera más brusca.

De la segunda gráfica (figura 47) se concluye que igualmente la distorsión aumenta con la luz, pero que estos valores son más pequeños que los del cajón izquierdo por el hecho de no estar cargados.

Además, se puede apreciar como la carga situada en el centro de la sección (P5) no provoca la misma distorsión en ambos cajones. Esto no tiene lógica ya que, una estructura simétrica sometida a una carga simétrica provocaría unas deformaciones simétricas. Después de repasar en varias ocasiones el modelo de MIDAS no se han encontrado fallos y aparentemente la estructura parece simétrica.

4.1.2.3 Esfuerzos

Para el estudio de los esfuerzos, se van a representar en distintas gráficas la evolución de cada uno de ellos según se vayan modificando sus características geométricas o su posición de la carga. De esta forma, se observa gráficamente la influencia que tiene cada uno de estos parámetros en la distribución de los esfuerzos.

Para este primer caso, en el que se va modificando la luz del puente, se estudian los esfuerzos para cuatro de los casos estudiados (45 m, 50 m, 60 m y 80 m de luz) y se obtienen las siguientes gráficas para cada una de las posiciones de la carga.

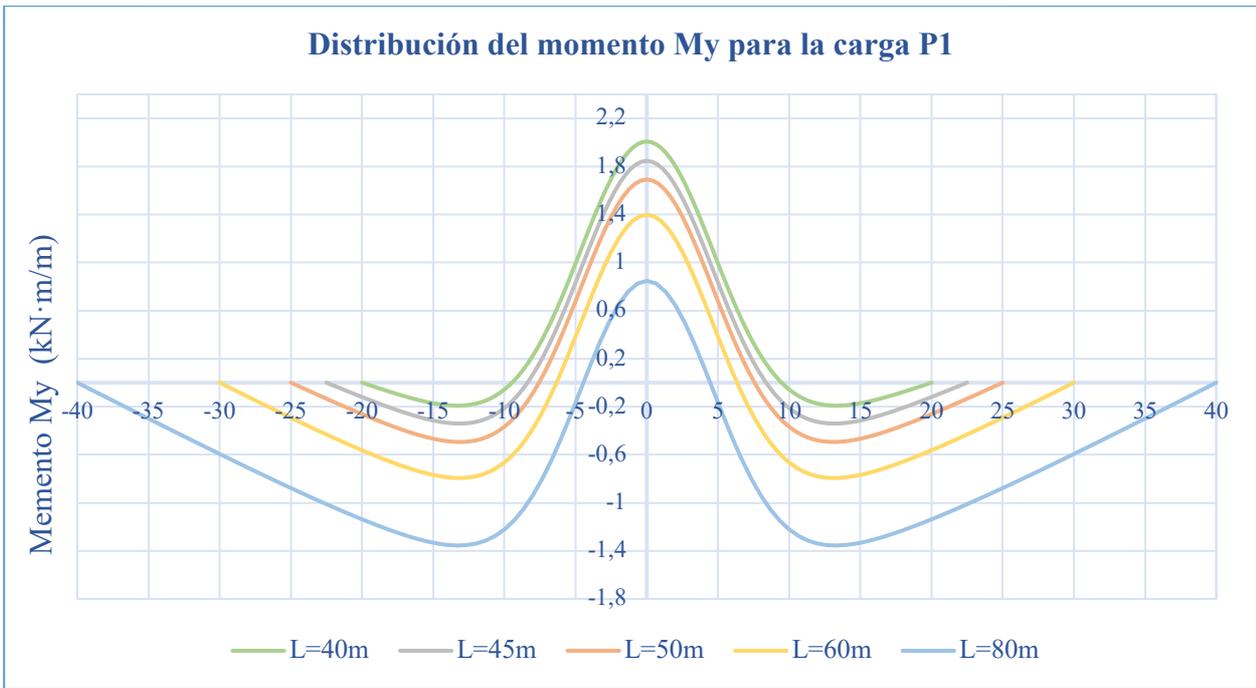


Figura 48. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P1

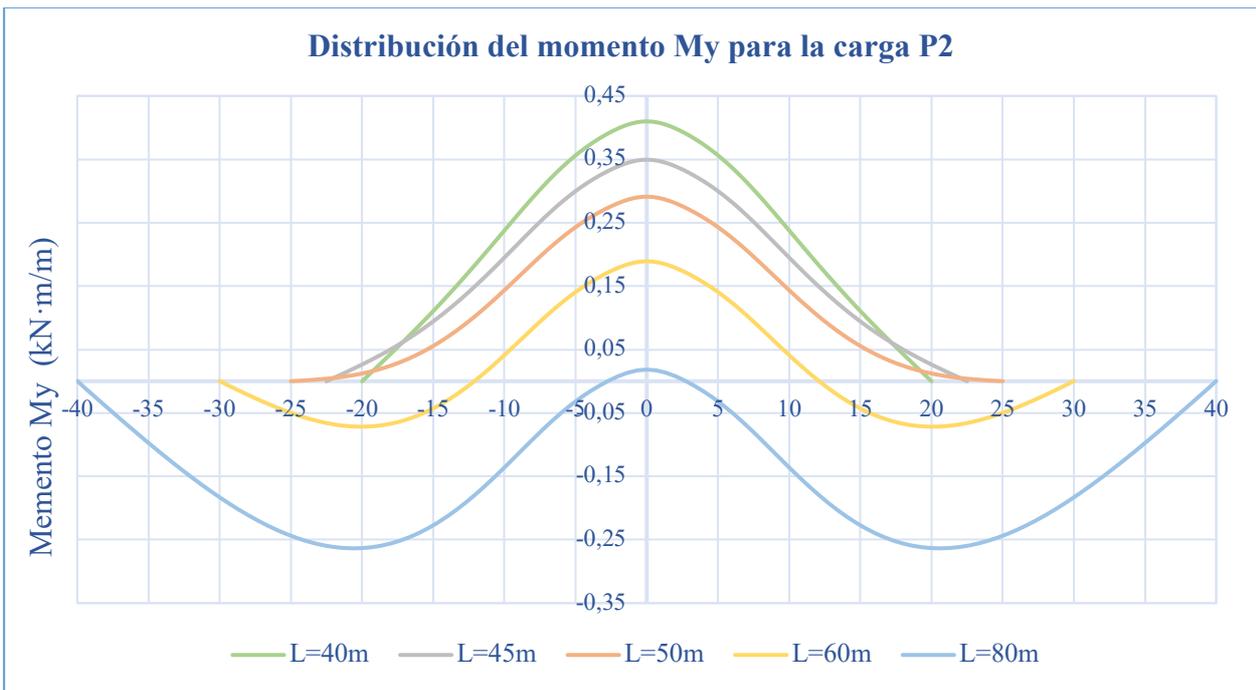


Figura 49. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P2

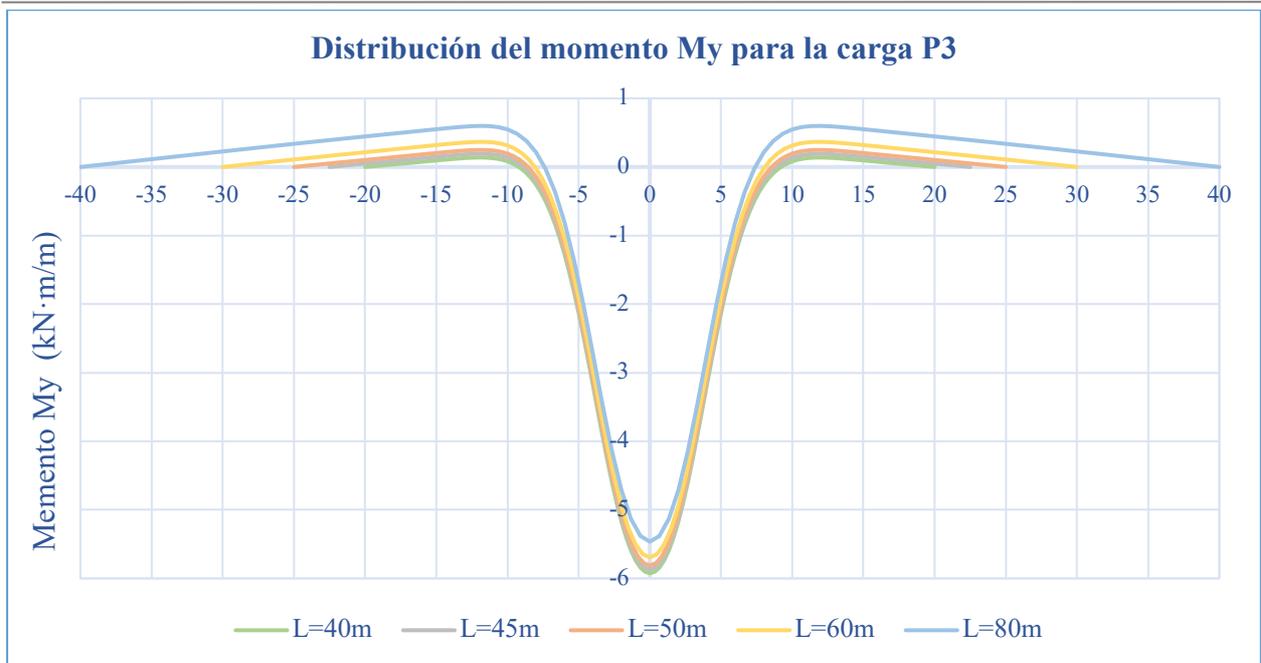


Figura 50. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P3

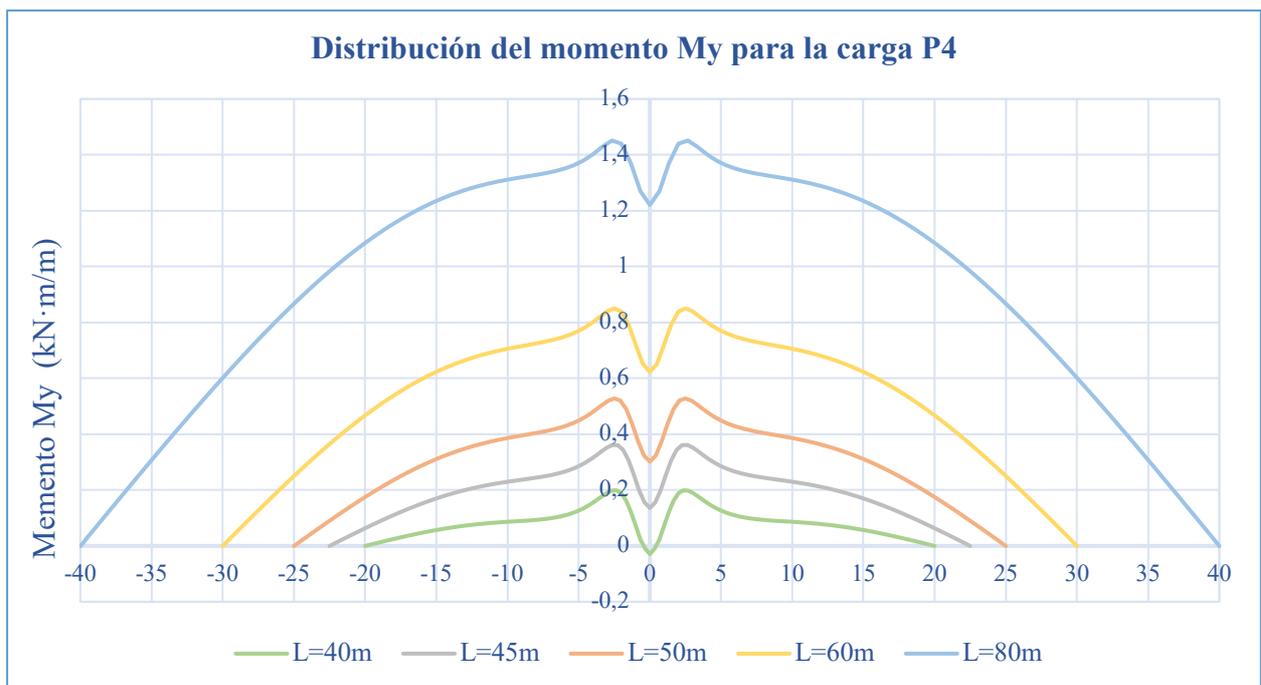


Figura 51. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P4

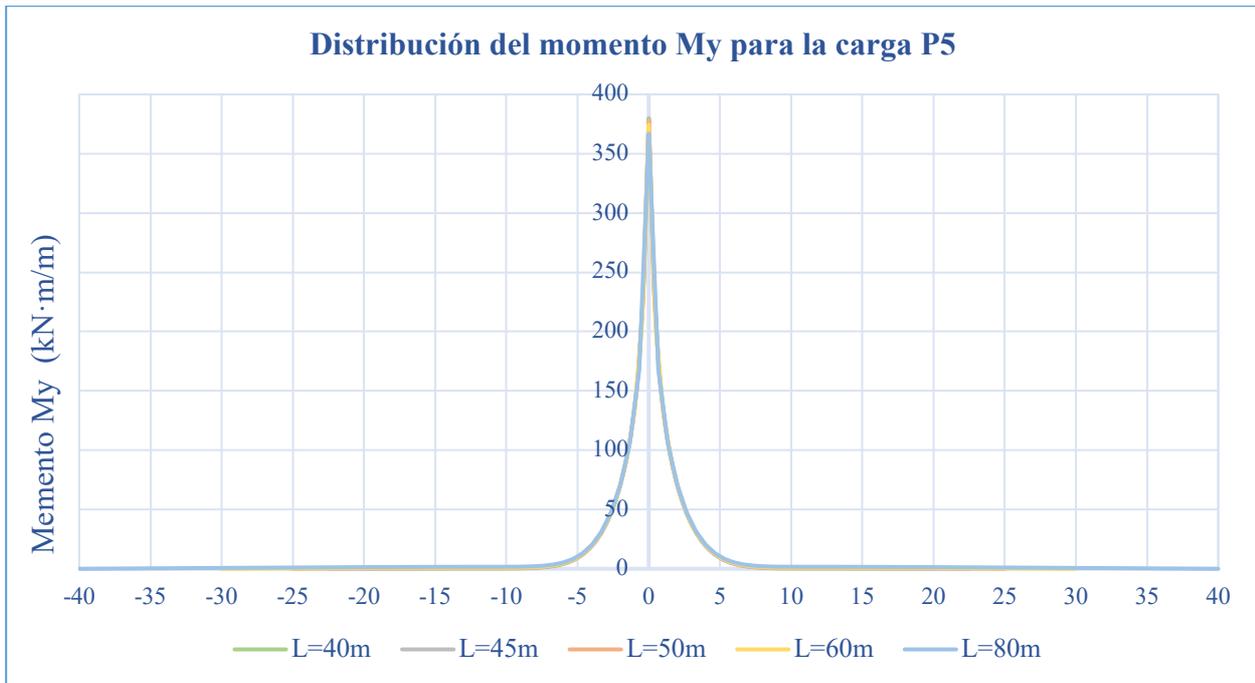


Figura 52. Distribución del momento M_y al variar la luz del puente para la carga P5

En primer lugar, establecemos el criterio de signo: cuando los momentos son positivos, la capa de arriba de la losa está en compresión y la capa de abajo en tracción.

Para los dos primeros casos de carga, la geometría es muy similar, teniendo los momentos positivos en el centro. Además, se aprecia como a medida que aumenta la luz del puente estos momentos positivos van disminuyendo mientras que los negativos van aumentando.

En el caso de carga P4, al estar la carga aplicada sobre un punto más cercano a la sección de estudio, la influencia es mayor y por ello, el momento es siempre positivo.

Sin embargo, para el caso de carga P3, se produce el efecto contrario. Los cajones son los elementos que rigidizan la estructura y, por ello, las almas son una especie de apoyos de cara a la losa superior. Es por esto por lo que, cuando se aplica la carga en el centro del cajón izquierdo (P3), la zona central de la sección transversal se levanta, de modo que el momento en esa zona es negativo.

En el último caso de carga, P5, se aprecia el efecto local de la carga, ya que esta se ha aplicado sobre la misma sección de estudio, por tanto, los momentos flectores son mayores que los del resto de cargas y su cuantía es prácticamente independiente de la luz del puente.

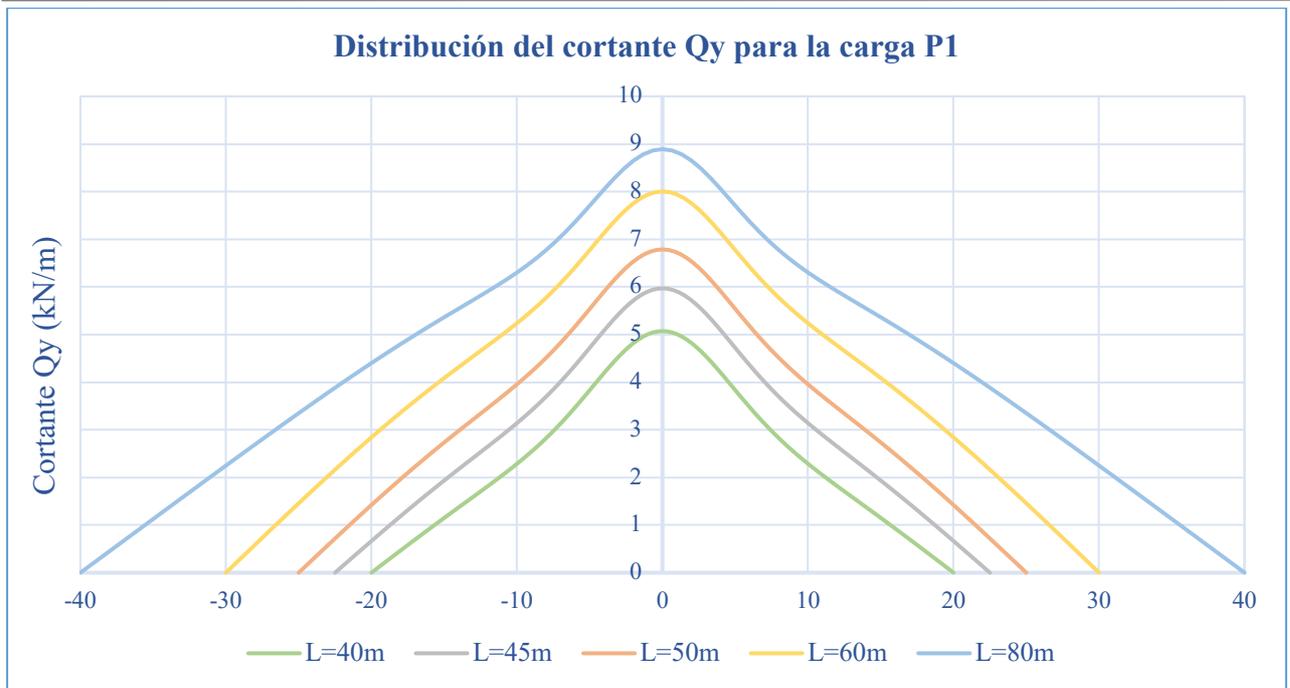


Figura 53. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P1

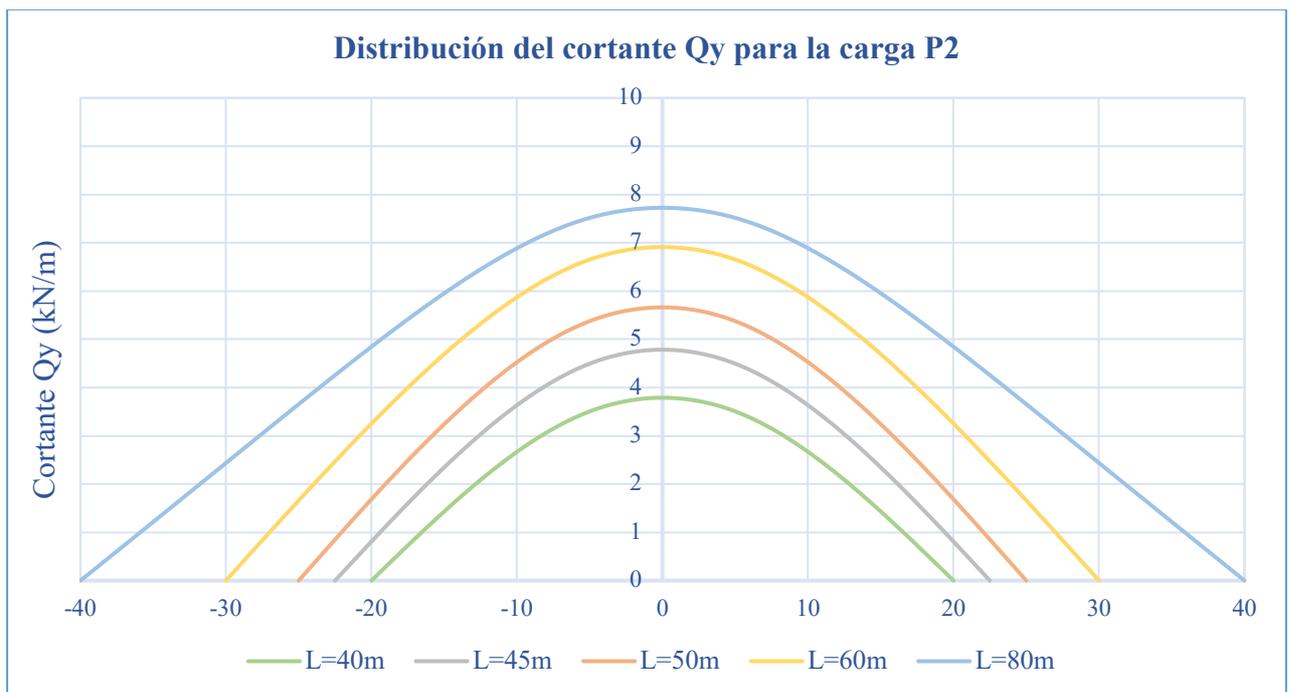
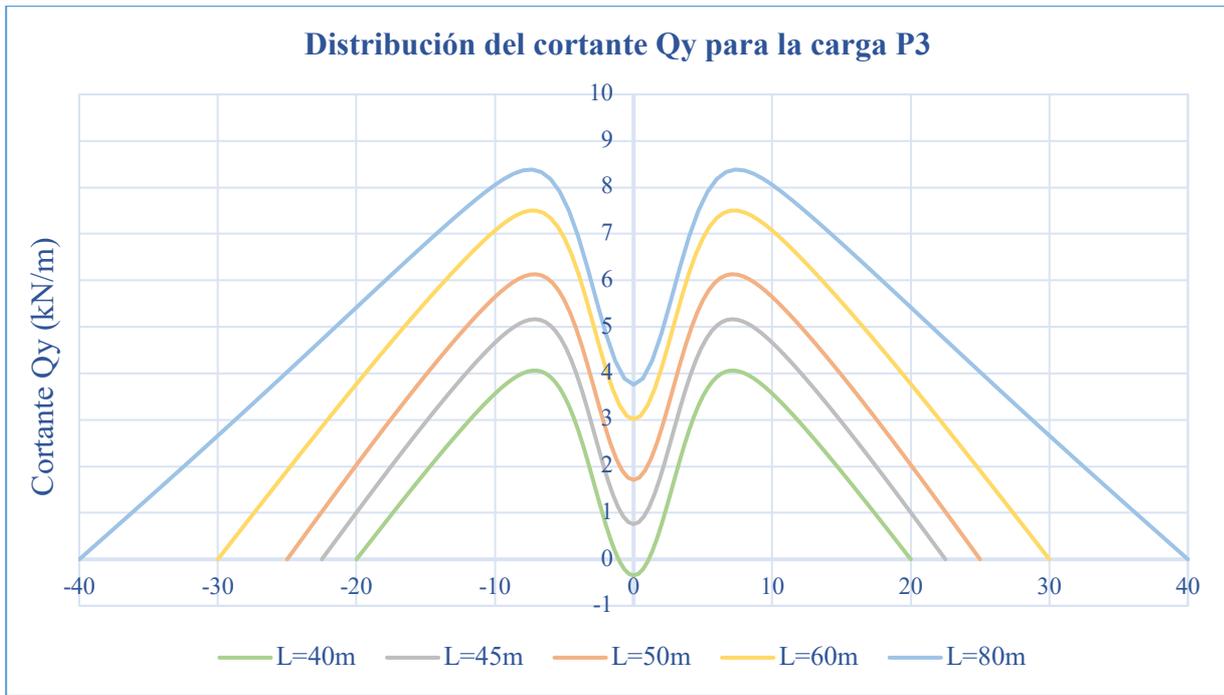
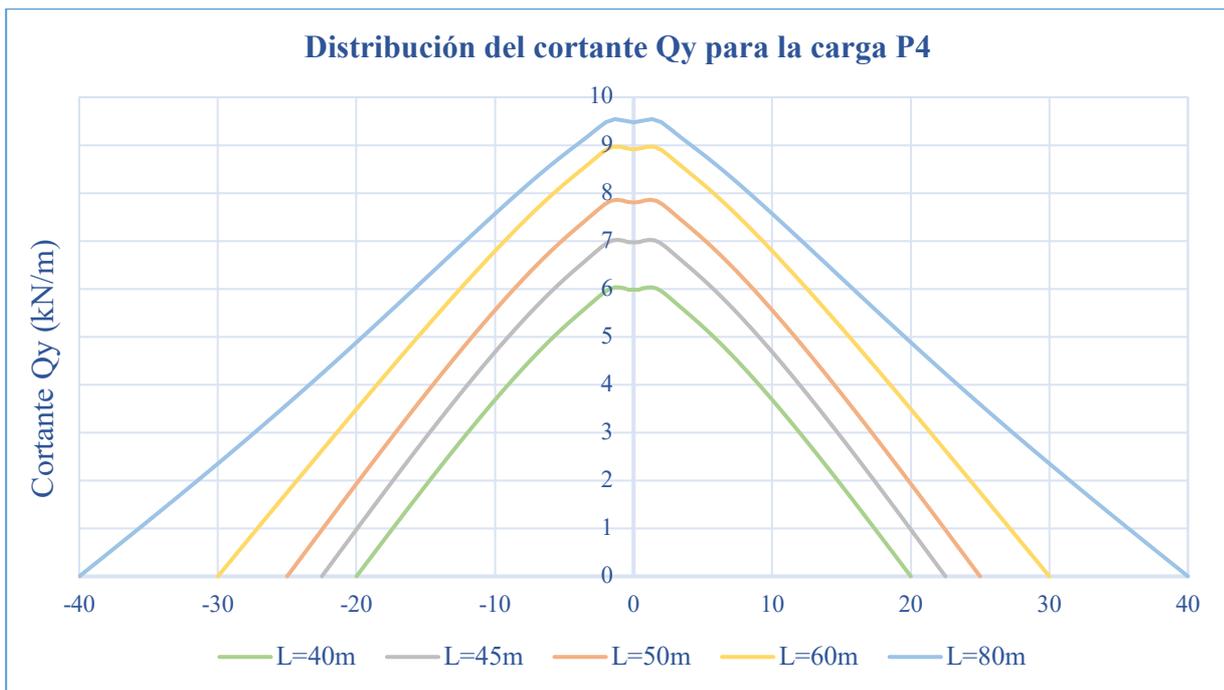


Figura 54. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P2

Figura 55. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P3Figura 56. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P4

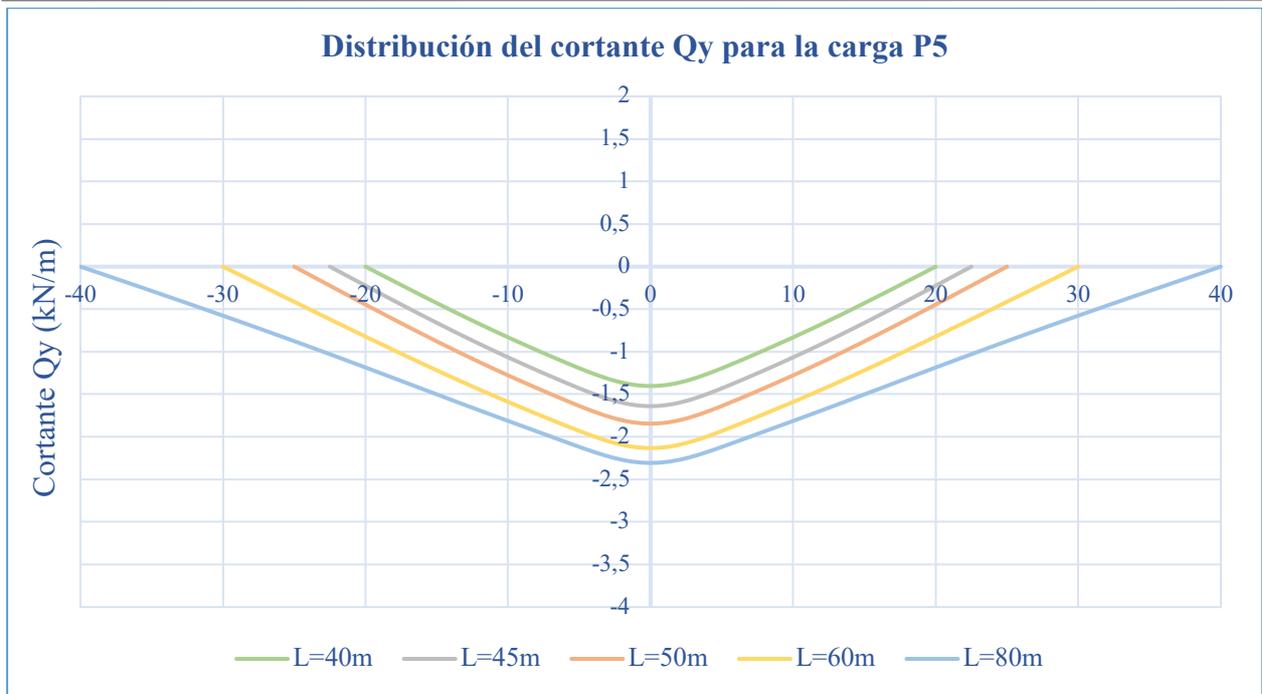


Figura 57. Distribución del cortante Q_y al variar la luz del puente para la carga P5

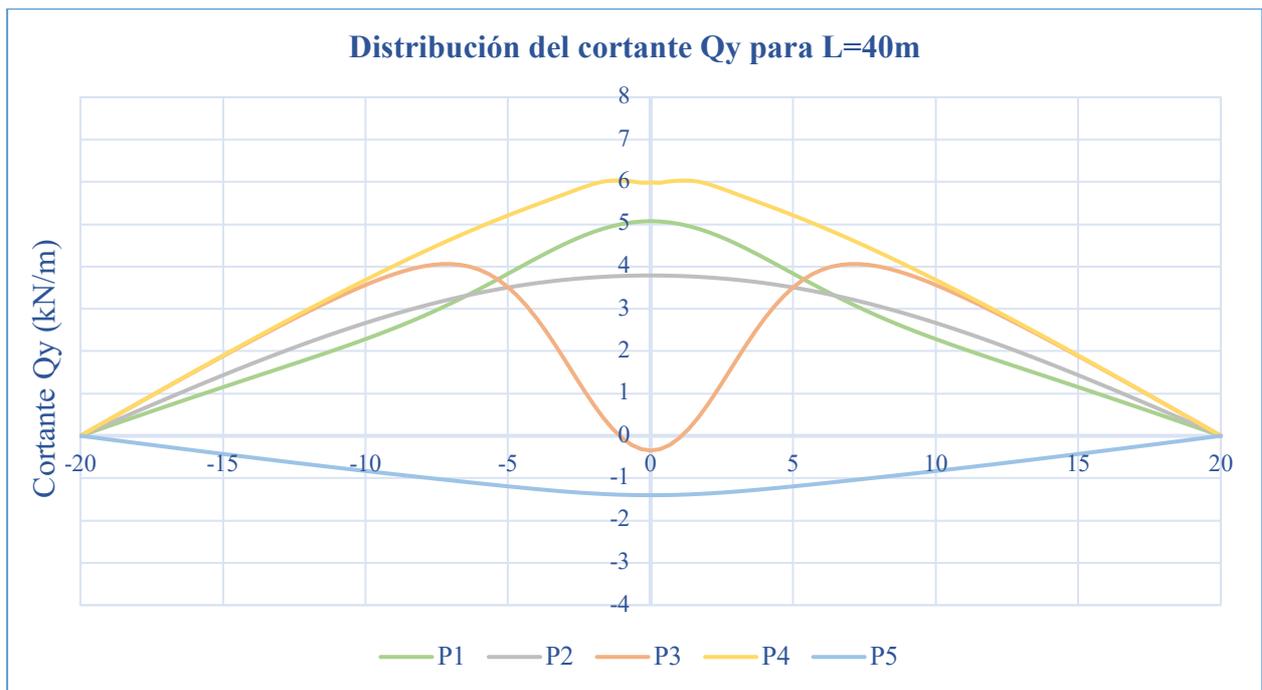


Figura 58. Distribución del cortante Q_y al variar la posición de la carga

En estas gráficas se observa que, por lo general, el cortante Q_y es máximo en el centro de la sección longitudinal. Sin embargo, en los casos de carga P3 y P5 se aprecia el efecto local de la carga que provoca cortantes negativos.

Además, con respecto a la variación de la luz del puente, cabe destacar que a medida que esta aumenta, los esfuerzos también van aumentando. Este aumento del cortante transversal con la luz del puente explica, en parte, que cuando aumenta la luz, los desplazamientos sean más parecidos en los dos laterales del puente.

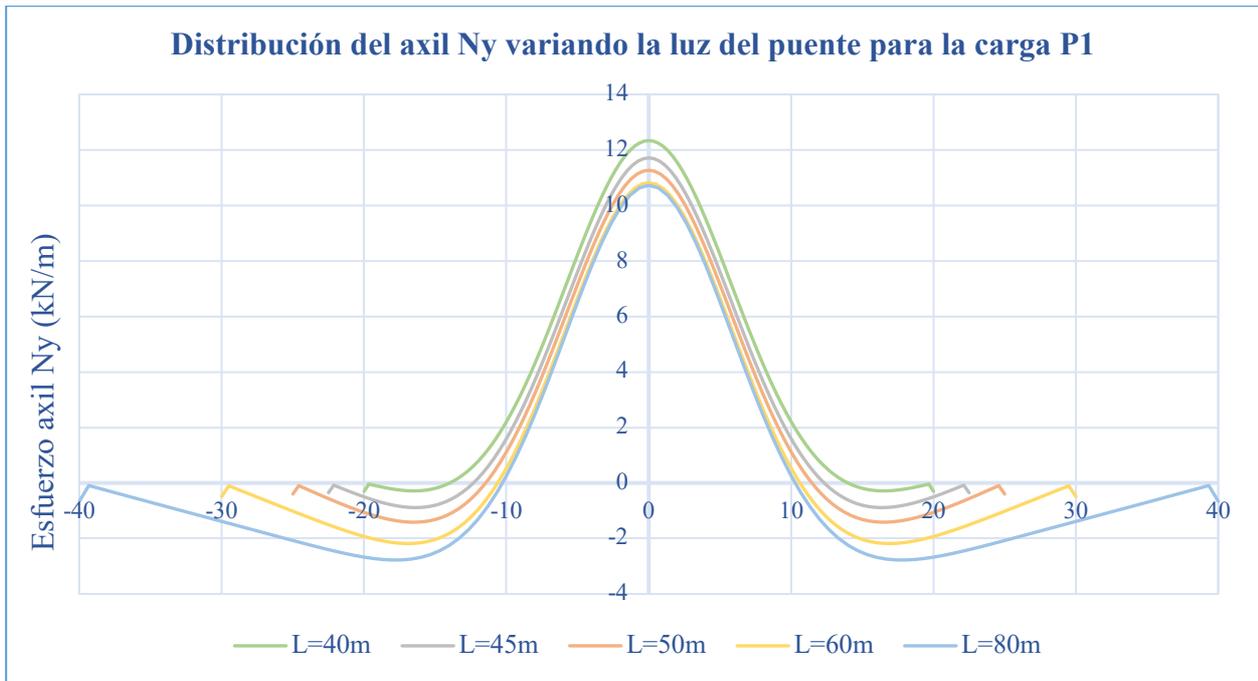


Figura 59. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P1

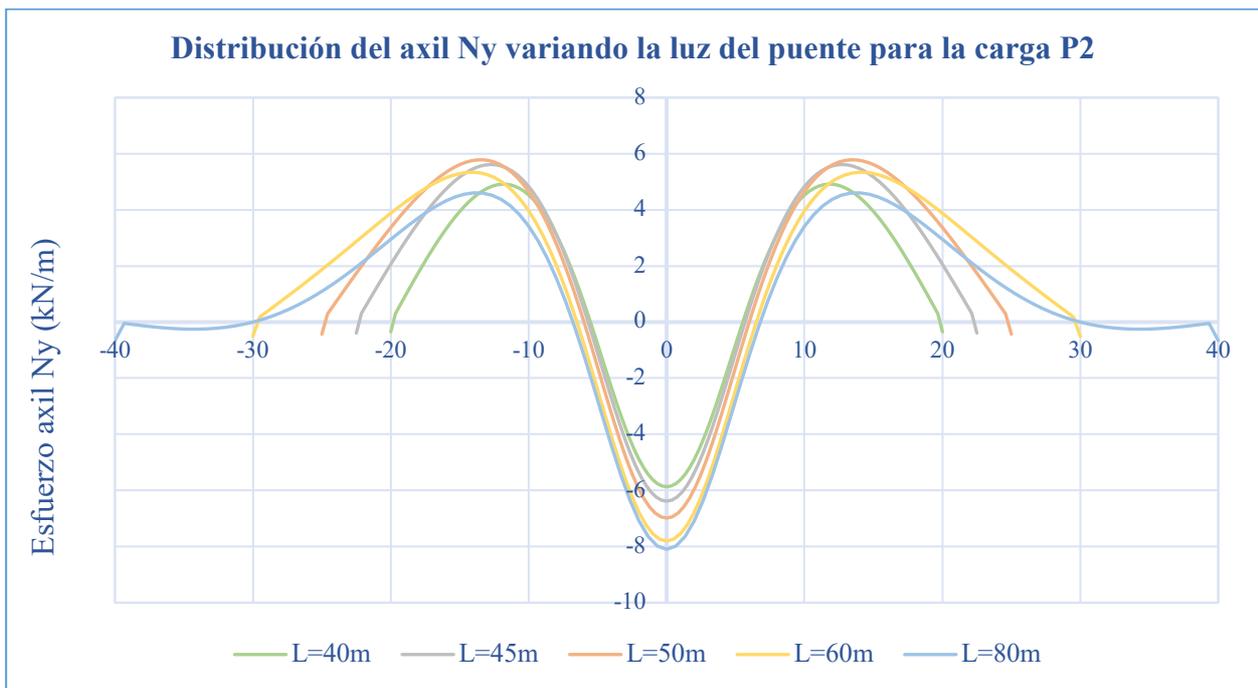


Figura 60. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P2

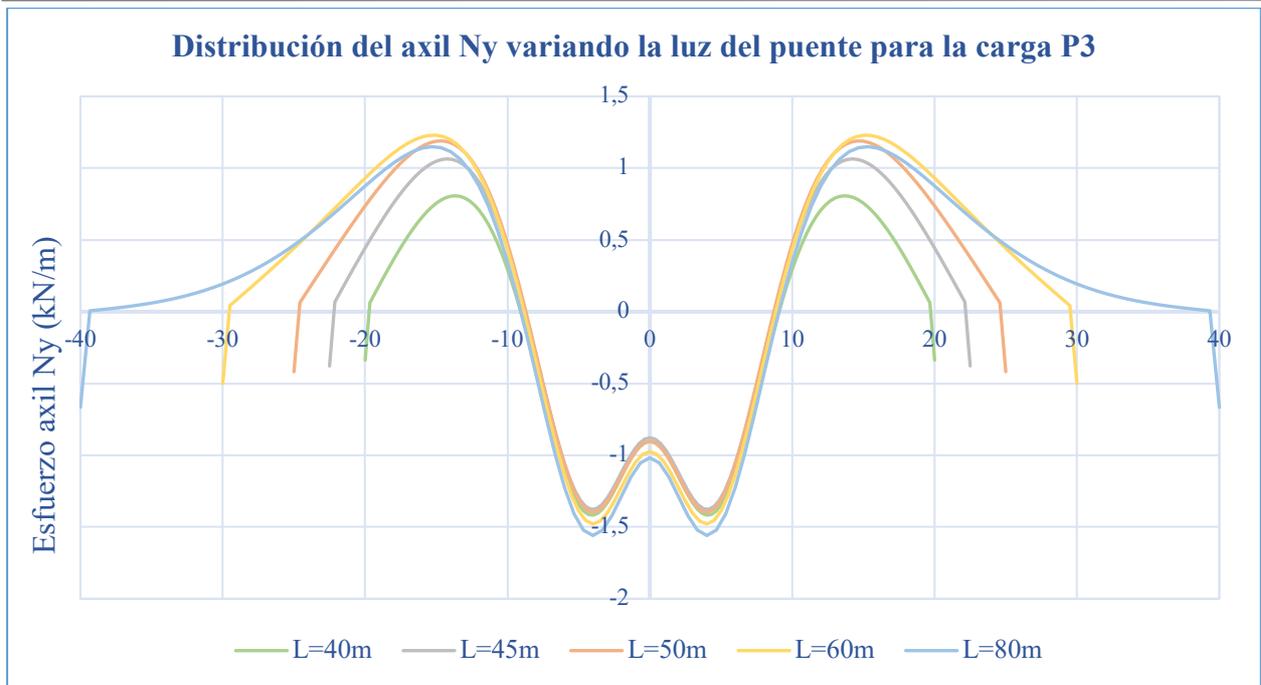


Figura 61. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P3

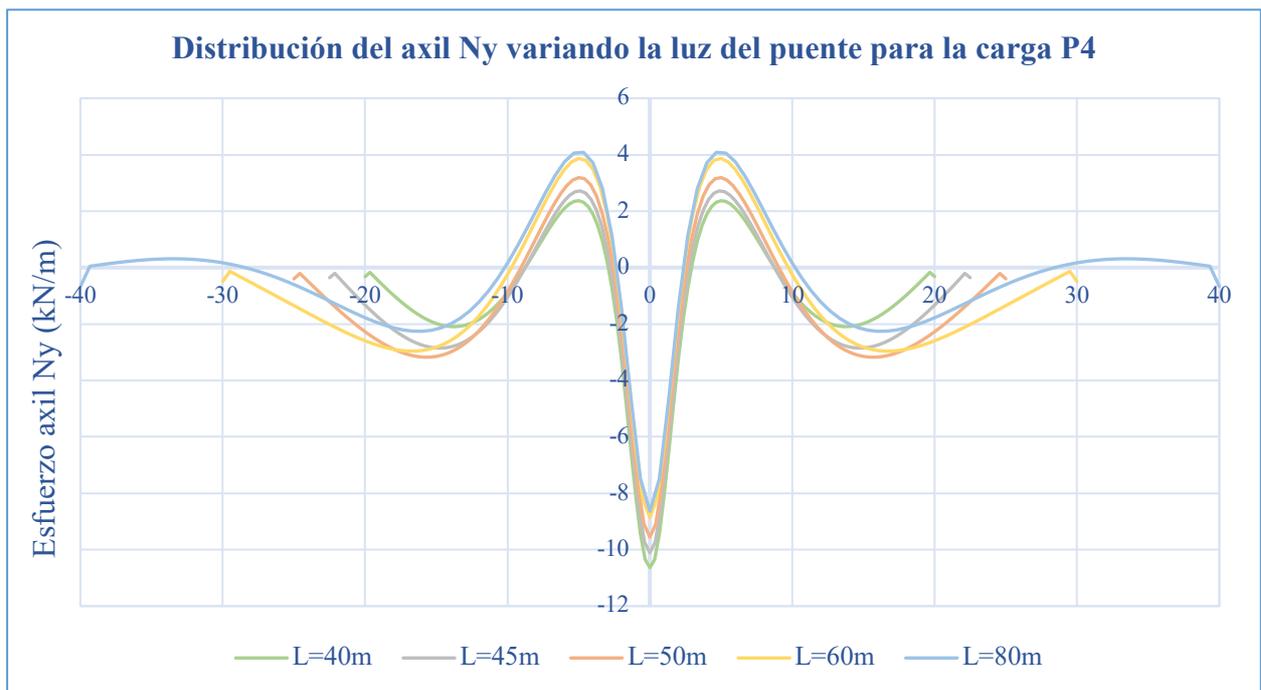


Figura 62. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P4

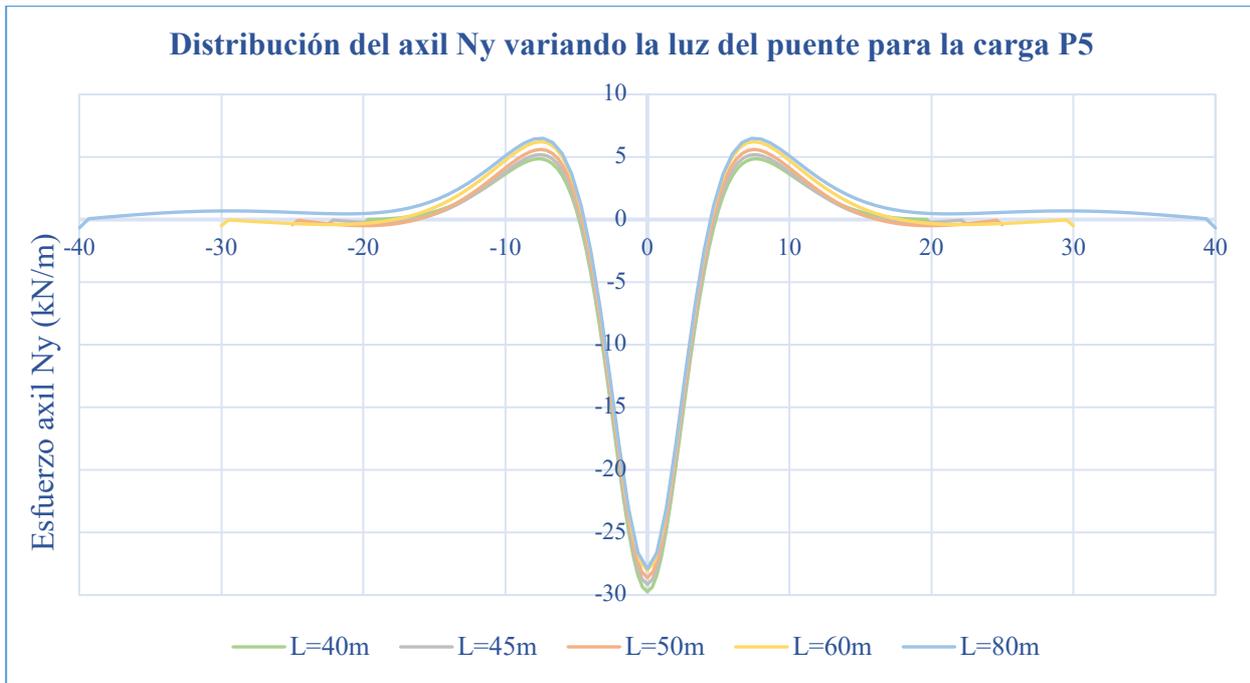


Figura 63. Distribución del axil N_y al variar la luz del puente para la carga P5

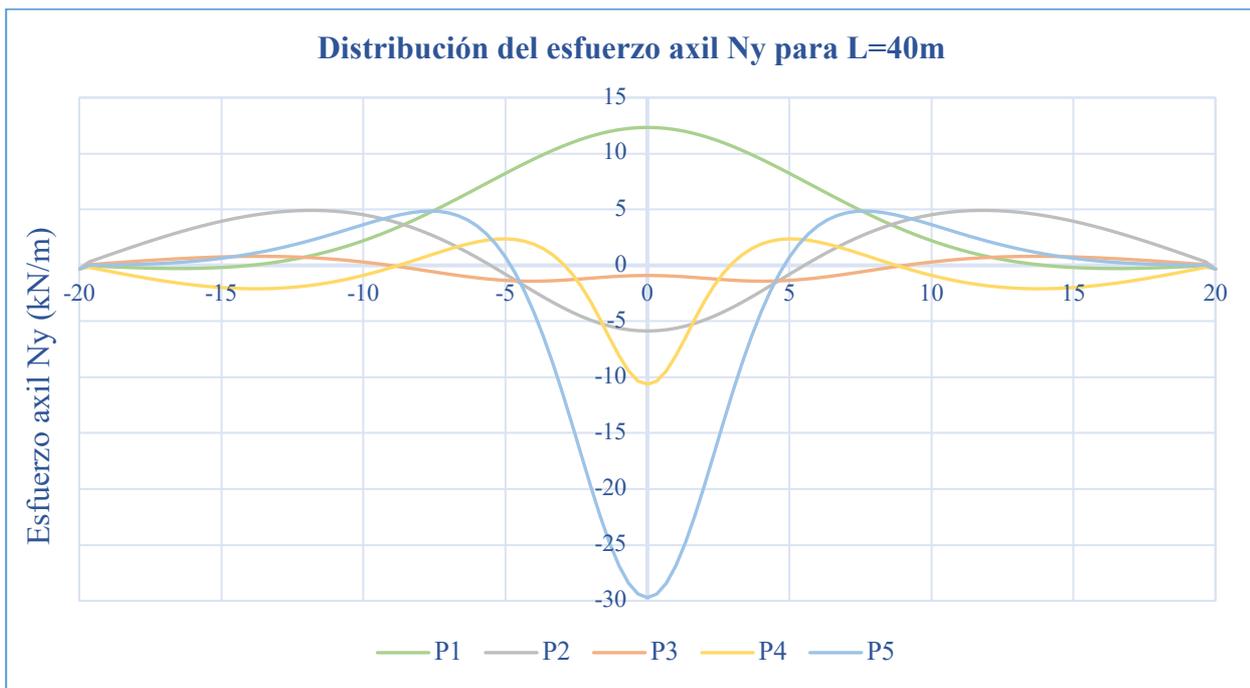


Figura 64. Distribución del axil N_y al variar la posición de la carga

En primer lugar, se aprecia que para todos los casos de carga, la influencia de la luz en el esfuerzo axil es pequeña, pues las curvas de cada una de las gráficas son muy parecidas.

Según cambia la posición de la carga, cambia el signo del esfuerzo axil en el centro de la sección. Mientras que para la carga P1 el centro está traccionado (esfuerzos positivos), para el resto de los casos de carga en ese mismo punto el tablero está comprimido (esfuerzos negativos), a excepción del caso P3, que es prácticamente nulo debido a la compensación de ambos esfuerzos.

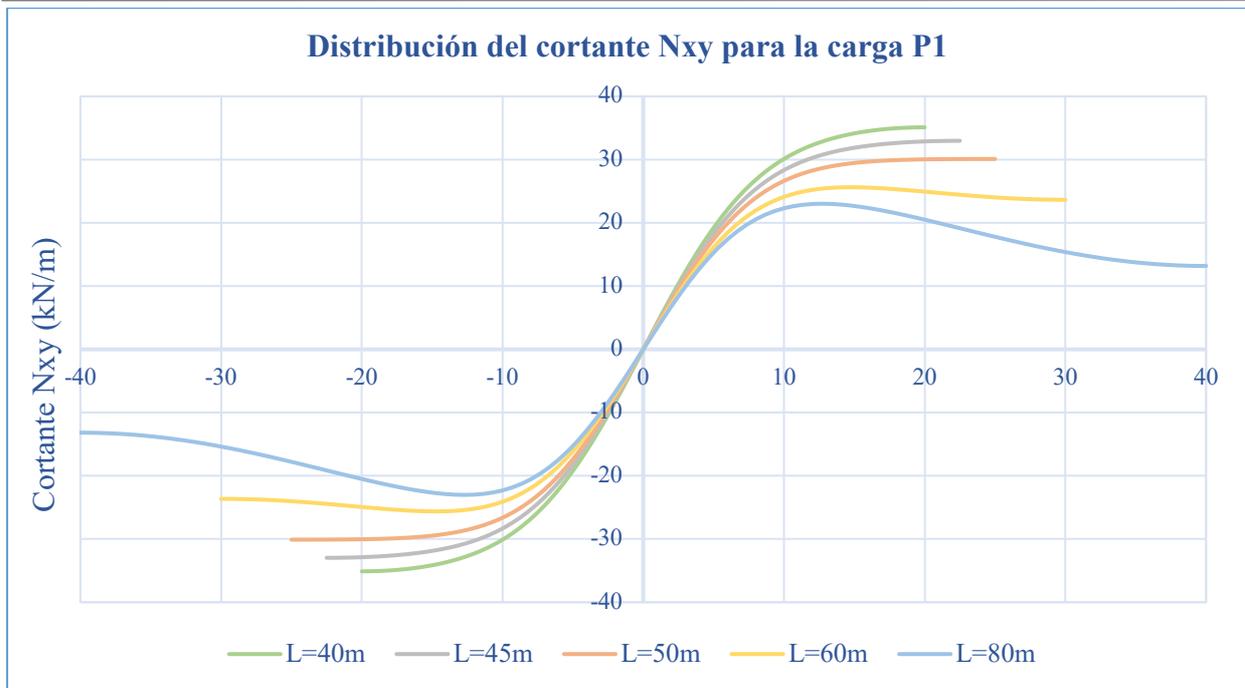


Figura 65. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P1

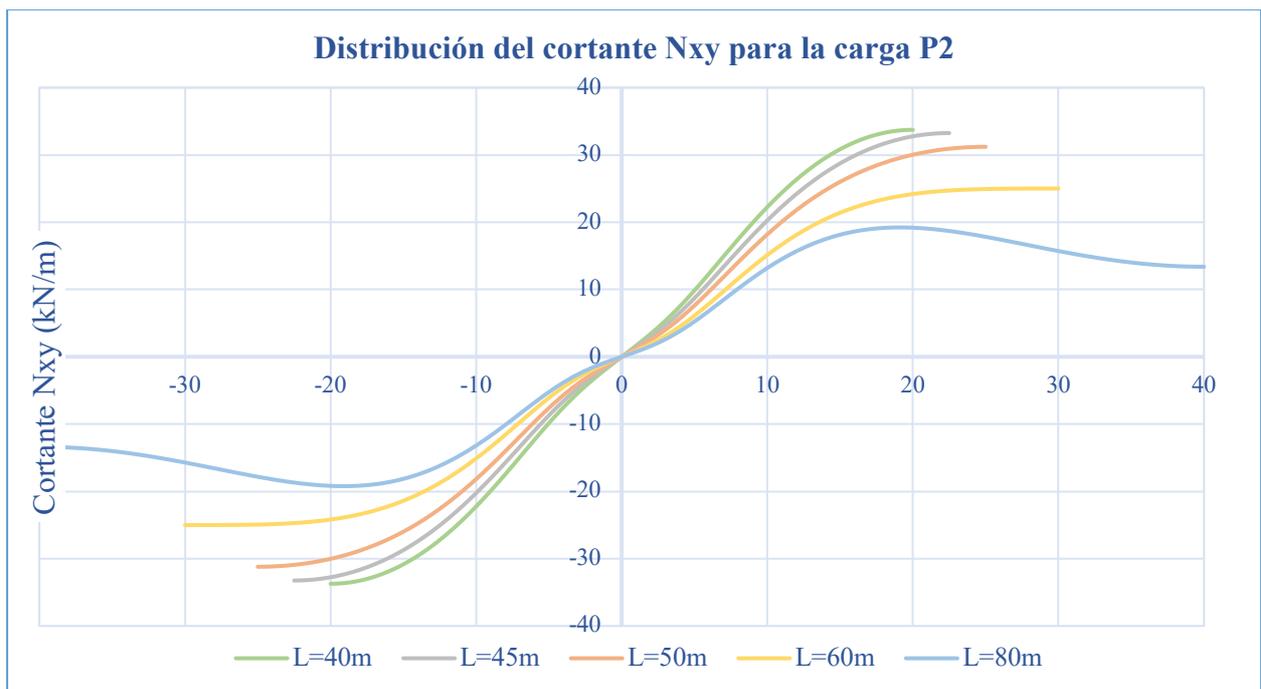


Figura 66. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P2

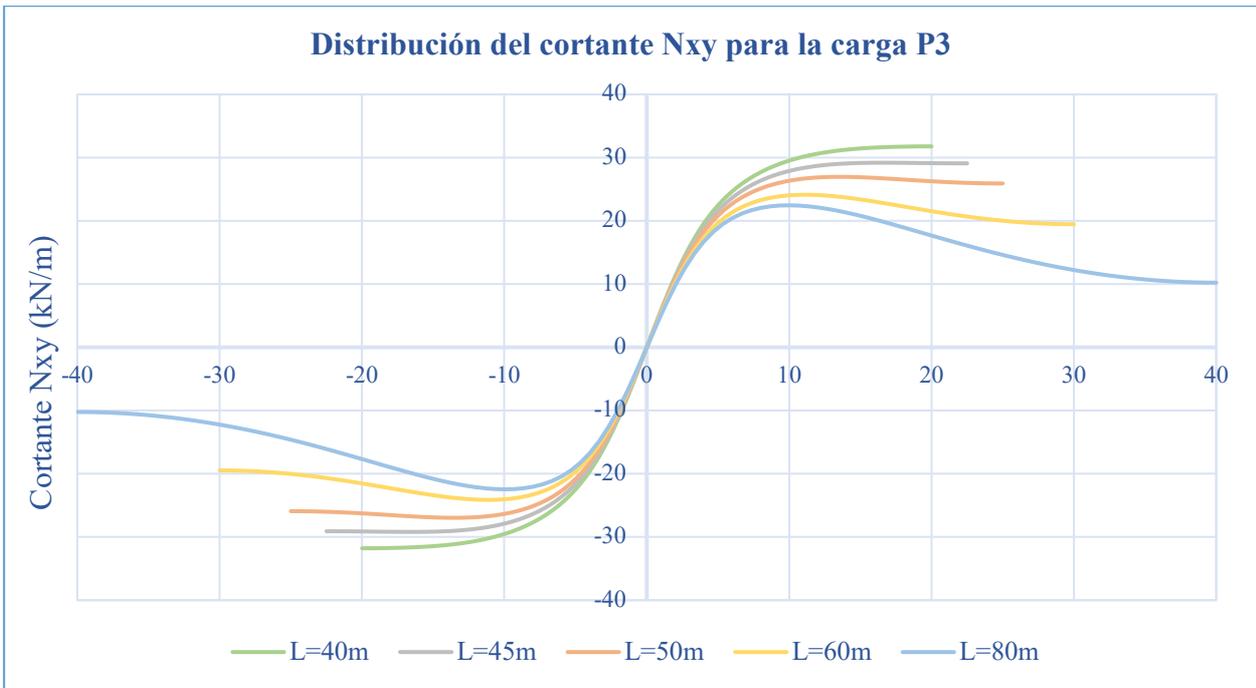


Figura 67. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P3

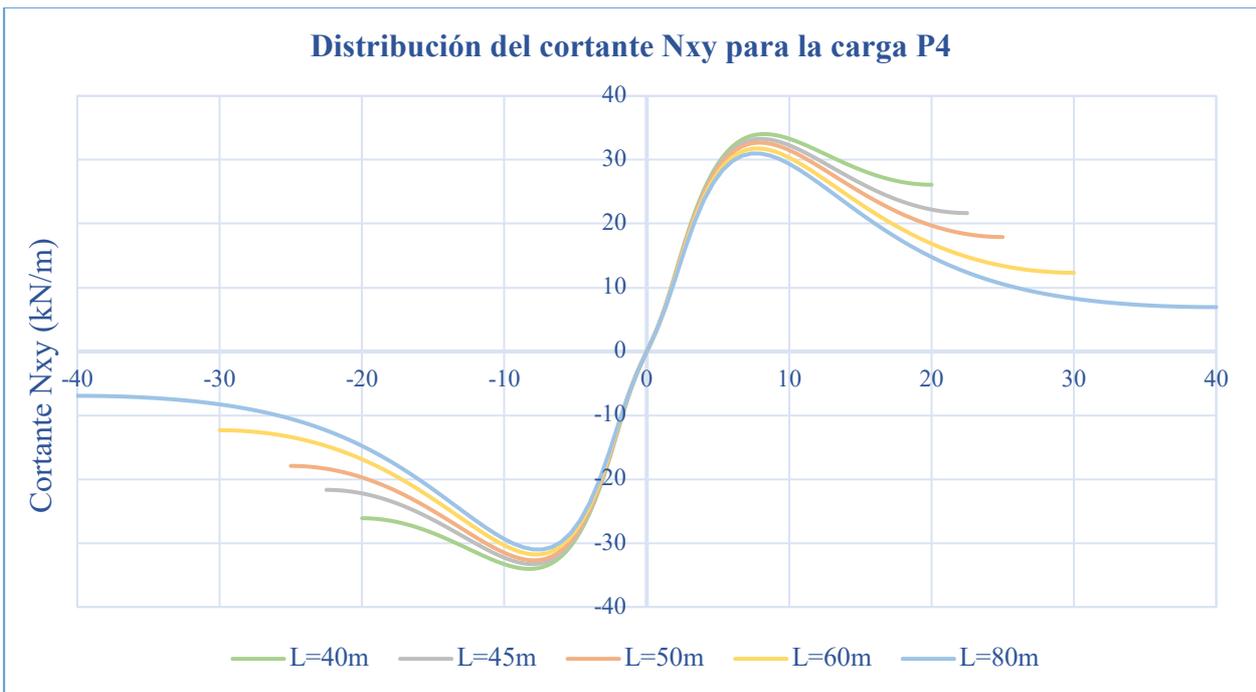


Figura 68. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P4

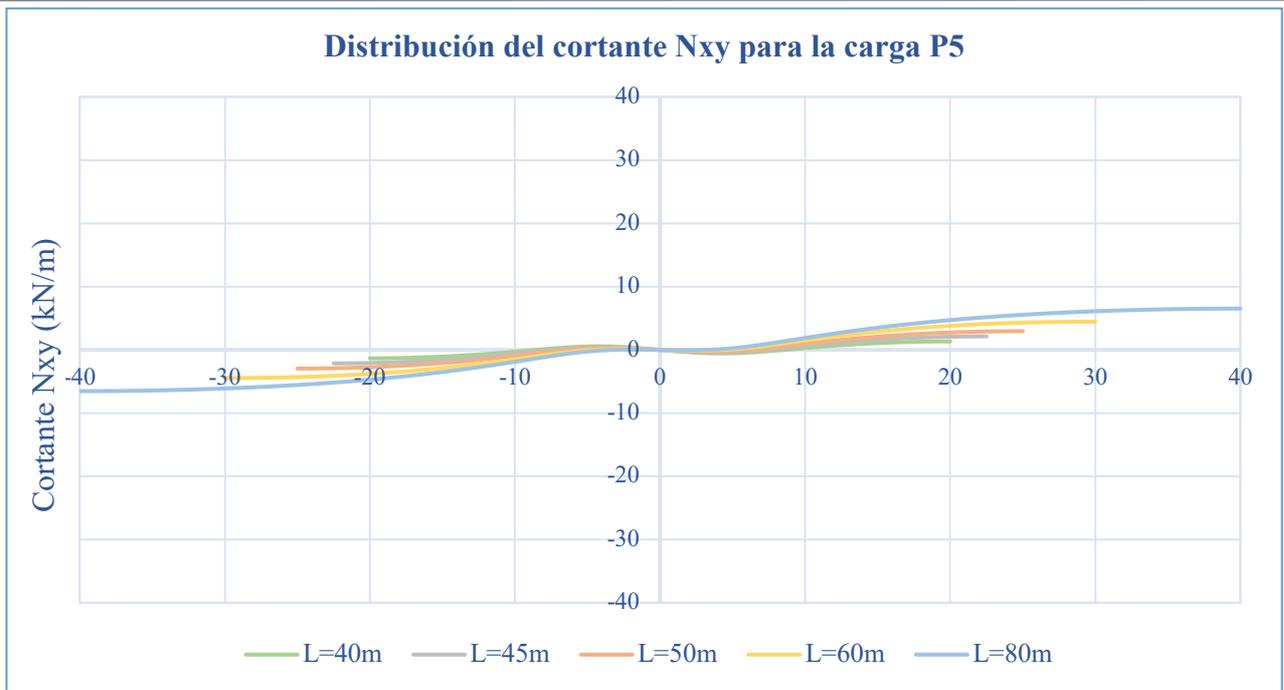


Figura 69. Distribución del cortante N_{xy} al variar la luz del puente para la carga P5

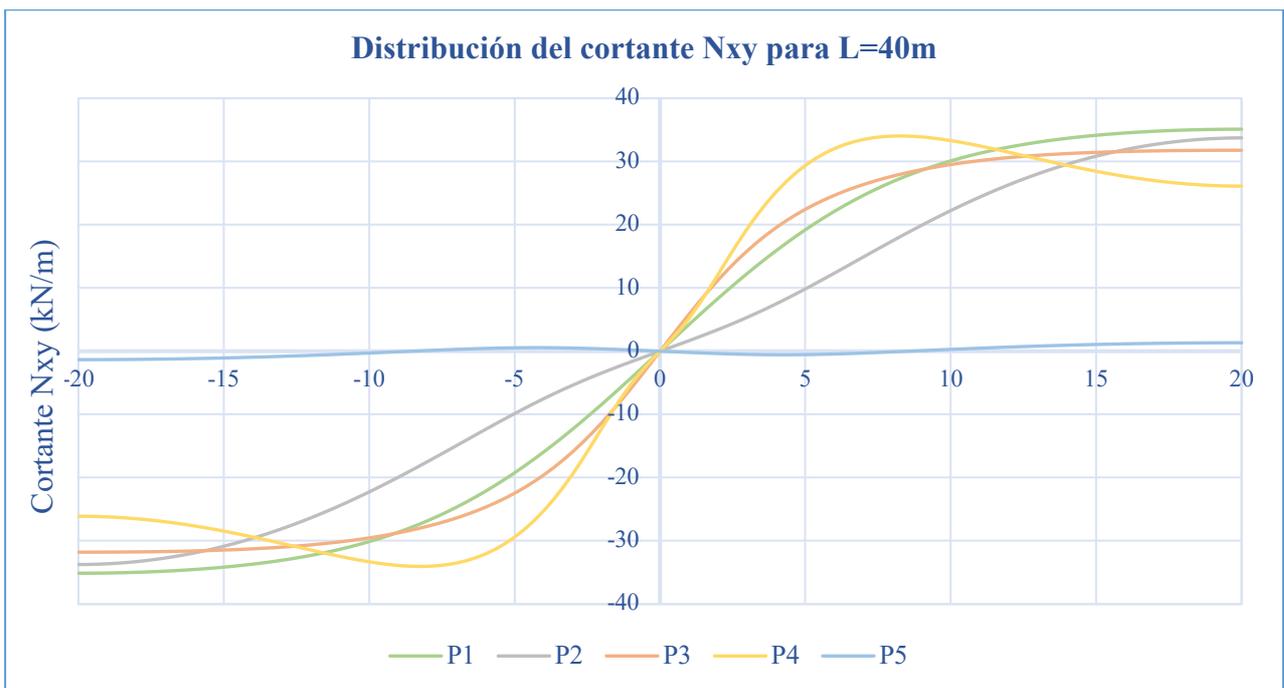


Figura 70. Distribución del cortante N_{xy} al variar la posición de la carga para L=40 m

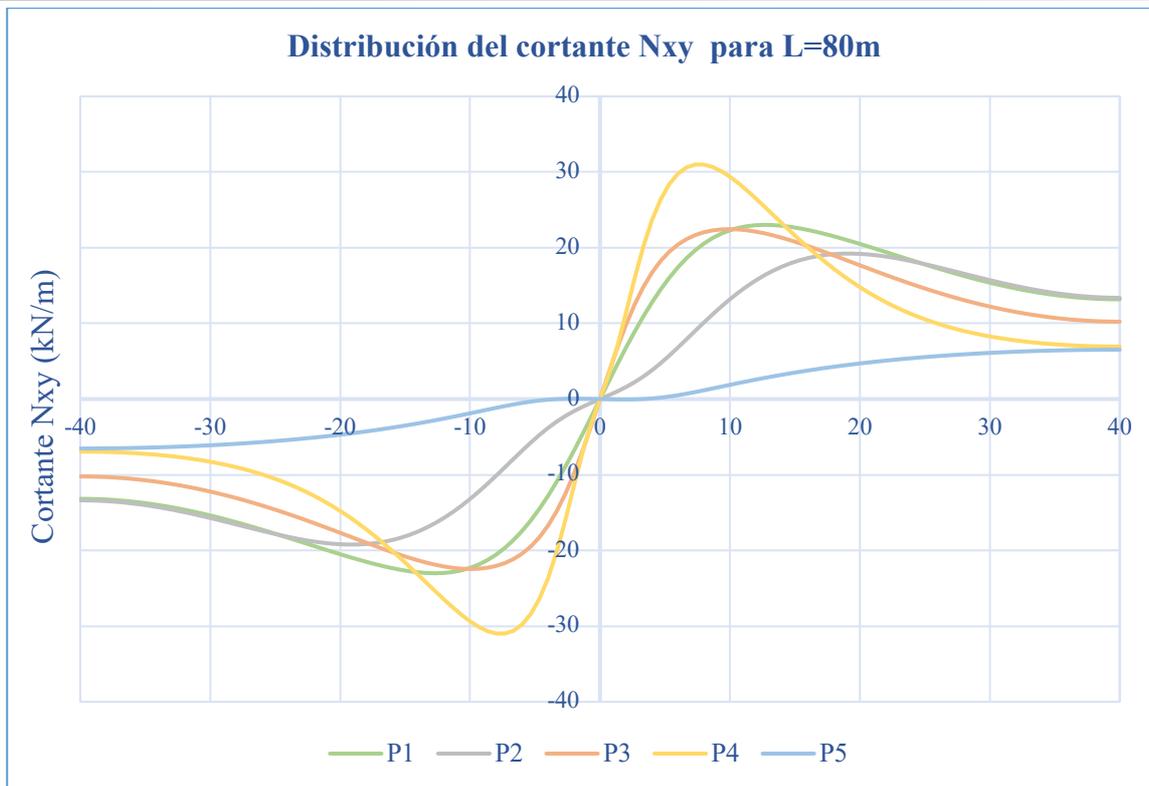


Figura 71. Distribución del cortante N_{xy} al variar la posición de la carga para $L=80\text{ m}$

Por último, el cortante N_{xy} , para todos los casos, tiene valor nulo en la sección central.

Por lo general, a excepción del caso de carga P5, el valor máximo se encuentra en puntos intermedios entre los apoyos y la sección central

Cuando la carga está más alejada del centro, el valor máximo en las luces menores se alcanza en el extremo y disminuye hasta el centro, para luces mayores su valor no se encuentra en los apoyos, sino en puntos intermedios entre éstos y la sección central.

Sin embargo, cuando la carga se aplica en el ala derecha del cajón izquierdo (P4), para todas las luces, el valor máximo se encuentra en un punto intermedio entre los apoyos y la sección central, siendo este punto cada vez más cercano a la sección central a medida que aumenta la luz del puente.

Para el caso de carga P5, como ya se ha indicado anteriormente, ante un fallo en el programa MIDAS no se obtienen los resultados esperados. En este caso, el cortante para todas las luces debería ser nulo.

4.1.2.4 Tensiones

Para el estudio de las tensiones, se analizarán como varían en el nudo 3, que es el más significativo por ser el que más varía a la hora de modificar las características geométricas y la posición de la carga. Además, se muestran las distribuciones de las tensiones en las secciones transversales centrales de varios casos.

Únicamente se procede a estudiar las tensiones normales porque las tensiones tangenciales apenas varían en los nudos del alma cargada.

A continuación, se representan las variaciones de las tensiones en el nudo 3 según la luz para cada caso de carga.

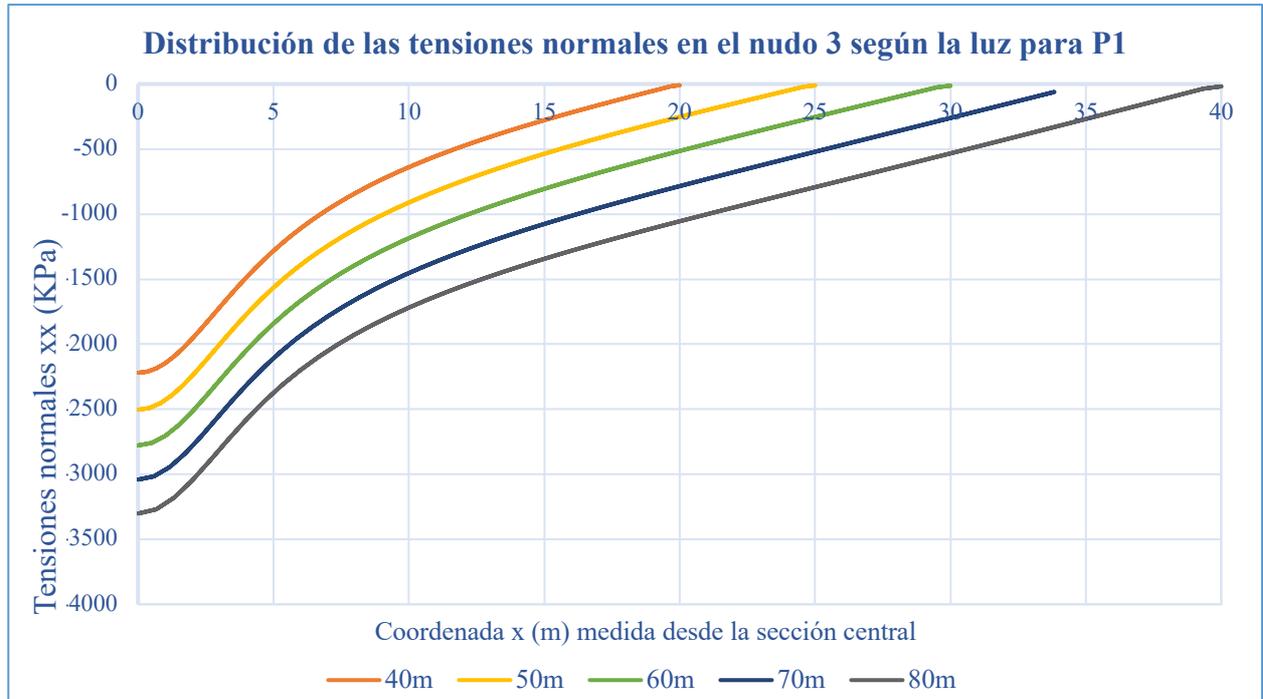


Figura 72. Distribución de las tensiones normales según la luz para P1

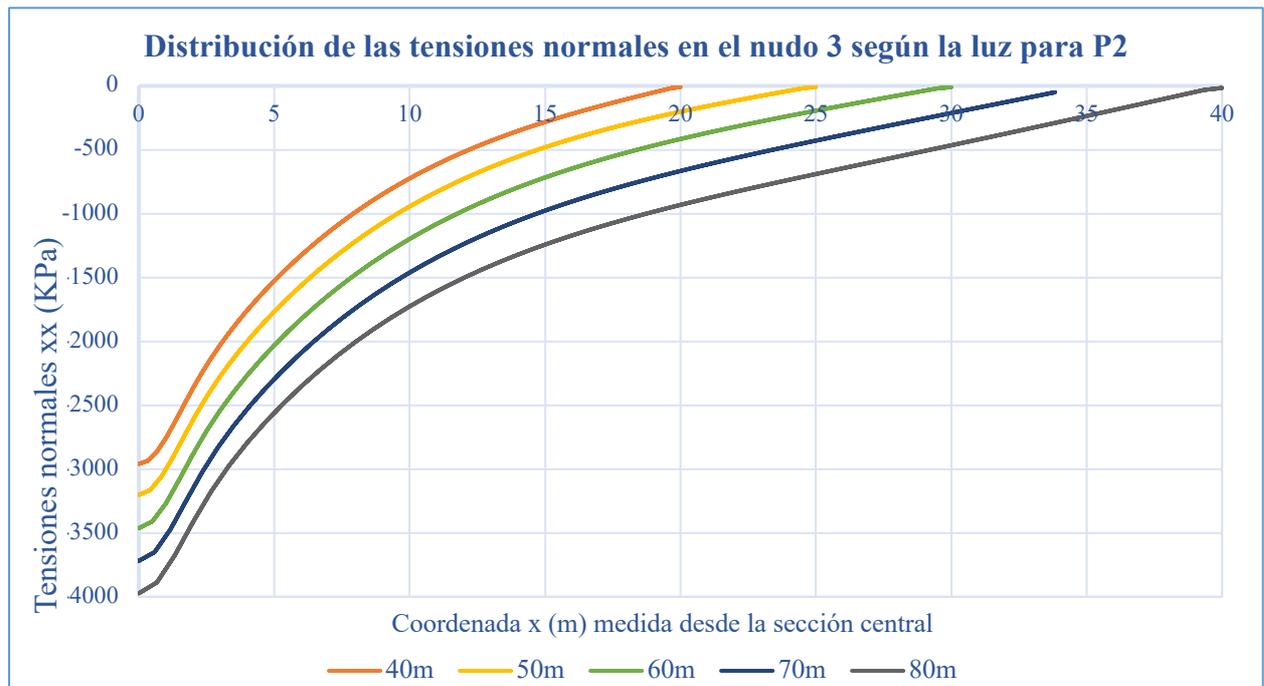


Figura 73. Distribución de las tensiones normales según la luz para P2

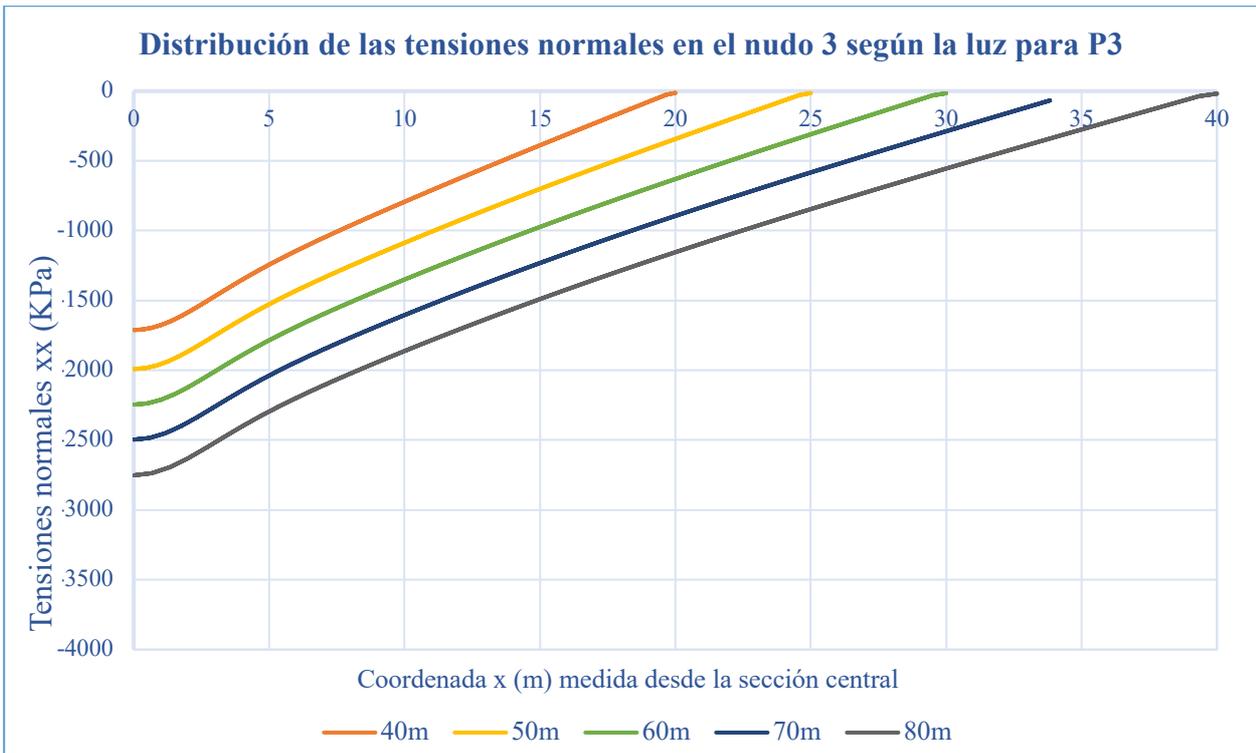


Figura 74. Distribución de las tensiones normales según la luz para P3

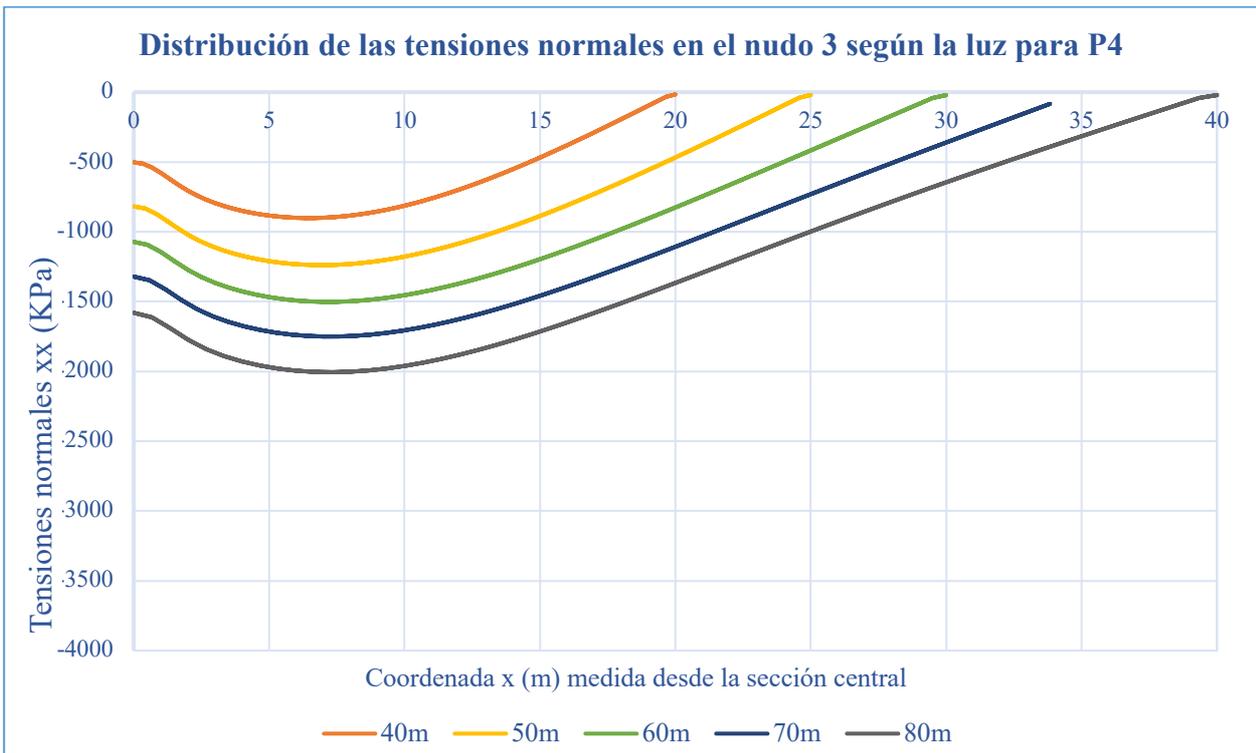


Figura 75. Distribución de las tensiones normales según la luz para P4

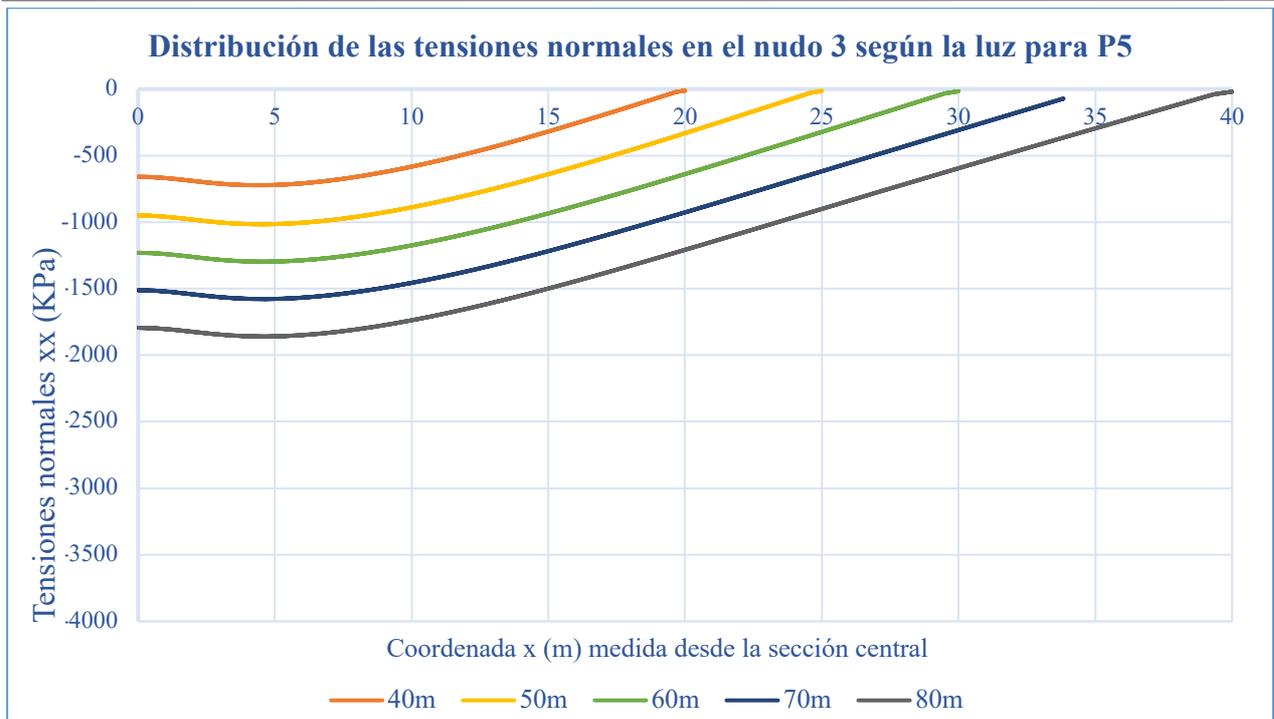


Figura 76. Distribución de las tensiones normales según la luz para P5

De estas gráficas se obtiene que la tensión en el nudo 3 es siempre de tracción y tiene su máximo en la sección central. Además, aumenta a medida que aumenta la luz del puente.

Comparando los valores de la tensión según la posición de la carga se observa que el máximo se da para P2, esto es lógico ya que la carga está situada encima del nudo 3.

Por último, se muestran las tensiones normales de las secciones transversales del centro del puente para los valores extremos de la luz del puente, es decir, para luces de 40 m y 80 m, y se observa que las tensiones son más uniformes a lo largo de la sección transversal cuando la luz aumenta y cuando la carga se centra. Mientras que con la carga P1 cambia desde un 2.61 % a un 20.91 %, con la carga P5 varía desde un 35.79 % a un 48.74 %. En definitiva, hay un mejor reparto de las cargas a través de ña sección transversal, conforme aumenta la luz.

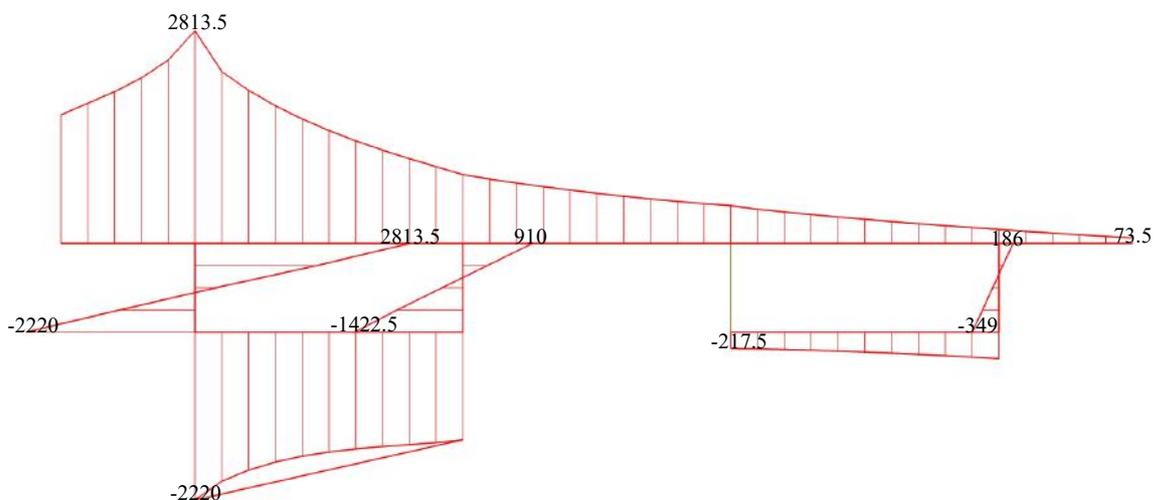


Figura 77. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P1, del modelo de 40 m de luz

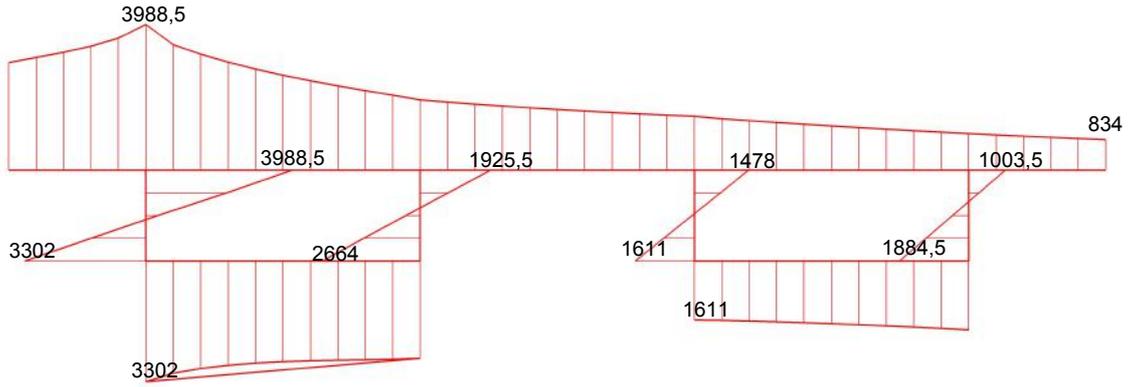


Figura 78. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P1, del modelo de 80 m de luz

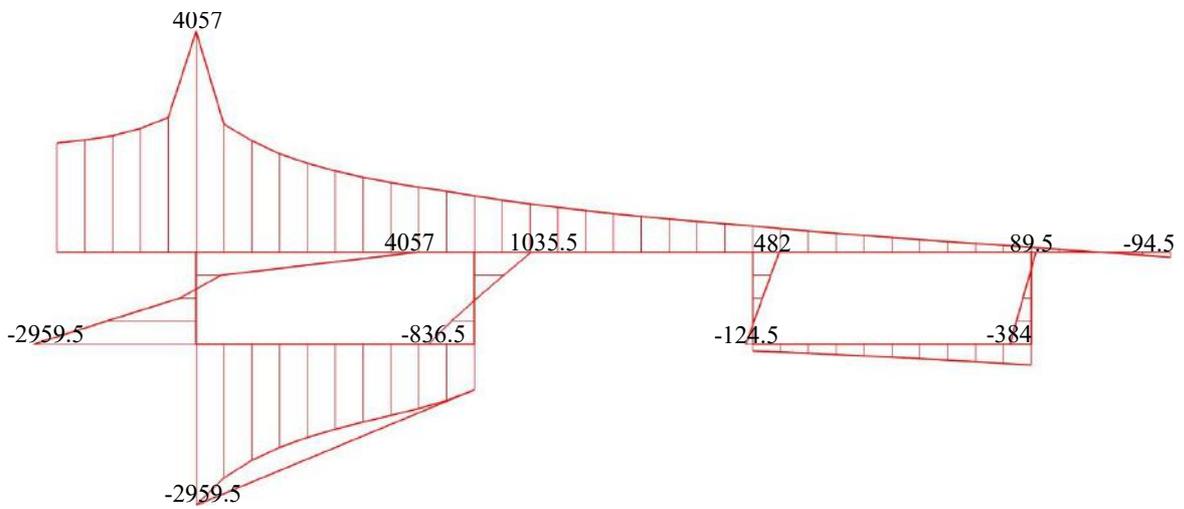


Figura 79. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P2, del modelo de 40 m de luz

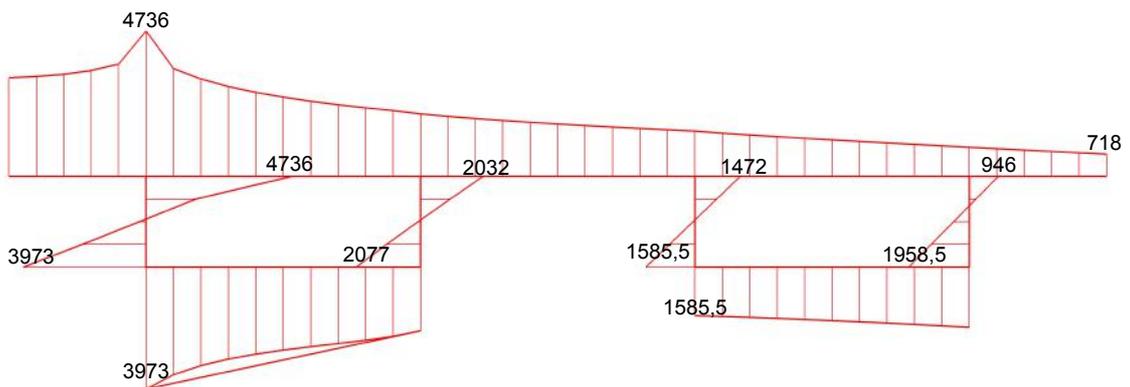


Figura 80. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P2, del modelo de 80 m de luz

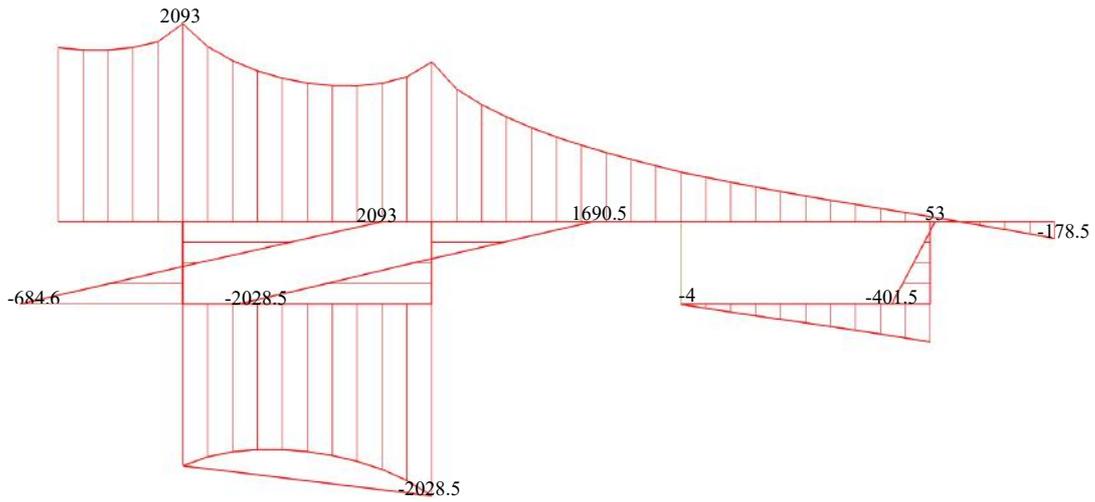


Figura 81. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P3, del modelo de 40 m de luz

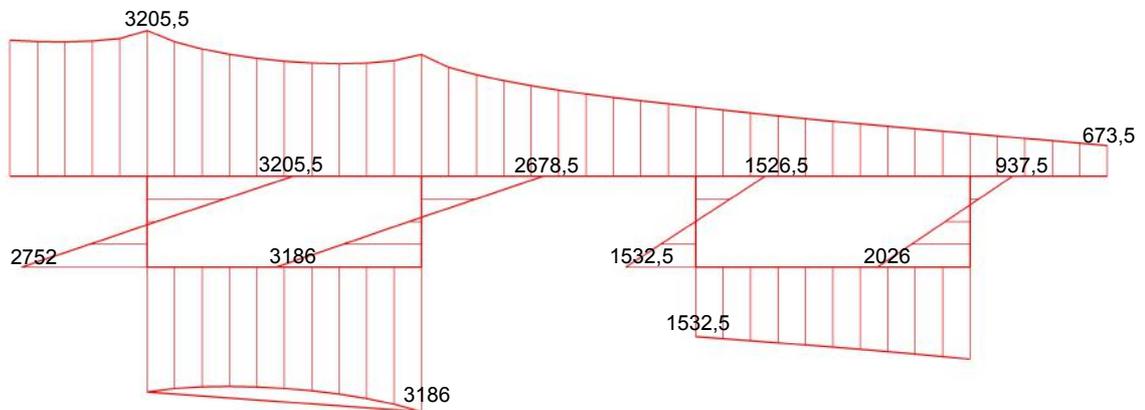


Figura 82. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P3, del modelo de 80 m de luz

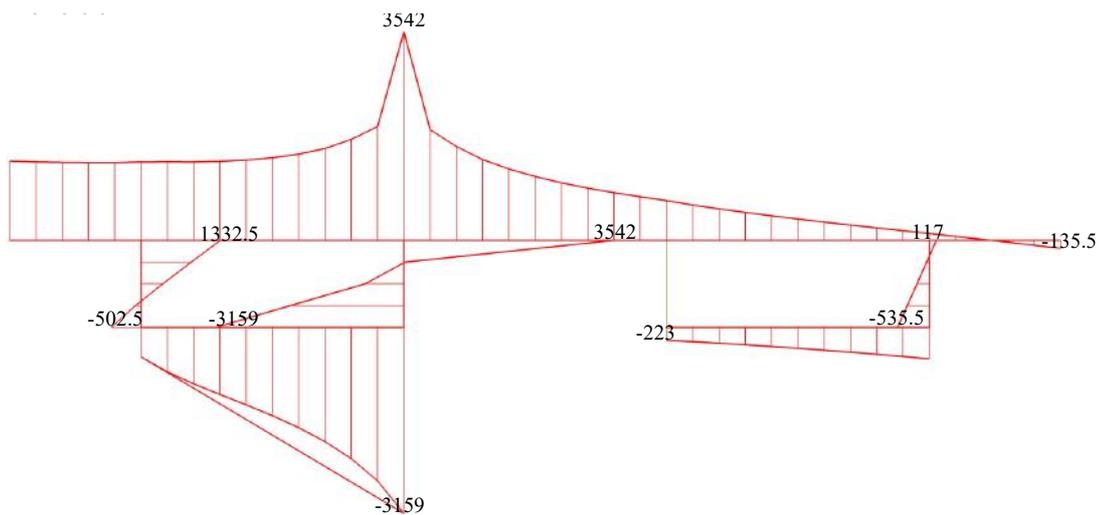


Figura 83. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P4, del modelo de 40 m de luz

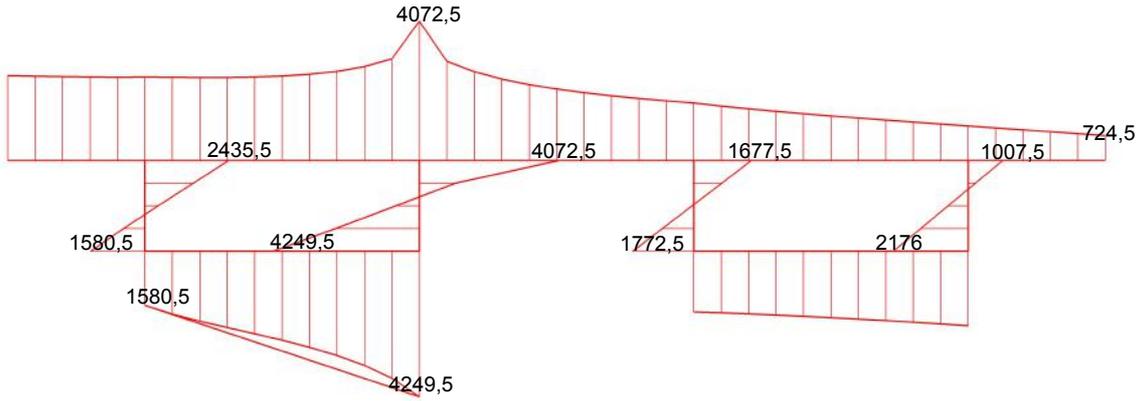


Figura 84. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 80 m de luz

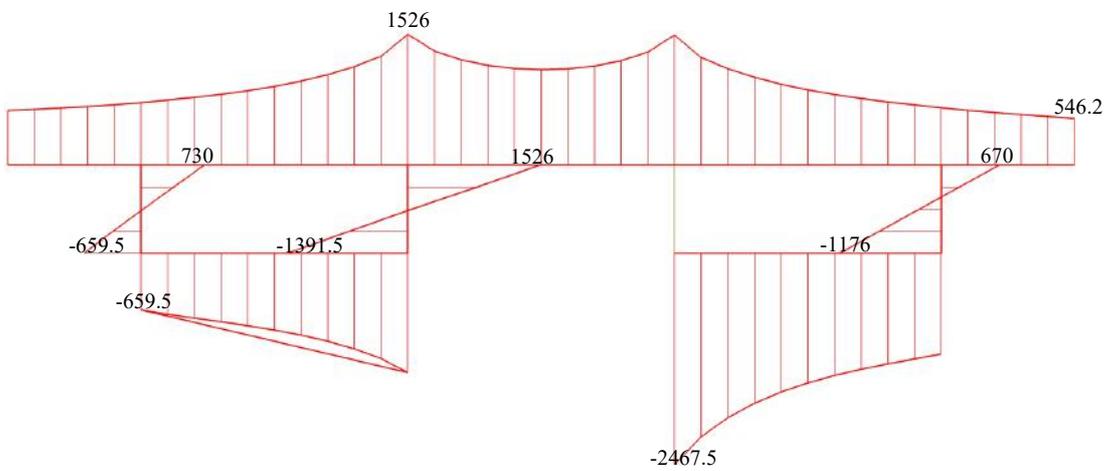


Figura 85. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 40 m de luz

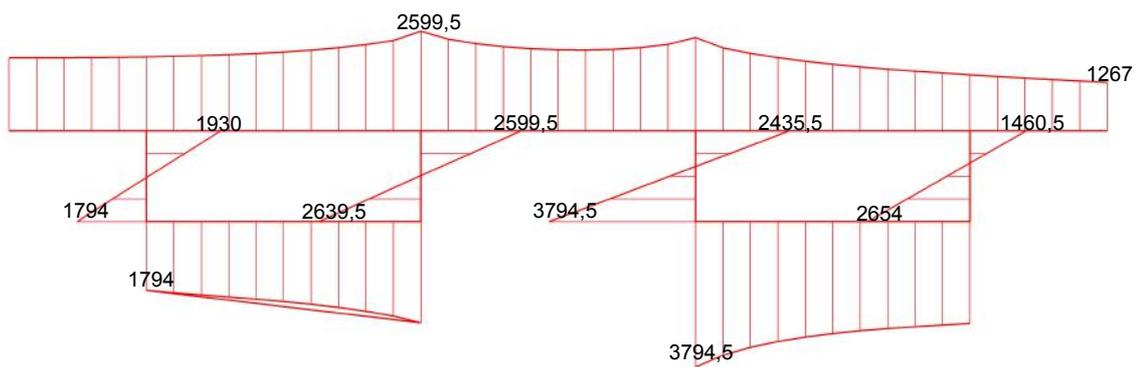


Figura 86. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 80 m de luz

4.2 Caso 2: Variación de la inclinación de las almas

4.2.1 Descripción del modelo

En este apartado se procede a estudiar el comportamiento del tablero según varíe la inclinación de las almas de los cajones. El estudio consta de siete modelos, que varían desde los 40° hasta los 90°, incrementando en cada uno 10° la inclinación, más otro modelo de 45°.

Siempre tomando como referencia el modelo de D. Javier Manterola, que corresponde con la inclinación de 90°.

4.2.2 Respuesta ante cargas puntuales

4.2.2.1 Desplazamientos

En las siguientes imágenes se muestran los desplazamientos para los modelos de 40°, 60°, 80° de inclinación de las almas de los cajones cuando se le aplica una carga en el nudo 2 (P2).

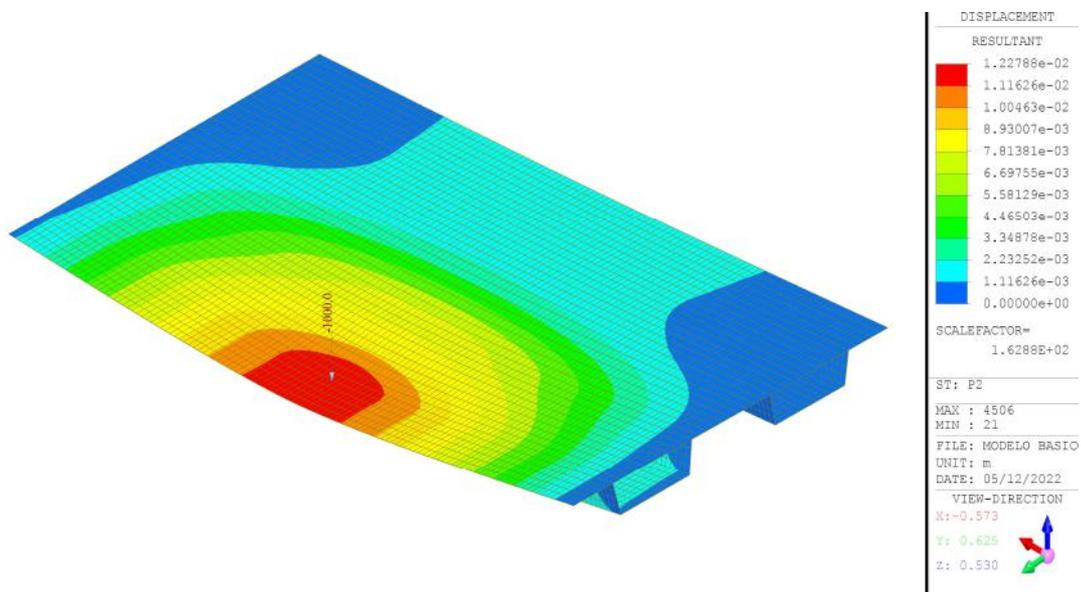


Figura 87. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 80° sometido a la carga P2

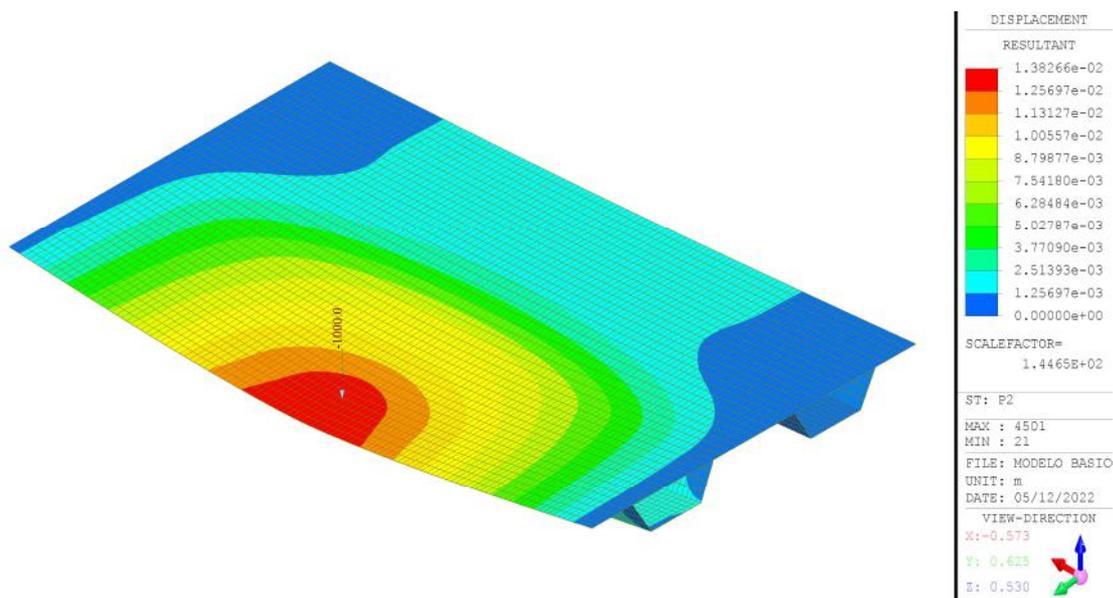


Figura 88. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 60° sometido a la carga P2

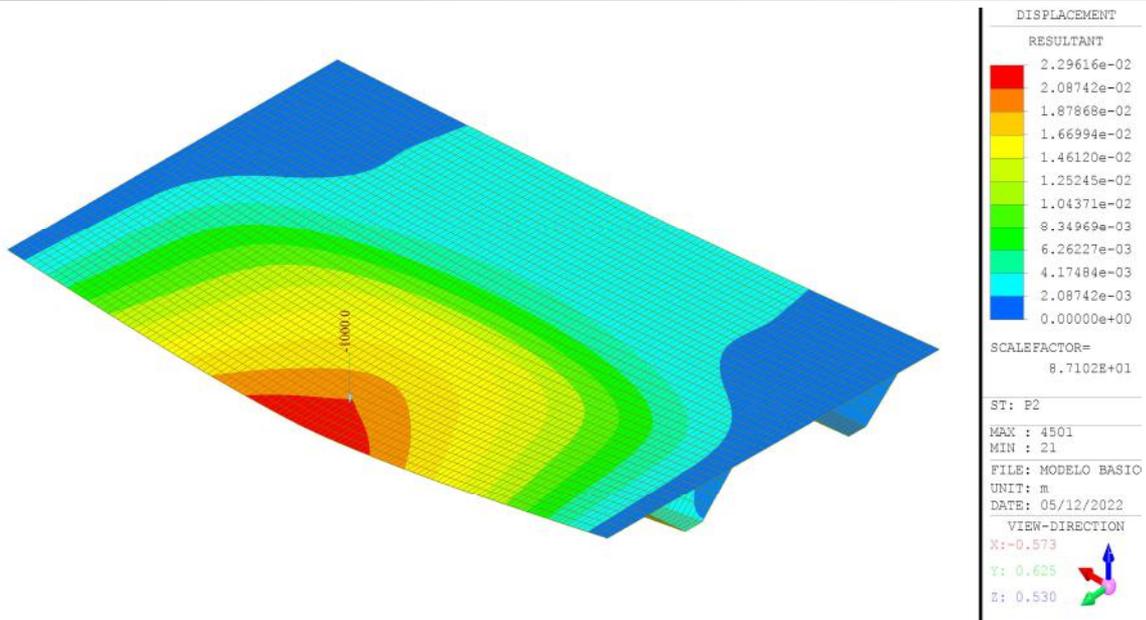


Figura 89. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 40° sometido a la carga P2

En las figuras 87, 88 y 89, se puede ver la variación de los desplazamientos que sufre la estructura cuando se encuentra sometido a una carga en el tablero sobre el alma izquierda del cajón izquierdo (P2).

En primer lugar, cabe destacar que a medida que se va disminuyendo la inclinación de las almas de los cajones, los desplazamientos verticales van aumentando en la zona de influencia de la carga, la cual permanece prácticamente constante.

Sin embargo, se aprecia como para una inclinación de almas de 80°, la distribución de los desplazamientos tiene forma de U, mientras que cuando la inclinación es de 40°, esta forma evoluciona hasta adoptar forma de V.

A continuación, se muestran los desplazamientos para los modelos de 40°, 60°, 80° de inclinación de las almas de los cajones cuando se le aplica una carga en el nudo 5 (P3).

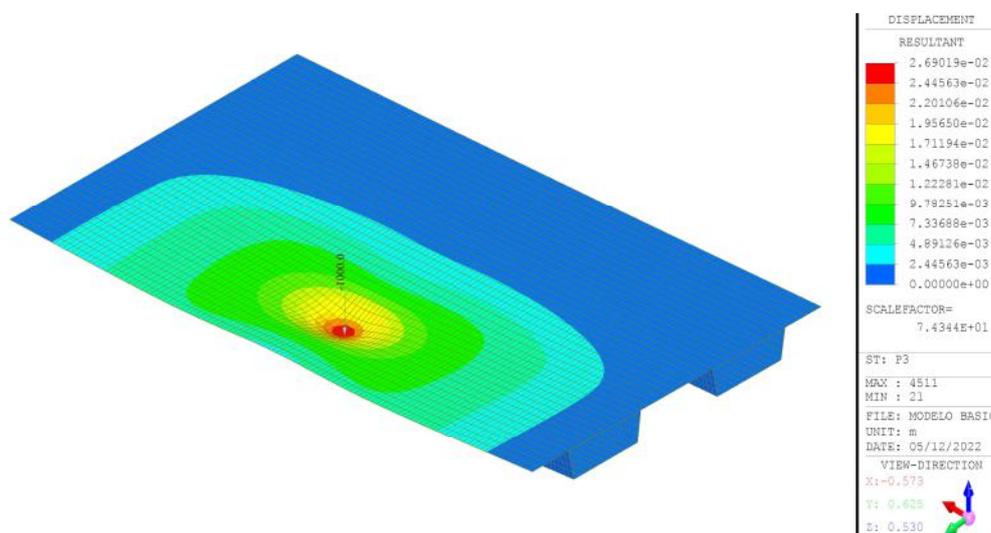


Figura 90. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 80° sometido a la carga P3

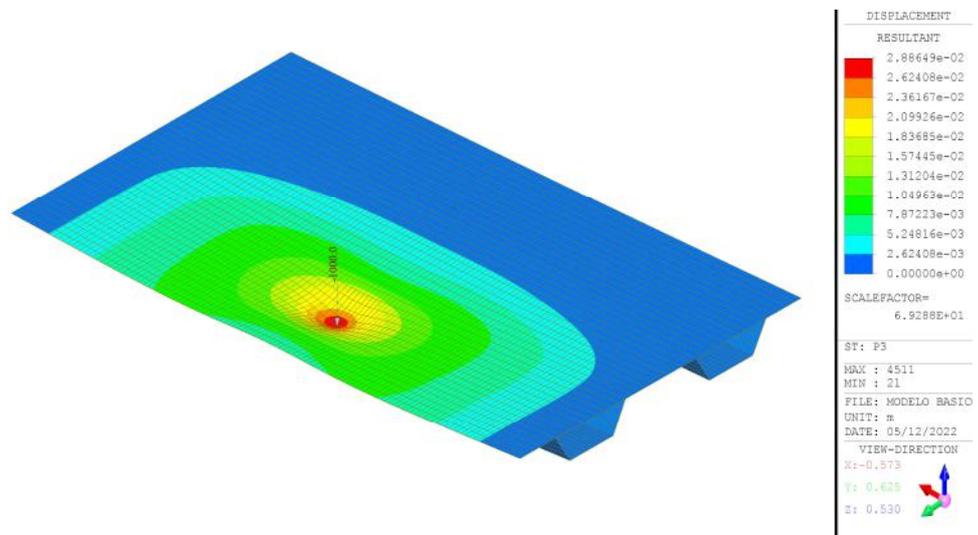


Figura 91. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 60° sometido a la carga P3

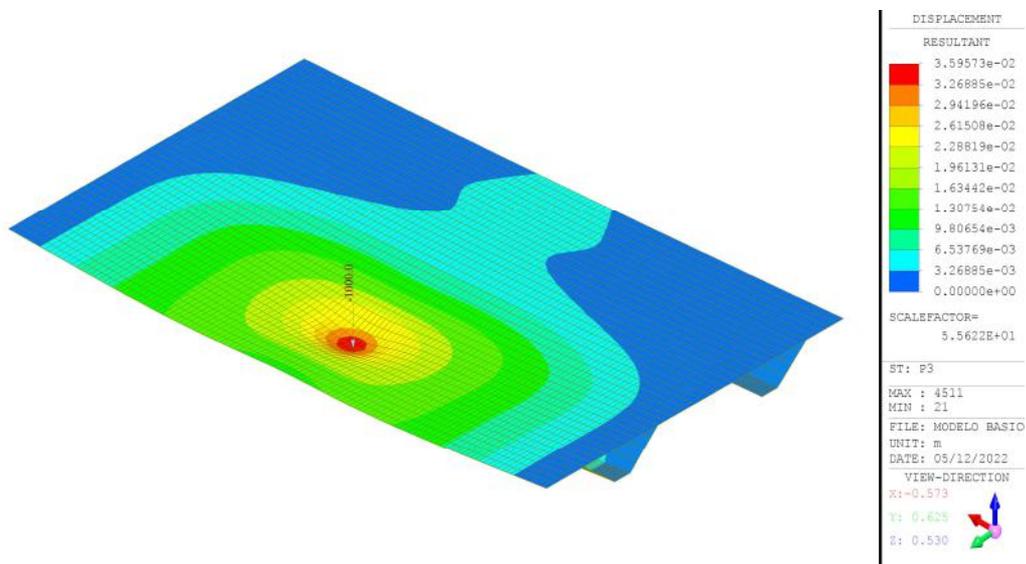


Figura 92. Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 40° sometido a la carga P3

Al igual que en el caso anterior, para el modelo que está sometido a una carga en el centro del cajón izquierdo, los desplazamientos aumentan cuando disminuye la inclinación de las almas.

Para entender el comportamiento de la estructura para cada caso de carga, relacionamos la flecha máxima de cada modelo dependiendo de la inclinación de las almas y de la posición de la carga.

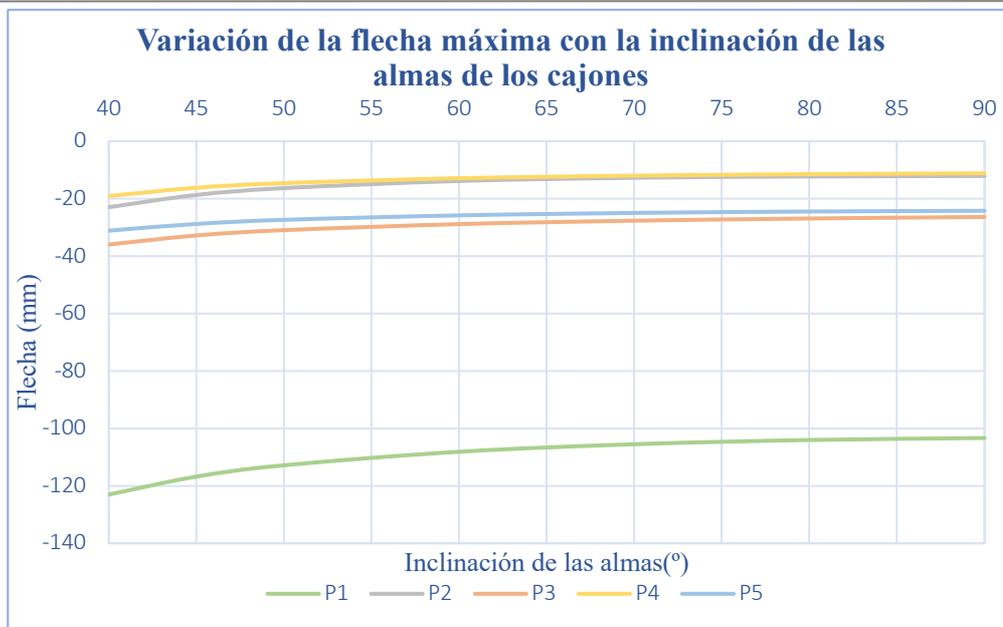


Figura 93. Variación de la flecha máxima con la inclinación de las almas

Al ser todas las curvas similares, se deduce que el comportamiento del tablero para cada uno de los casos de carga es prácticamente idéntico. Este es, al aumentar la inclinación de las almas, los desplazamientos verticales disminuyen hasta un cierto valor, entre 65° y 80° dependiendo de la posición de la carga. A partir de este punto, en cada curva, la flecha sigue disminuyendo pero de forma más suave.

Este aumento de la flecha conforme disminuye la inclinación de las almas está relacionado con la pérdida de rigidez a torsión y a flexión.

4.2.2.2 Distorsión

En las siguientes gráficas (figuras 94 y 95) se puede ver la distorsión para la sección central del cajón izquierdo y el cajón derecho, cuando se someten a los distintos casos de carga.

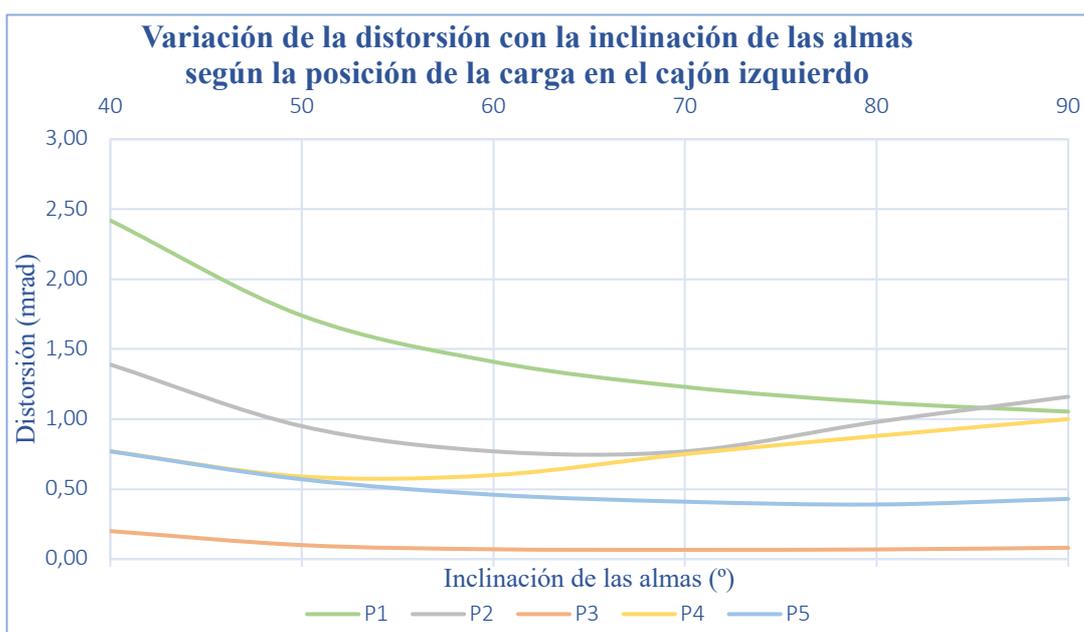


Figura 94. Variación de la distorsión con la inclinación de las almas en el cajón izquierdo

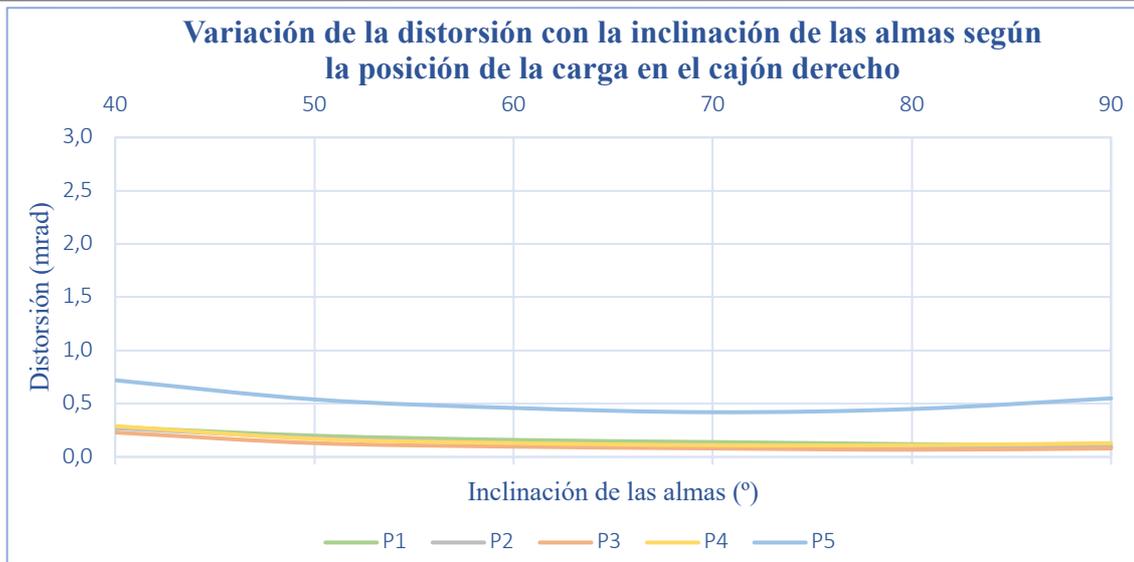


Figura 95. Variación de la distorsión con la inclinación de las almas en el cajón derecho

En general, la distorsión es mayor para la carga más excéntrica, pero cualquier carga produce más distorsión que la carga P3 (centrada en el cajón), y eso es independiente de la inclinación. También se ve un cambio de tendencia de la distorsión con la inclinación, en función de dónde se ha puesto la carga, que está relacionado con la flexión de las almas.

Para el primer caso de carga, para minimizar la distorsión del cajón cargado, las almas deberían tener una inclinación de 90°, mientras que, para las cargas P2 y P4, la inclinación debería ser entre 70° y 50°. Sin embargo, para los casos de carga P3 y P5, la inclinación puede variar entre los 55° y 90° sin que cambie de la distorsión.

4.2.2.3 Esfuerzos

A continuación, se muestran las gráficas de cómo evolucionan los esfuerzos cuando se varía la inclinación de las almas. Se han representado los esfuerzos de los modelos de 40°, 45°, 50°, 70°, 80° y 90°, más que en el caso anterior en el que varía la luz del puente, ya que la distribución de esfuerzos cambia significativamente de un modelo a otro.

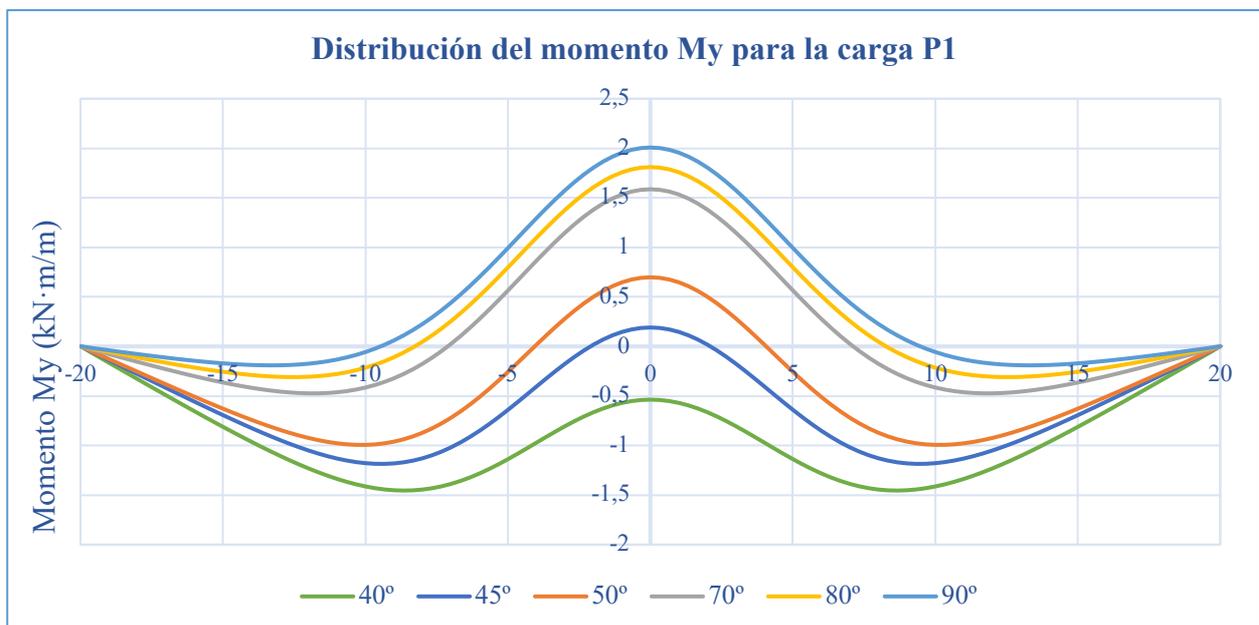
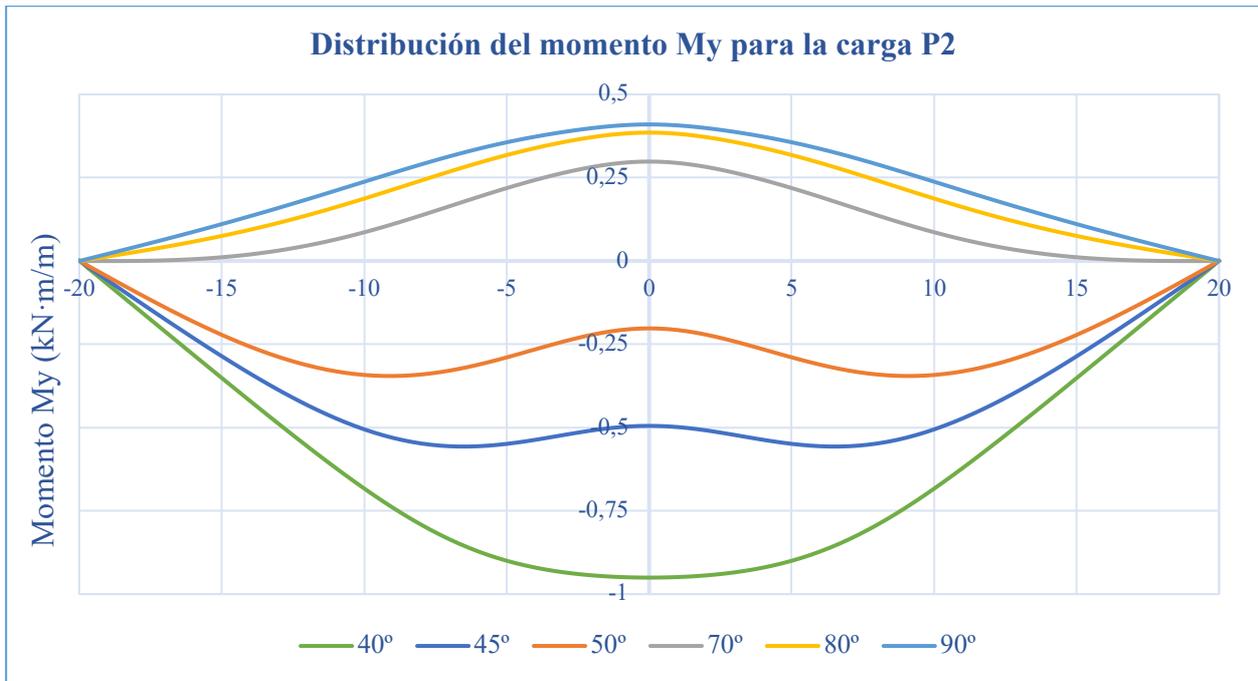
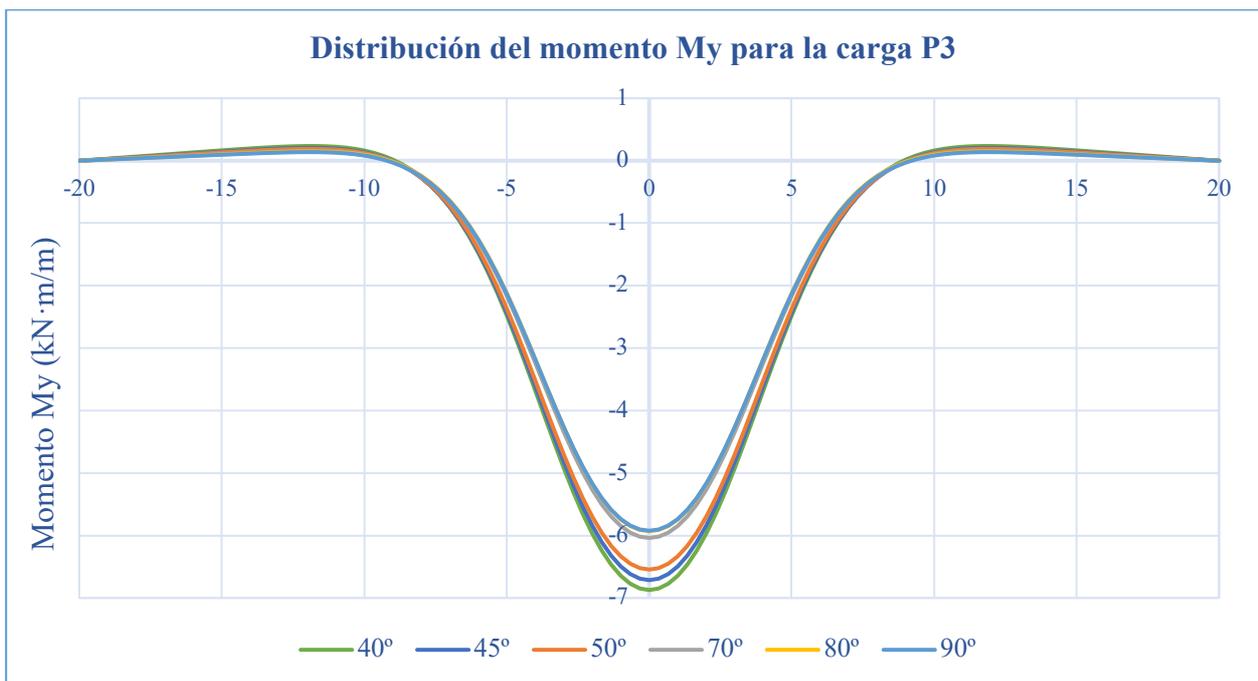


Figura 96. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P1

Figura 97. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P2Figura 98. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P3

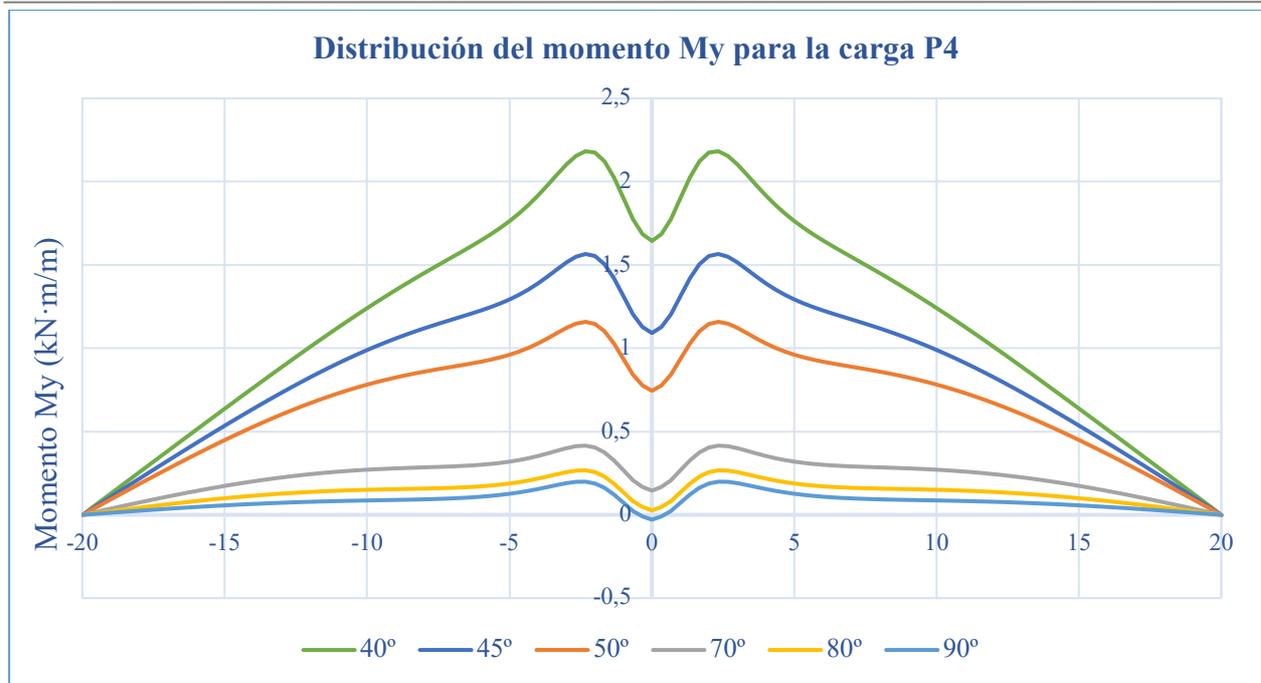


Figura 99. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P4

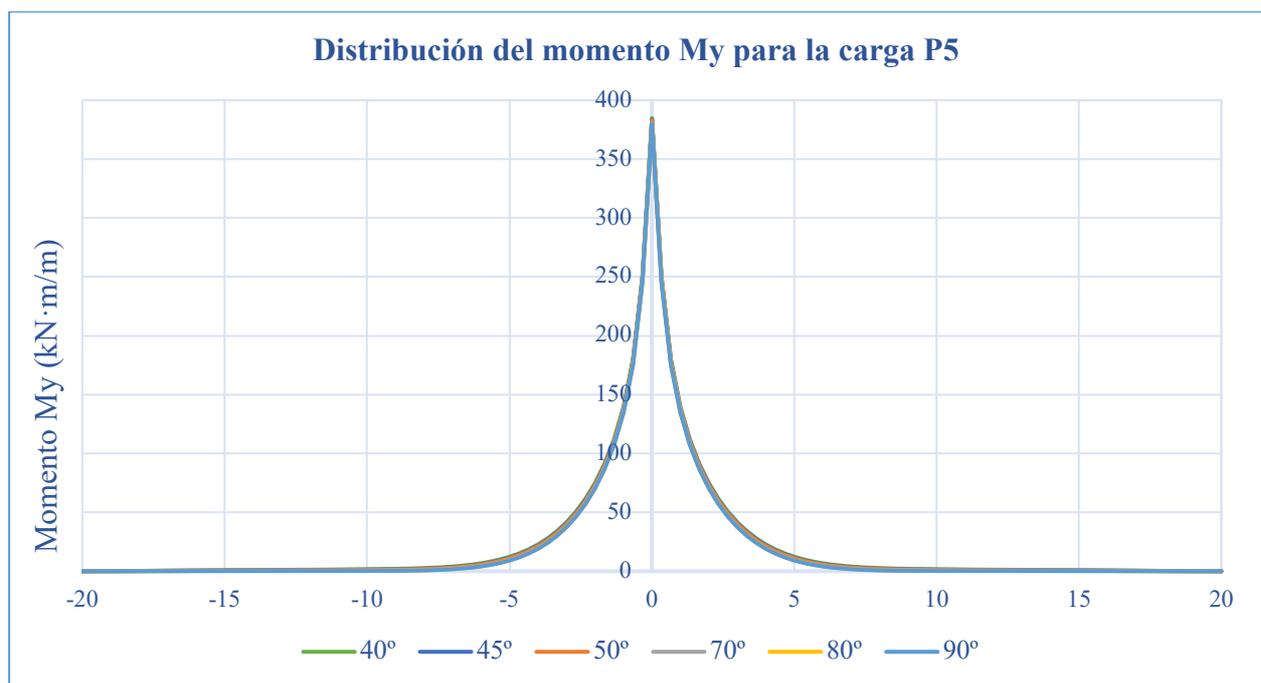


Figura 100. Distribución del momento M_y según la inclinación de las almas para P5

Para estos cinco casos de carga diferentes se aprecian muchas diferencias entre sus gráficas, por lo que el momento M_y cambia significativamente con la posición de la carga.

En primer lugar, para el modelo de la carga P1, se observa como para los casos en los que las almas están menos inclinadas, los momentos son positivos en el centro y negativos en los extremos. A partir de dicho valor, los momentos por lo general son negativos a lo largo de todo el puente.

Para el segundo caso de carga, ocurre algo similar al caso de carga P1 pues los momentos cuando las almas están a 90° son positivos y cuando están a 40° son negativos.

Al igual que sucedía en el caso I de variación de luz, para el caso de carga P3, los momentos son negativos en el centro para todos los modelos de inclinación de almas y positivos a aproximadamente un quinto de los extremos.

Y, por último, los casos de carga P4 y P5 en los que para todos los modelos los momentos son positivos. Sin embargo, los de P5 son mucho mayores porque la carga se ha aplicado sobre la misma sección de estudio y el efecto local de la carga se aprecia más y no depende de la inclinación de las almas.

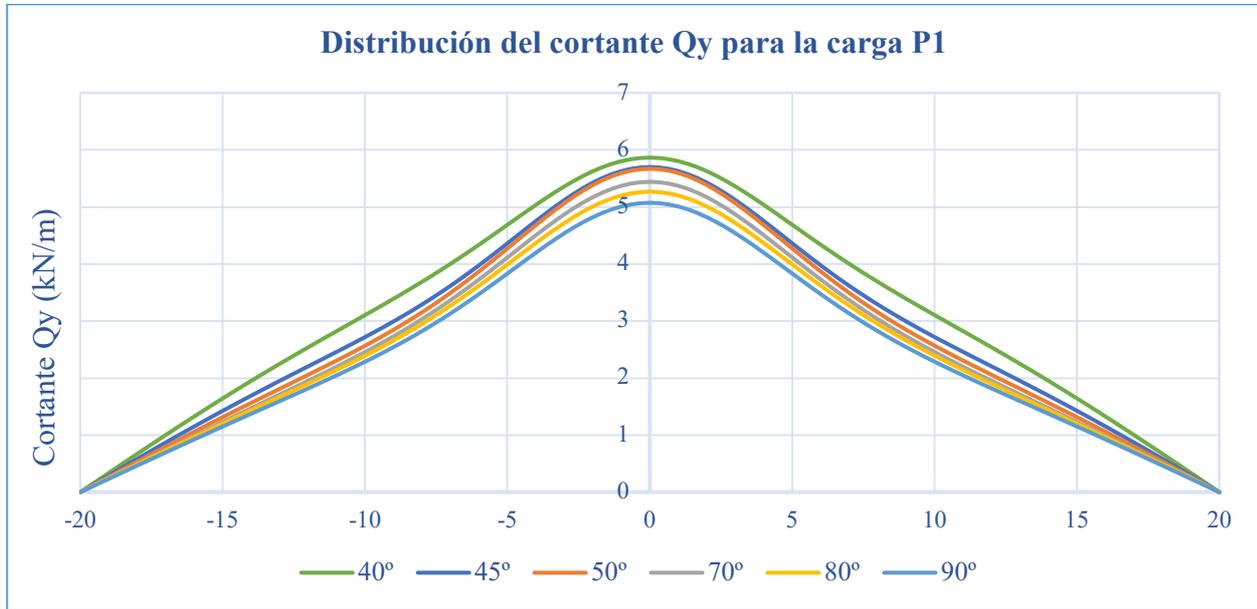


Figura 101. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P1

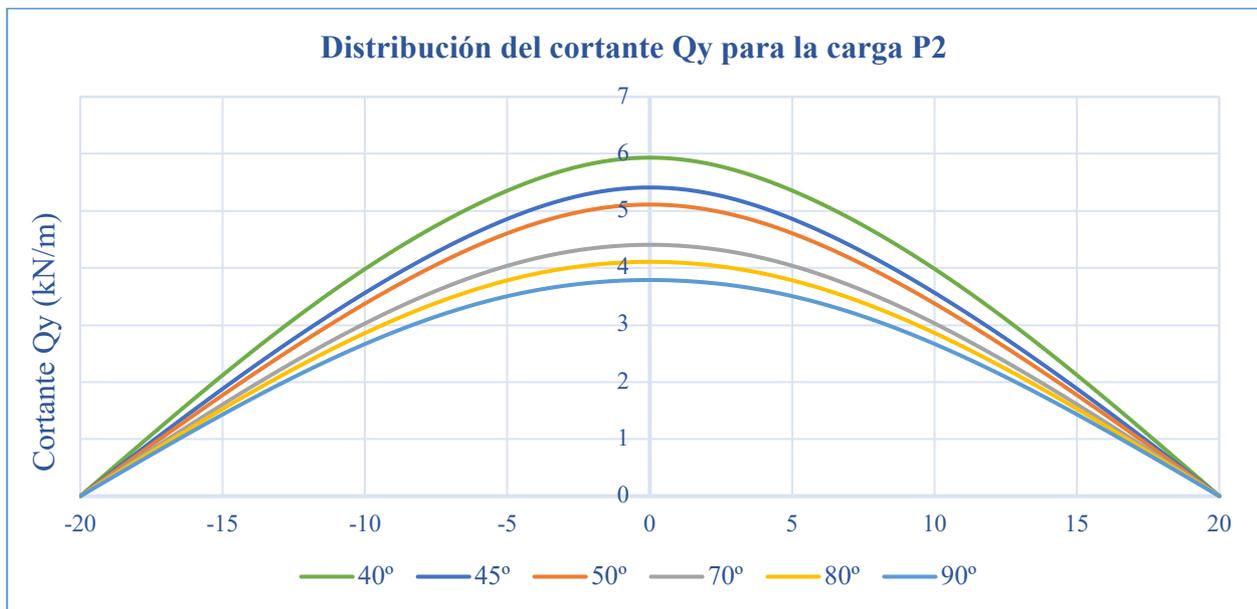


Figura 102. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P2

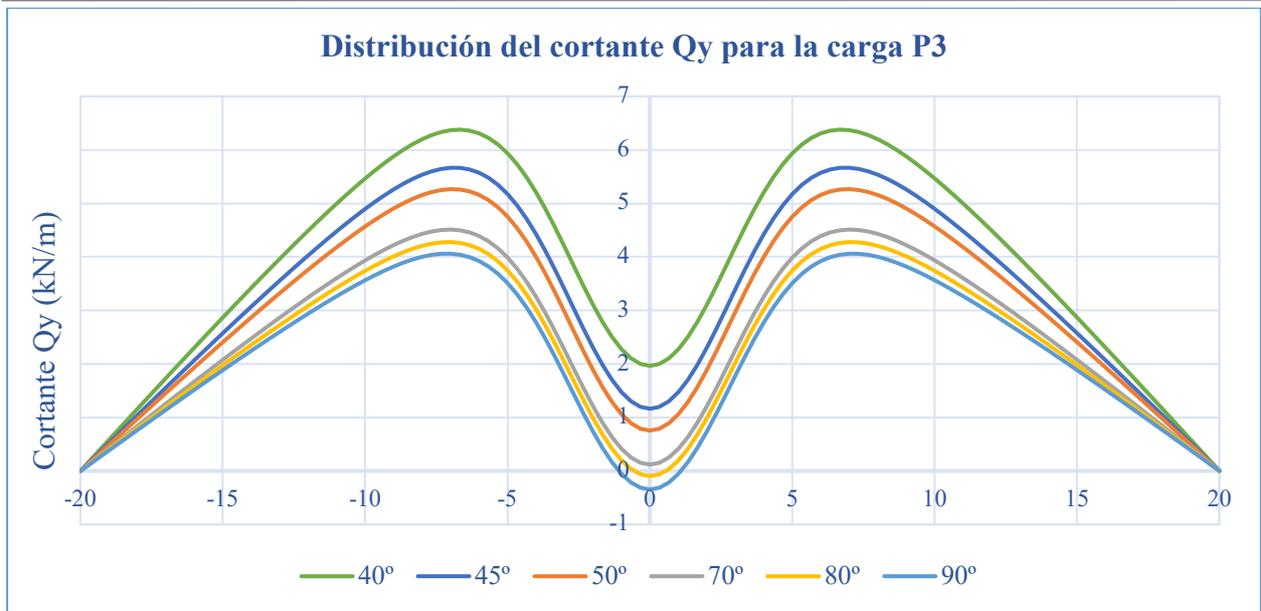


Figura 103. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P3

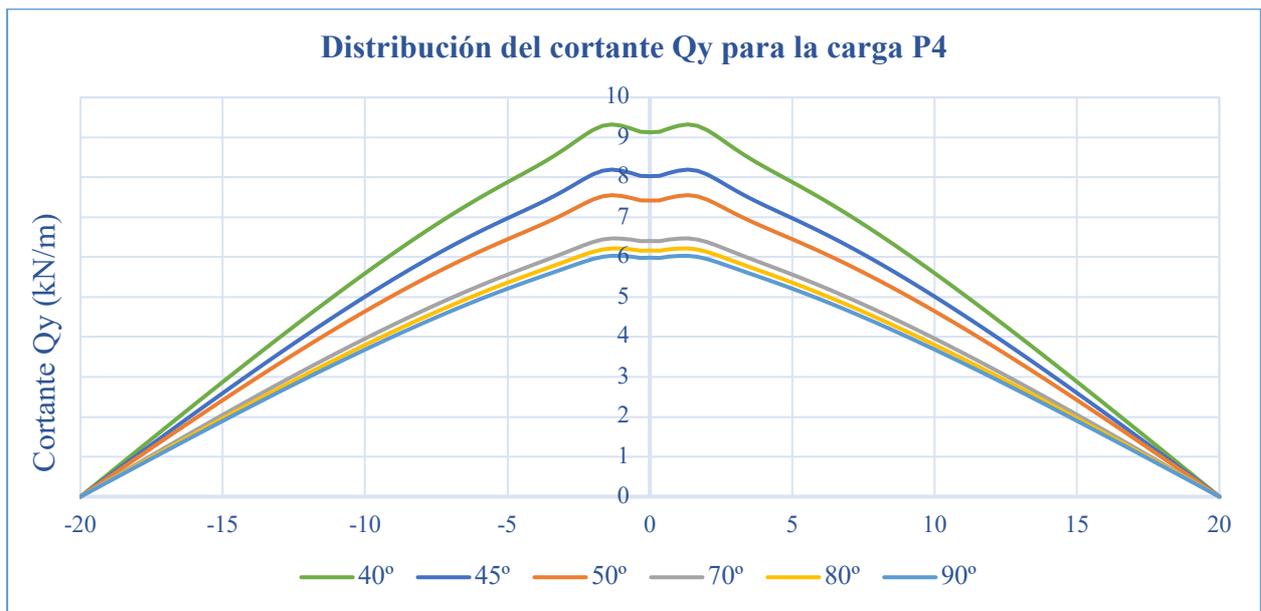


Figura 104. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P4

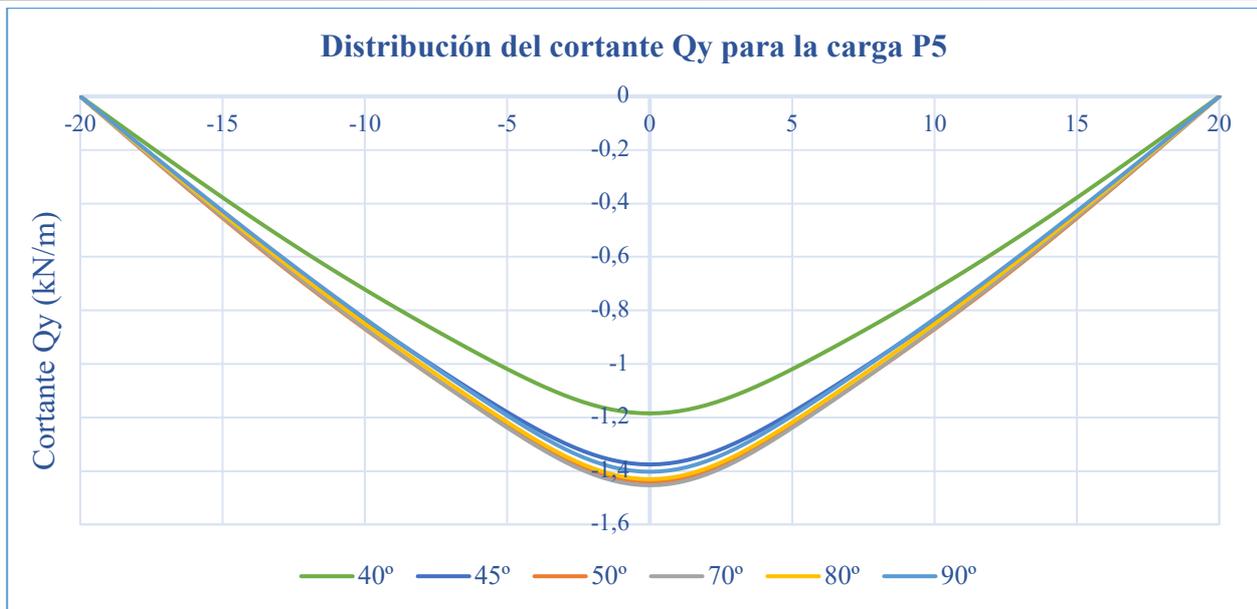


Figura 105. Distribución del cortante Q_y según la inclinación de las almas para P5

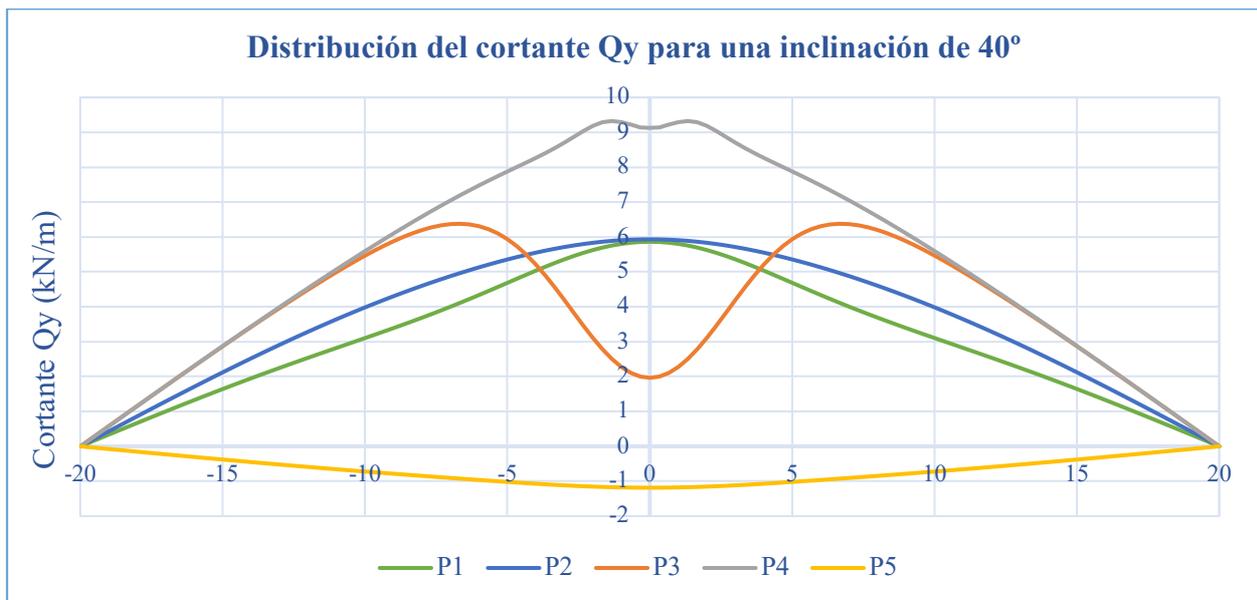


Figura 106. Distribución del cortante Q_y según la posición de la carga para una inclinación de 40°

En cuanto al cortante Q_y , la distribución es la misma en cada uno de los casos de carga: para P1, P2 y P4 en el centro del puente se encuentra el valor máximo, mientras que en los extremos se da un valor mínimo (nulo), siendo de signo positivo en toda la longitud del puente. En cambio, para P5 se da la misma geometría, máximos en el centro y mínimos en los extremos pero, esta vez, los esfuerzos son negativos. Y para el caso P3, los esfuerzos son positivos pero los valores máximos se dan a un tercio aproximadamente de los extremos.

Se observa que para todos los modelos, el valor máximo del cortante se da para una inclinación de almas de 40° cuando la carga está situada en encima del alma derecho del cajón izquierdo (P4). Además, el cortante Q_y aumenta cuando disminuye la inclinación de las almas, para todas las posiciones de la carga excepto para P5, que debería ser cero, pero por alguna cuestión misteriosa, tenemos valores aunque pequeños.

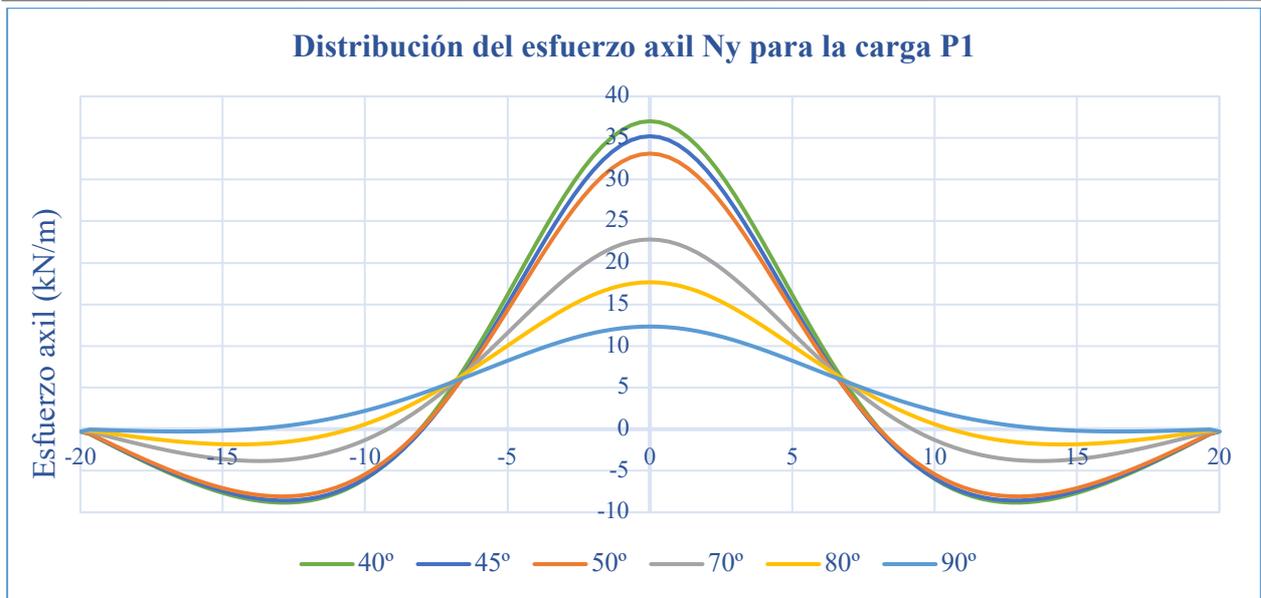


Figura 107. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P1

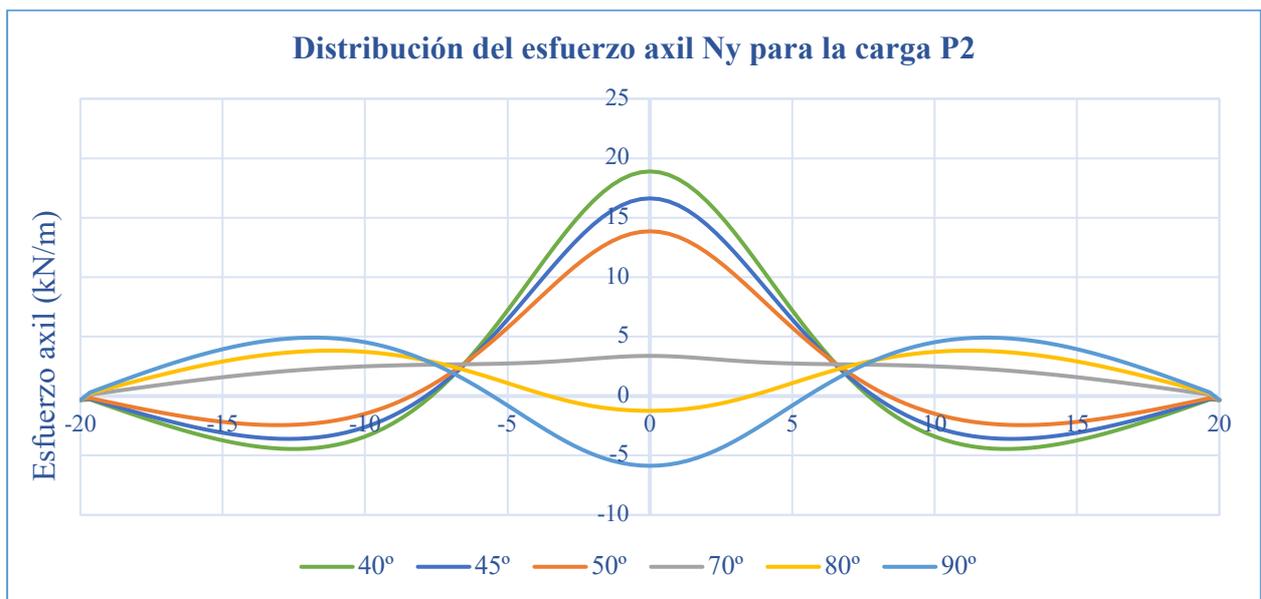
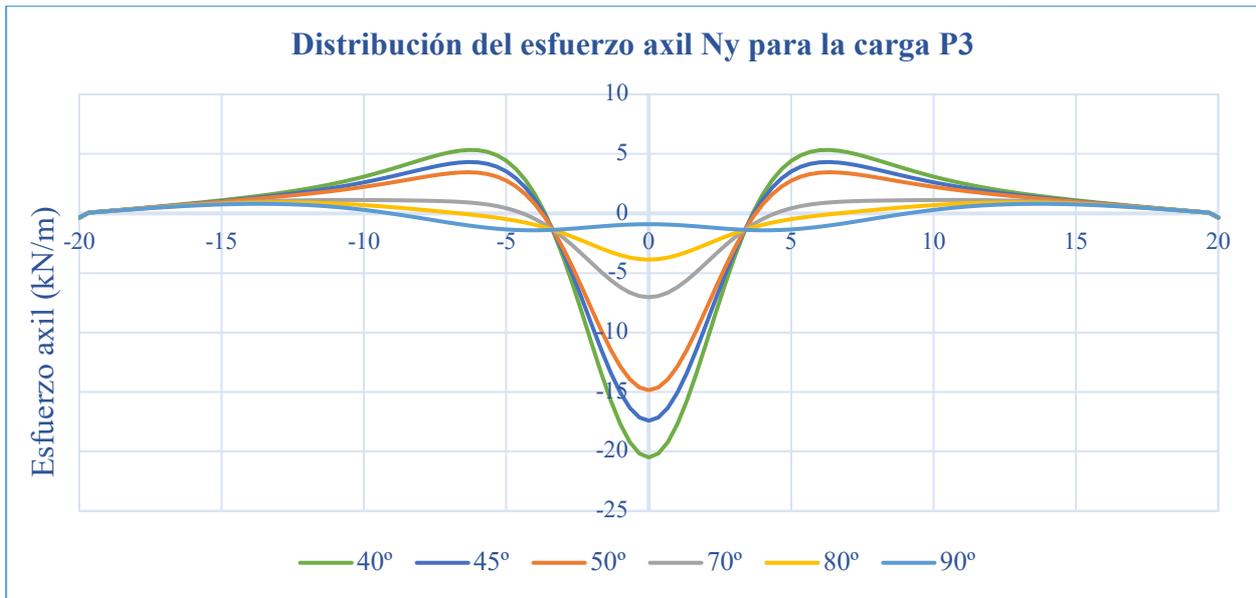
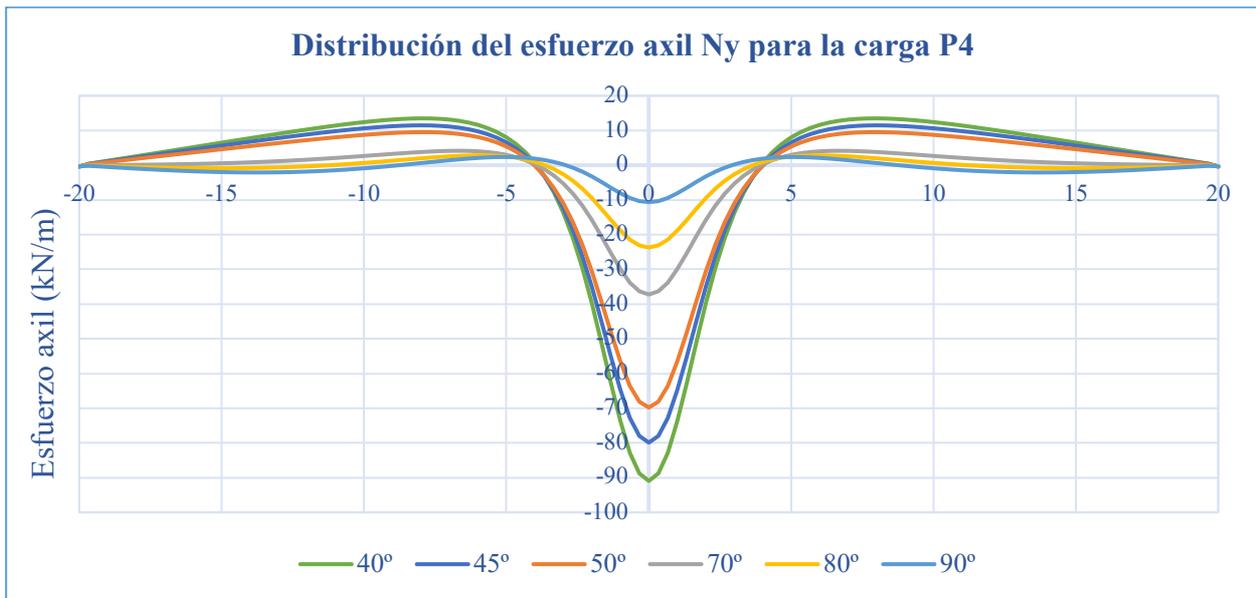


Figura 108. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P2

Figura 109. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P3Figura 110. Distribución del esfuerzo axil N_y según la inclinación de las almas para P4

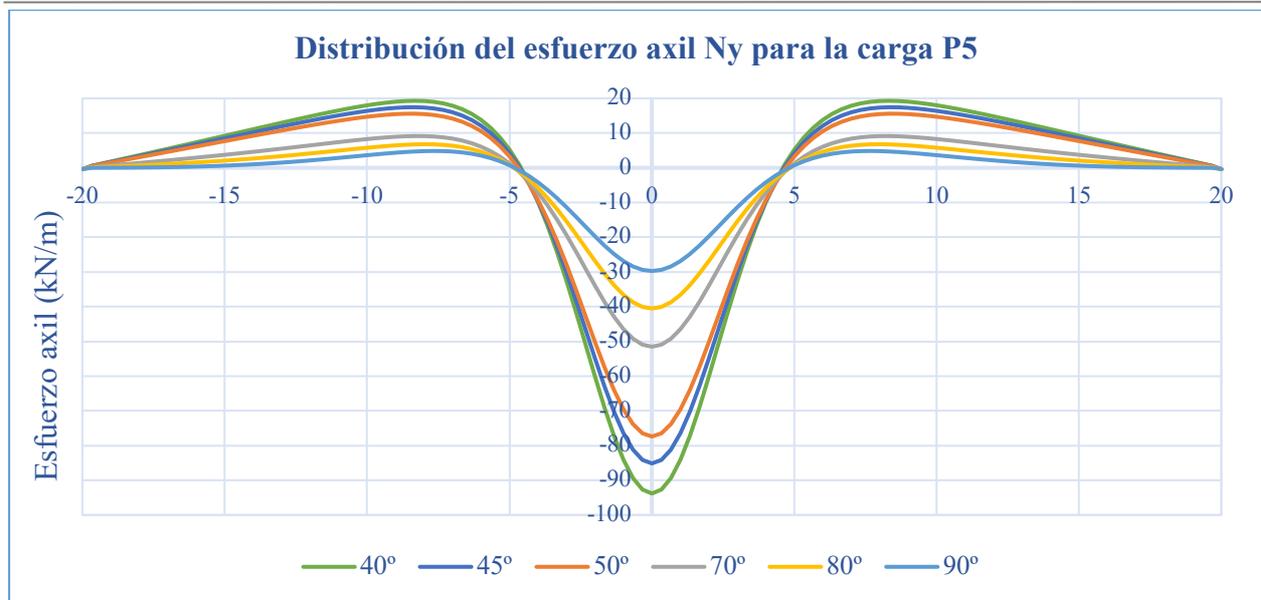


Figura 111. Distribución del esfuerzo axial N_y según la inclinación de las almas para P5

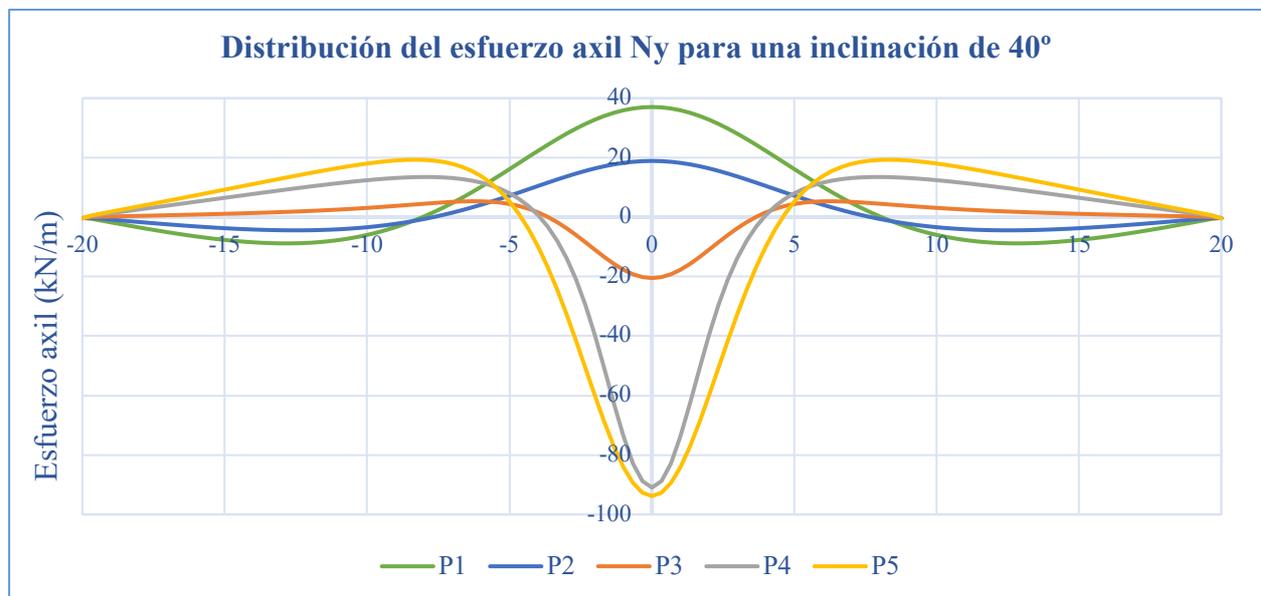
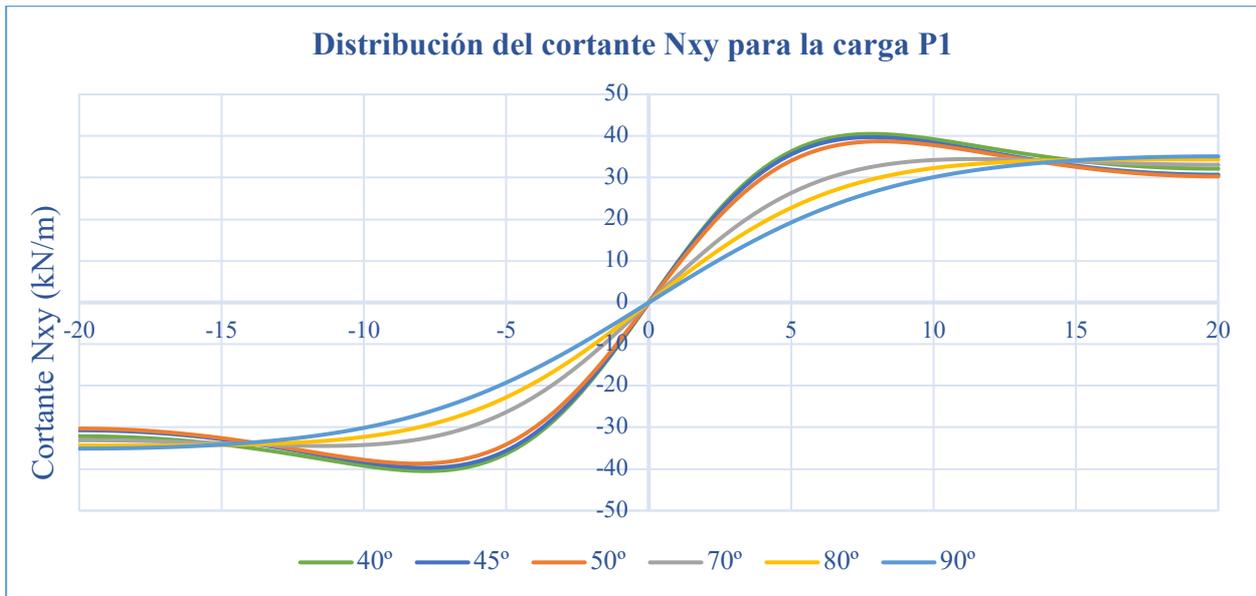
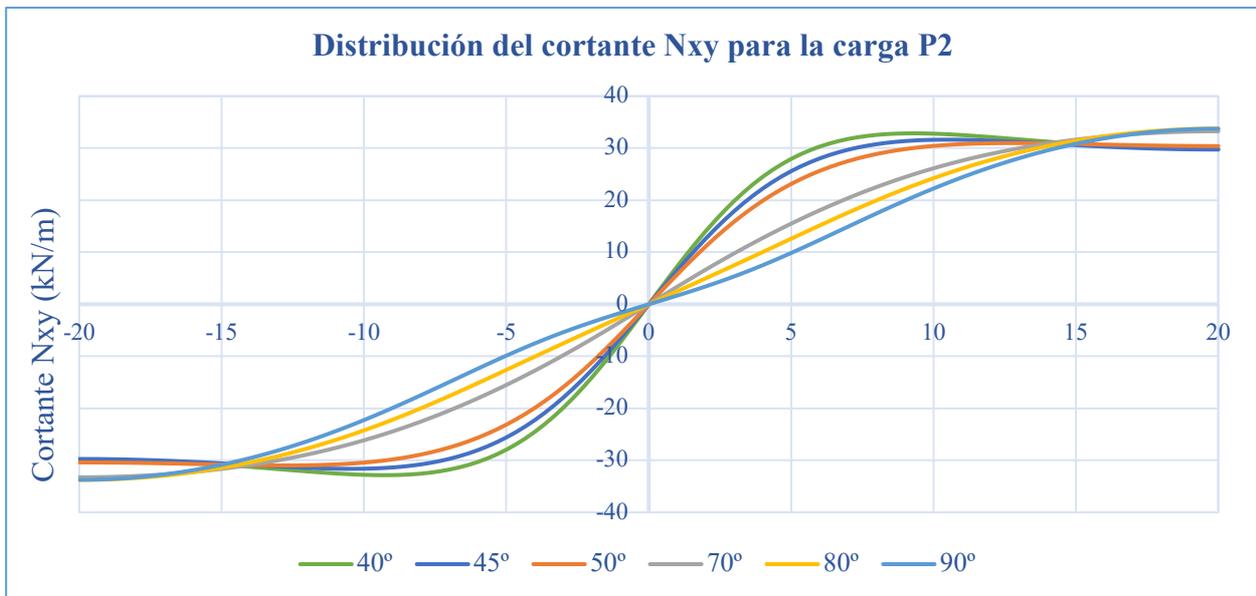


Figura 112. Distribución del esfuerzo axial N_y según la posición de la carga para una inclinación de 40°

Se aprecia una gran diferencia entre las gráficas del axil N_y , al variar la inclinación de las almas, hasta el punto en el que para algunos casos, se produce cambio de signo al disminuir dicho parámetro geométrico.

El caso de carga que más se ve influenciado por la inclinación es P2. Para una inclinación de 90°, el axil N_y tiene signo positivo desde el extremo hasta aproximadamente un tercio de la luz, a partir del cual su signo pasa a ser negativo, y alcanza su máximo en el centro de la luz. Sin embargo, a medida que va disminuyendo la inclinación de las almas, el signo de los esfuerzos se invierte.

Teniendo en cuenta la influencia de la carga, se observa que, cuando la carga está aplicada en el extremo de la sección transversal (P1), el valor máximo se da en el centro de la sección (esfuerzo positivo). Sin embargo, a medida que la carga se va acercando al centro, este esfuerzo positivo va disminuyendo, hasta pasar a ser negativo. Por lo que, mientras que para los casos de carga P1 y P2 el esfuerzo máximo es positivo, para el resto de los casos de carga, el valor máximo es negativo. Lo que sí permanece constante es que este valor máximo se da en el centro de la sección para todos los modelos.

Figura 113. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P1Figura 114. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P2

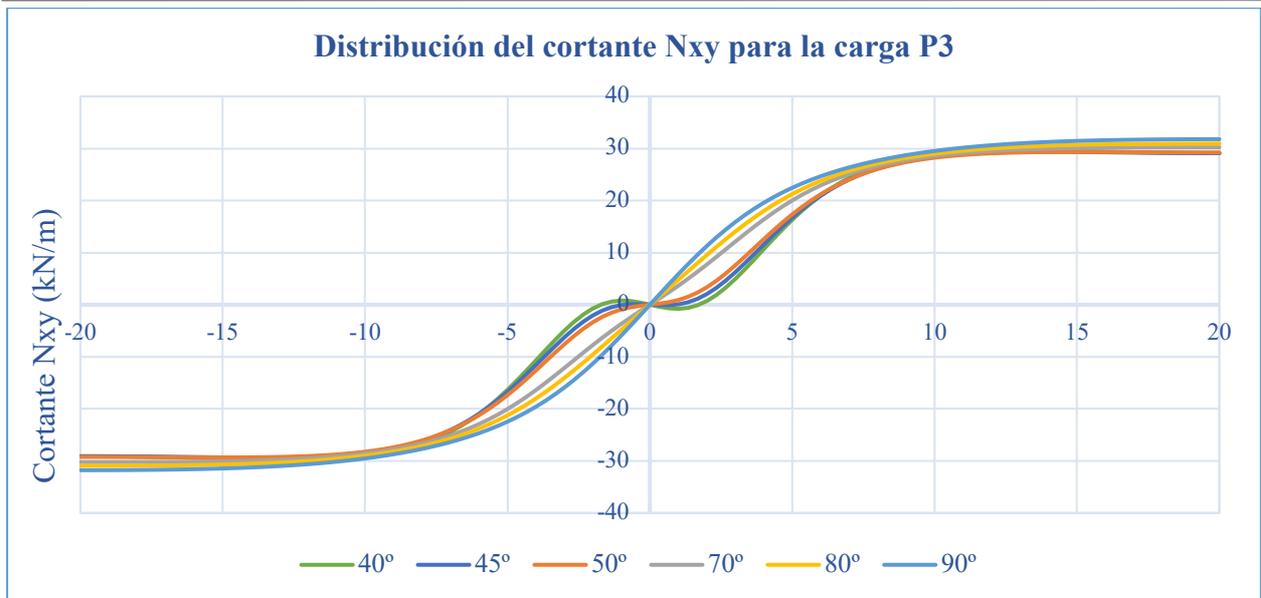


Figura 115. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P3

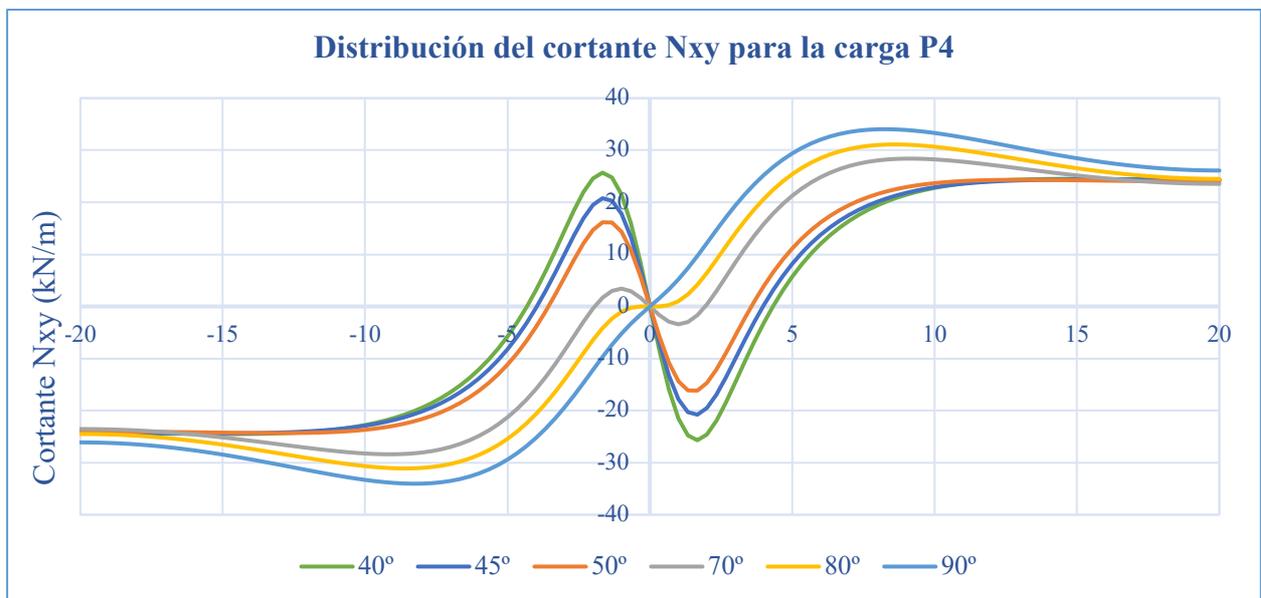


Figura 116. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P4

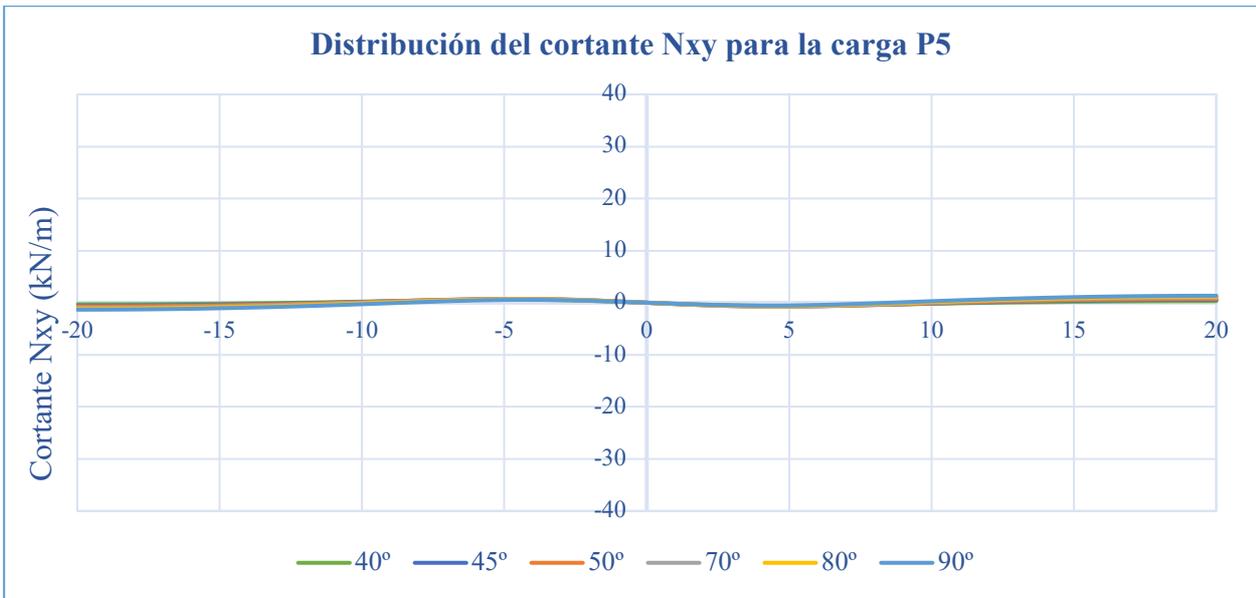


Figura 117. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la inclinación de las almas para P5

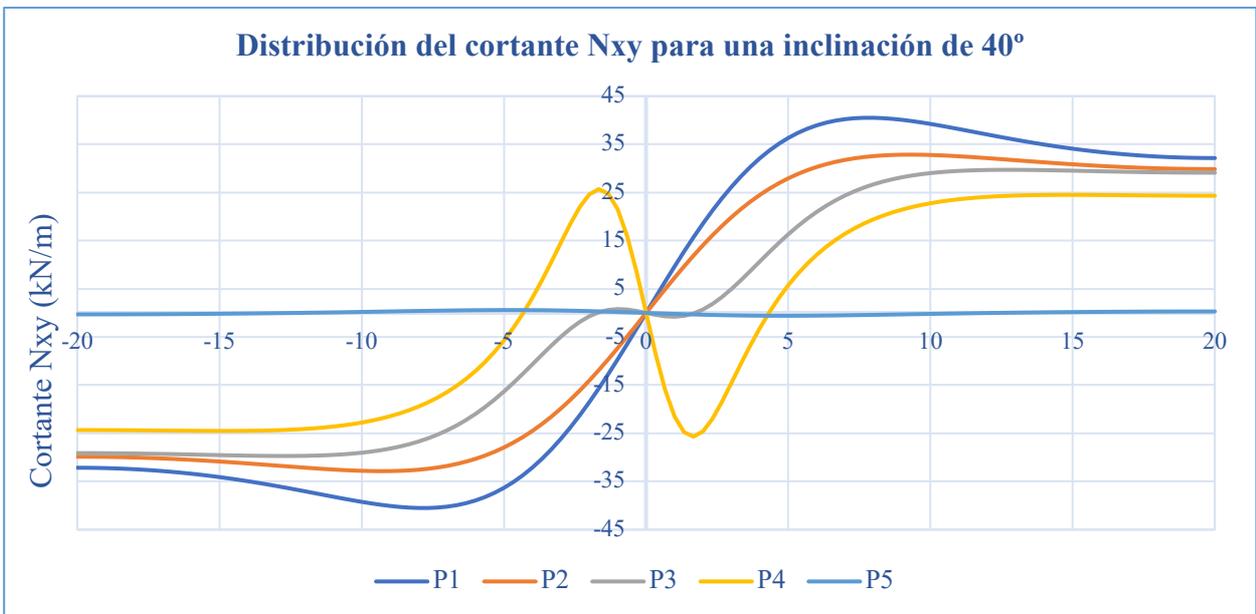


Figura 118. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la posición de la carga para una inclinación de 40°

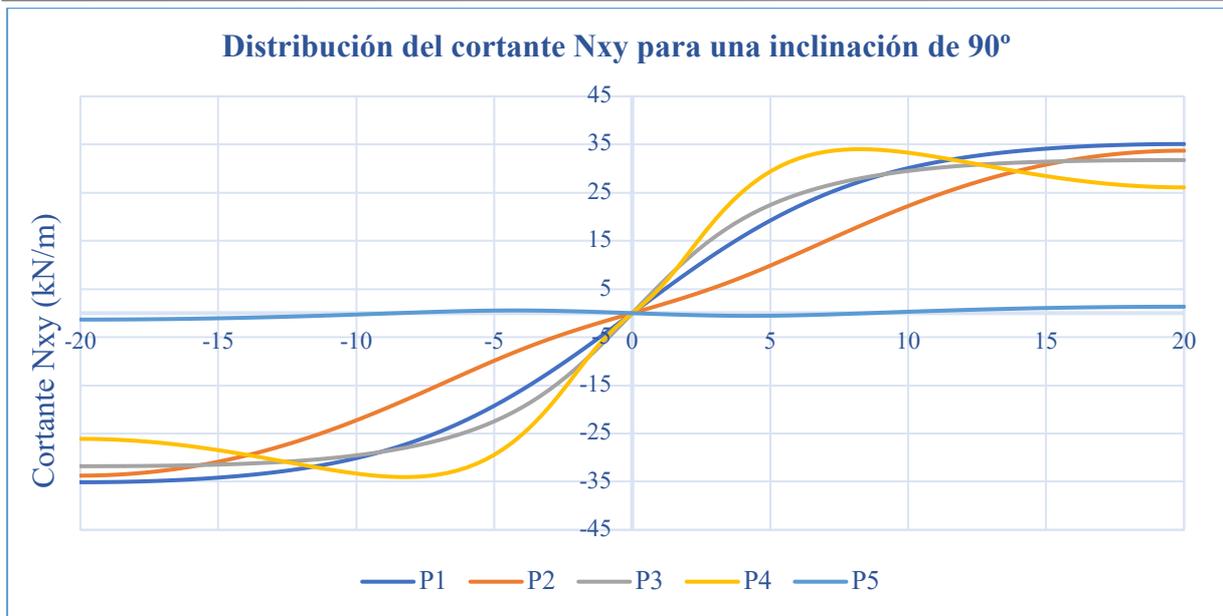


Figura 119. Distribución del esfuerzo cortante N_{xy} según la posición de la carga para una inclinación de 90°

En primer lugar, cabe destacar que el cortante N_{xy} es nulo en el centro de la sección longitudinal del puente para todos los casos.

Analizando las gráficas, se observa que para los dos primeros casos de carga, donde la carga está más alejada del centro, para el modelo de D. Javier Manterola (inclinación de 90°) el valor del cortante máximo se da en el extremo. Sin embargo, conforme va disminuyendo la inclinación de las almas, el valor máximo se va acercando al centro de la sección, hasta llegar a aproximadamente un tercio de la luz, para la inclinación de 40° .

No obstante, esto no se cumple para todos los casos de carga, pues para P3 el valor máximo siempre se encuentra en el extremo y para P4 ocurre al contrario, para las almas de 90° los esfuerzos máximos se dan en puntos intermedios y para cuando las almas se inclinan 40° , el máximo está en los extremos.

Al igual que para el caso I de variación de la luz, los esfuerzos N_{xy} cuando la carga está situada en el centro deberían ser nulos.

4.2.2.4 Tensiones

En este apartado, se muestran las gráficas de cómo evolucionan las tensiones cuando se varía la inclinación de las almas. Se han representado las tensiones de los modelos de 40° , 45° , 50° , 70° y 90° para los cinco casos de carga.

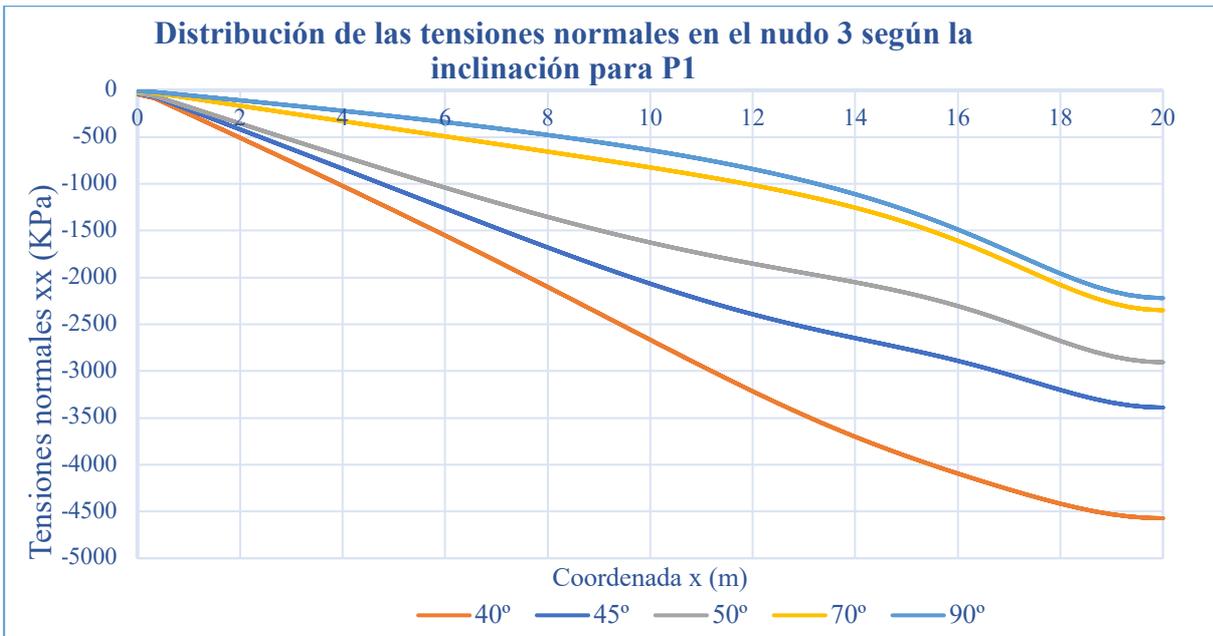


Figura 120. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P1

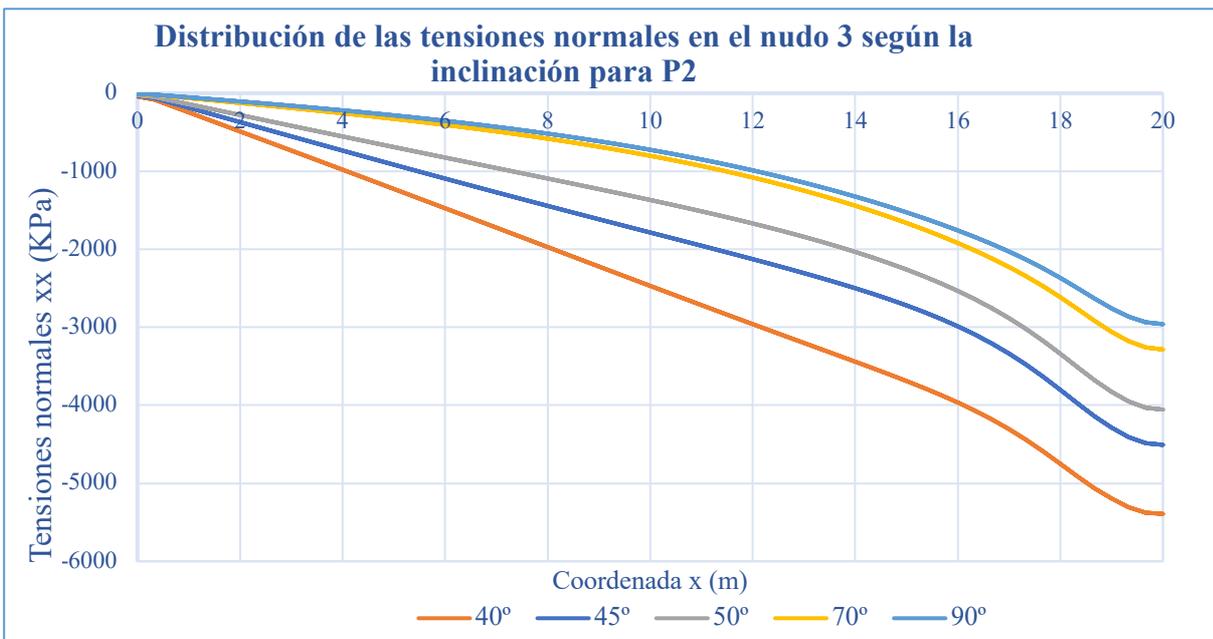


Figura 121. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P2

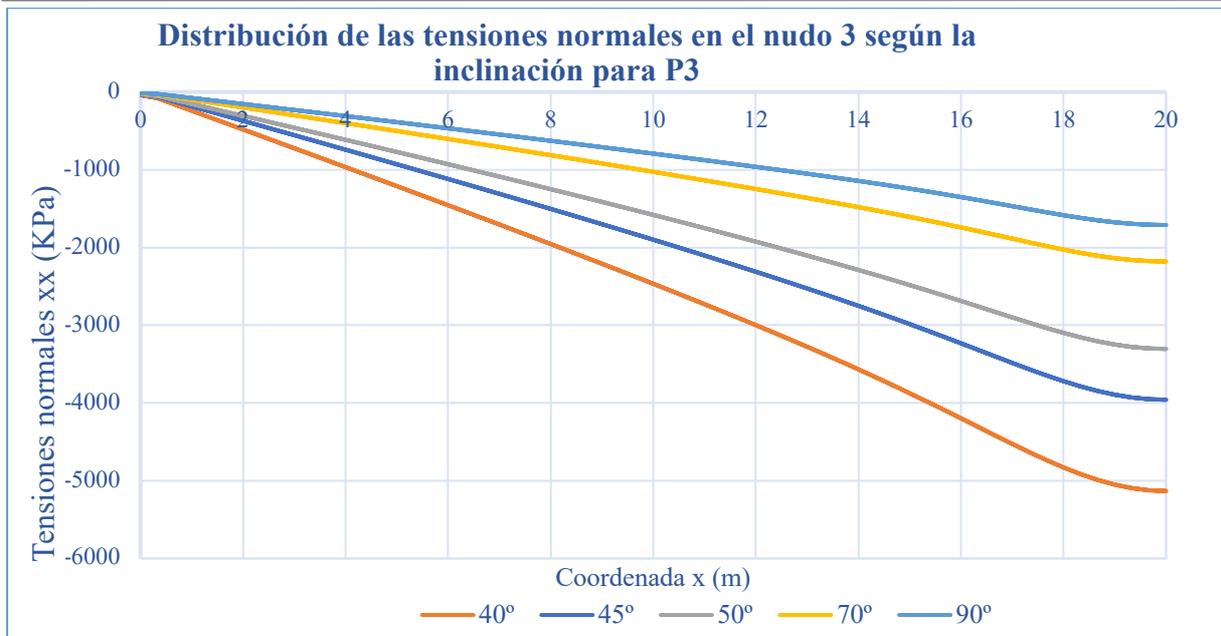


Figura 122. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P3

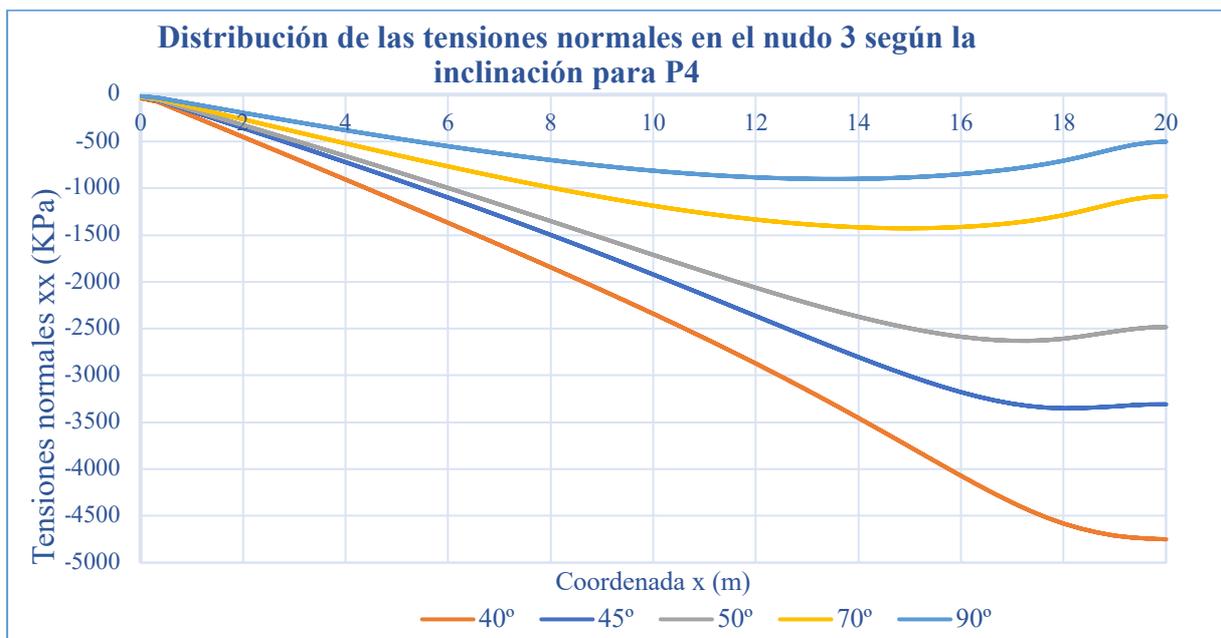


Figura 123. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P4

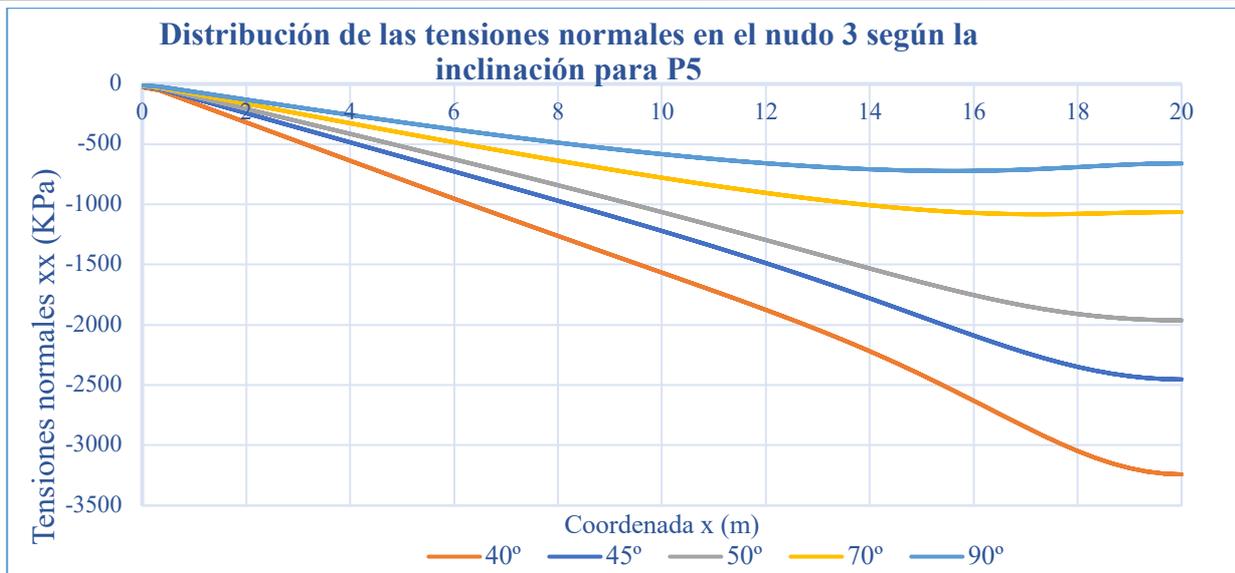


Figura 124. Distribución de las tensiones normales según la inclinación para P5

Para los cinco casos de carga, se obtienen representaciones de la distribución de las tensiones similares. El valor máximo siempre se da en la sección central, a excepción de los modelos con inclinaciones superiores a 70° para los casos de carga P4 y P5, donde la tensión máxima se da en la sección x=15 m aproximadamente. Además, estos valores aumentan a medida que se disminuye la inclinación de las almas.

A continuación, se representan las tensiones normales de las secciones transversales del centro del puente para los valores extremos de la inclinación de las almas, es decir, para 40° y 90° (ya representados anteriormente), ya que la distribución es siempre la misma y lo único que cambian son los valores.

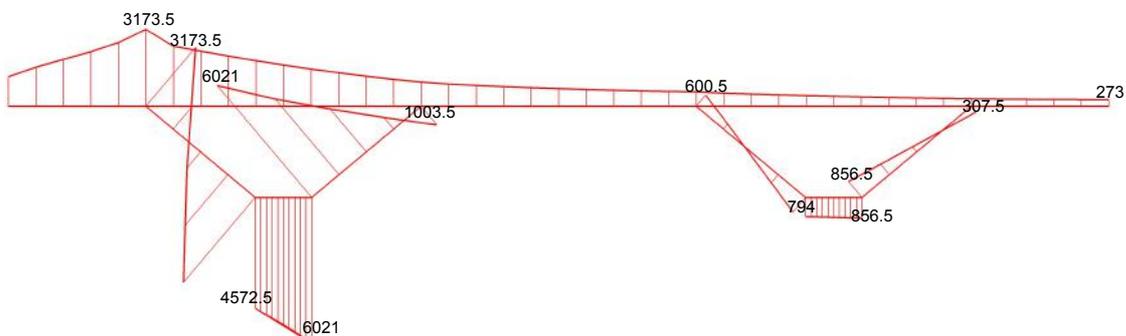


Figura 125. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P1, del modelo de 40° de inclinación



Figura 126. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P2, del modelo de 40° de inclinación

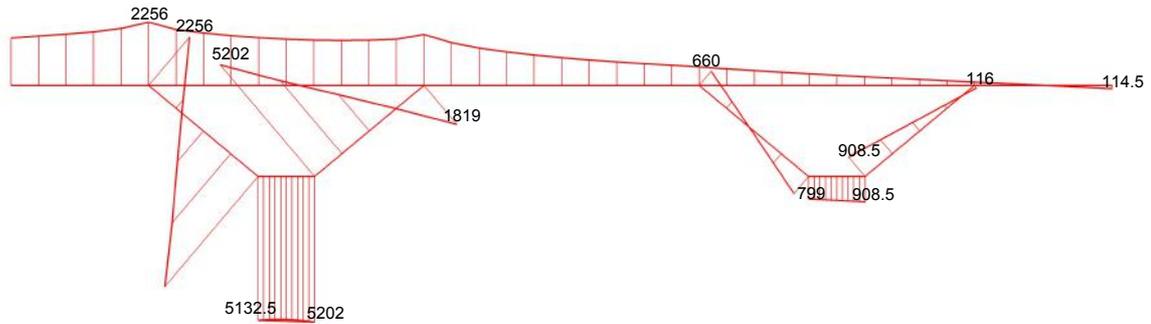


Figura 127. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P3, del modelo de 40° de inclinación

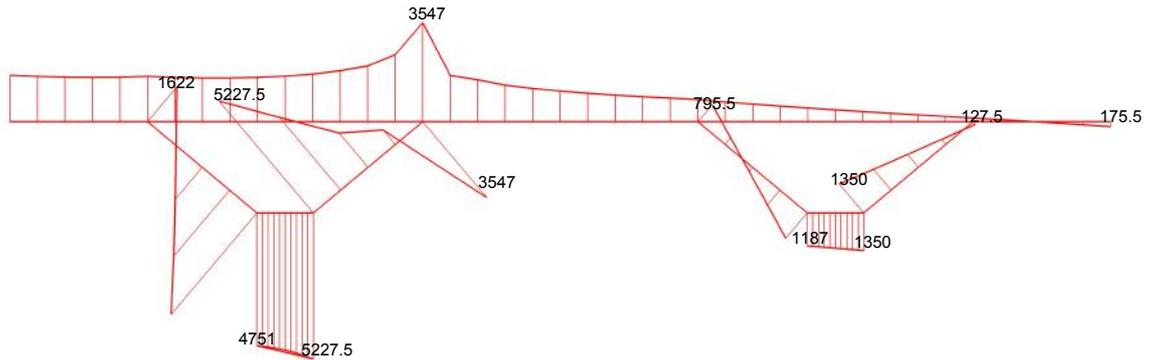


Figura 128. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 40° de inclinación

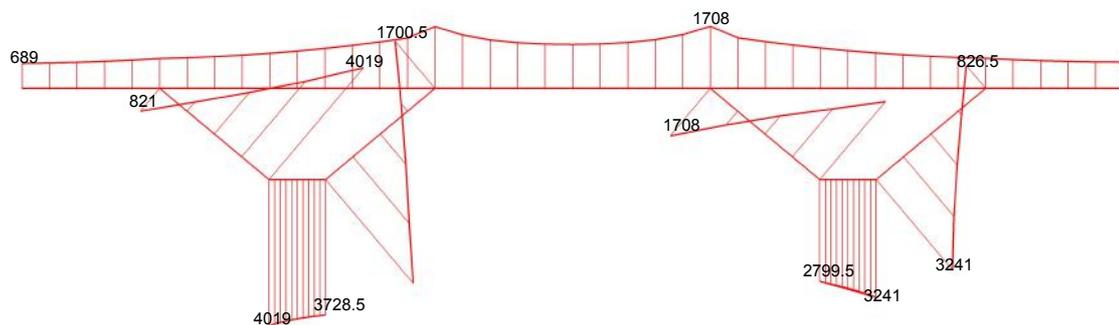


Figura 129. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 40° de inclinación

4.3 Caso 3: Variación del ancho de los cajones

4.3.1 Descripción del modelo

Para el estudio del comportamiento del puente al variar el ancho de los cajones se han realizado siete modelos, cambiando la anchura de los cajones desde los 2 metros hasta los 8, incrementándose cada vez 1 metro. Para este caso, la longitud del tablero se ve afectada, ya que la distancia de separación de cajones se ha mantenido constante.

Siempre tomando como referencia el modelo de D. Javier Manterola, que corresponde con el ancho de 6 metros.

4.3.2 Respuesta ante cargas puntuales

4.3.2.1 Desplazamientos

En las siguientes imágenes se muestran los desplazamientos para los modelos de 2, 4, 6 y 8 metros de ancho de los cajones cuando se le aplica una carga en el nudo 2 (P2).

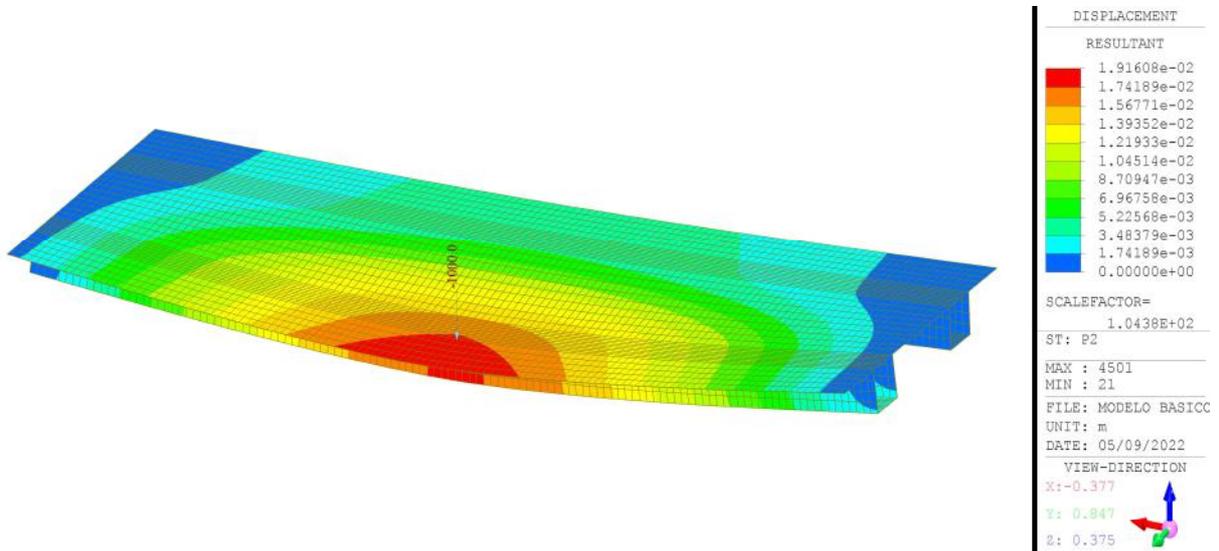


Figura 130. Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de ancho de cajones para la carga P2

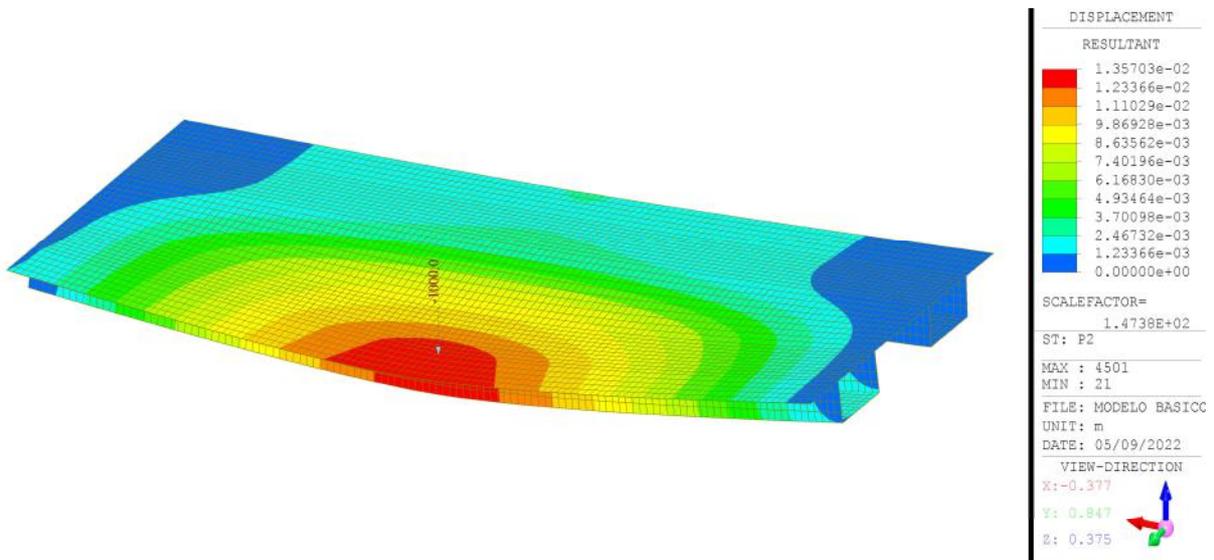


Figura 131. Desplazamientos (m) del modelo de 4 metros de ancho de cajones para la carga P2

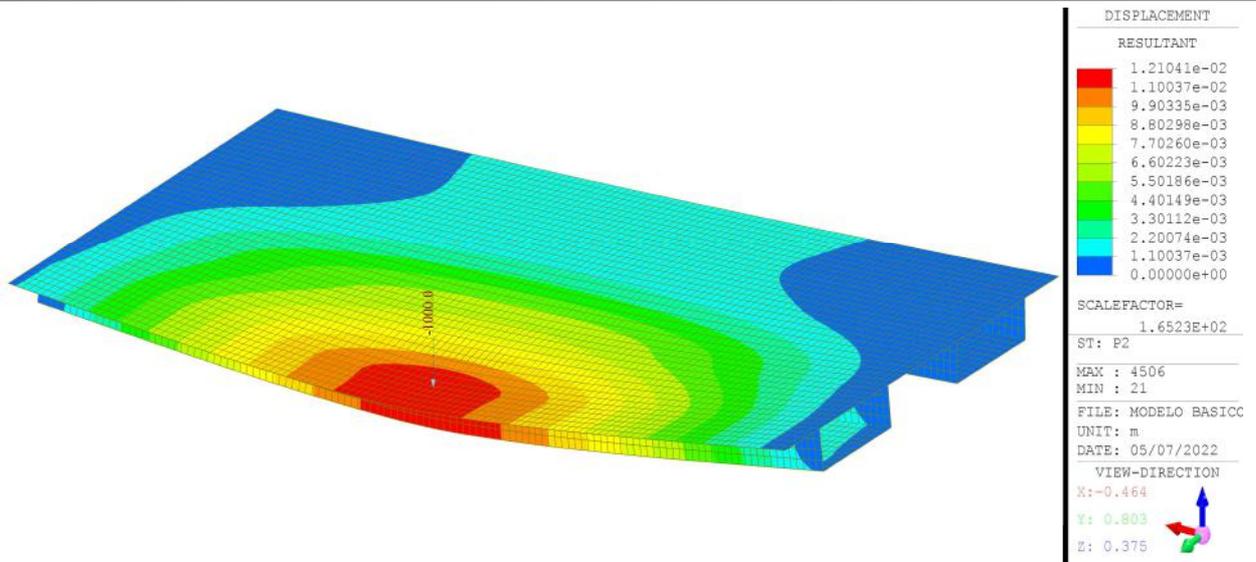


Figura 132. Desplazamientos (m) del modelo de 6 metros de ancho de cajones para la carga P2

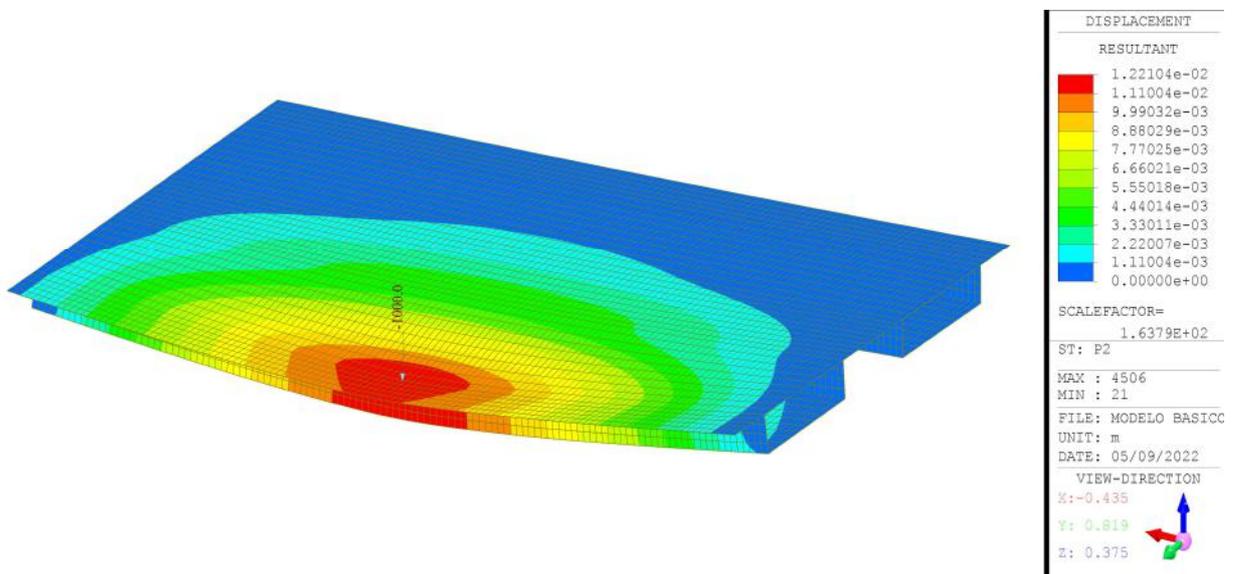


Figura 133. Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de ancho de cajones para la carga P2

Para este caso de carga en concreto, se observa que a medida que va aumentando el ancho de cajones, tanto la zona de influencia de la carga como el desplazamiento vertical van disminuyendo. Sin embargo, esto se cumple hasta que alcanza los 6 m, a partir de los cuales la flecha comienza a ascender de nuevo, como ocurre en la figura 133.

A continuación, se muestran los desplazamientos para los modelos de 2, 4, 6 y 8 metros de ancho de los cajones cuando se le aplica una carga en el nudo 4 (P3).

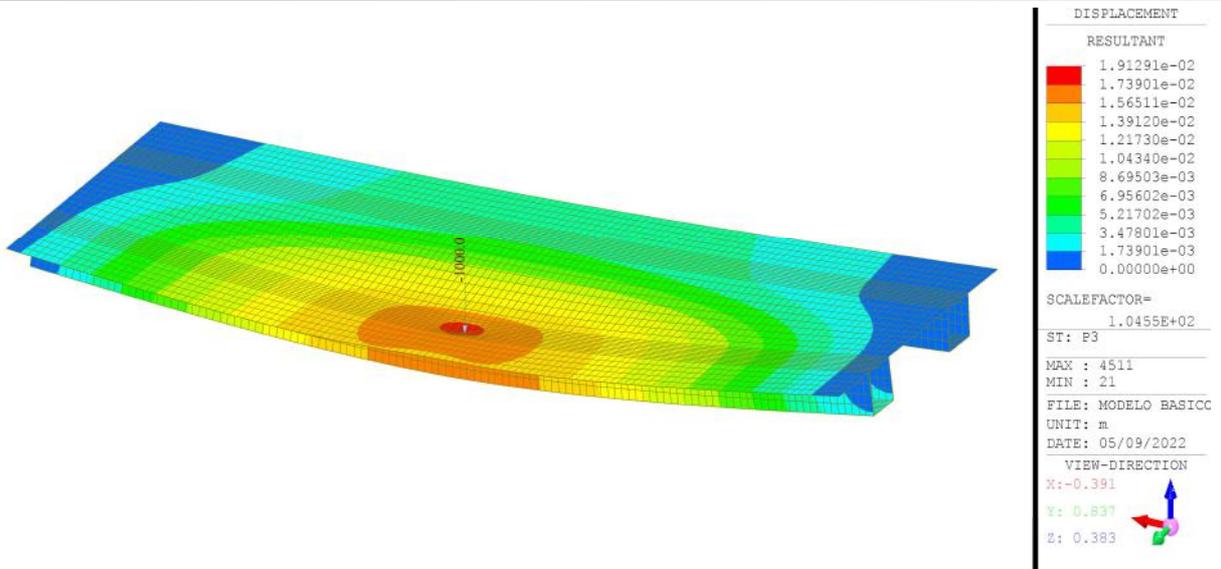


Figura 134. Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de ancho de cajones para la carga P3

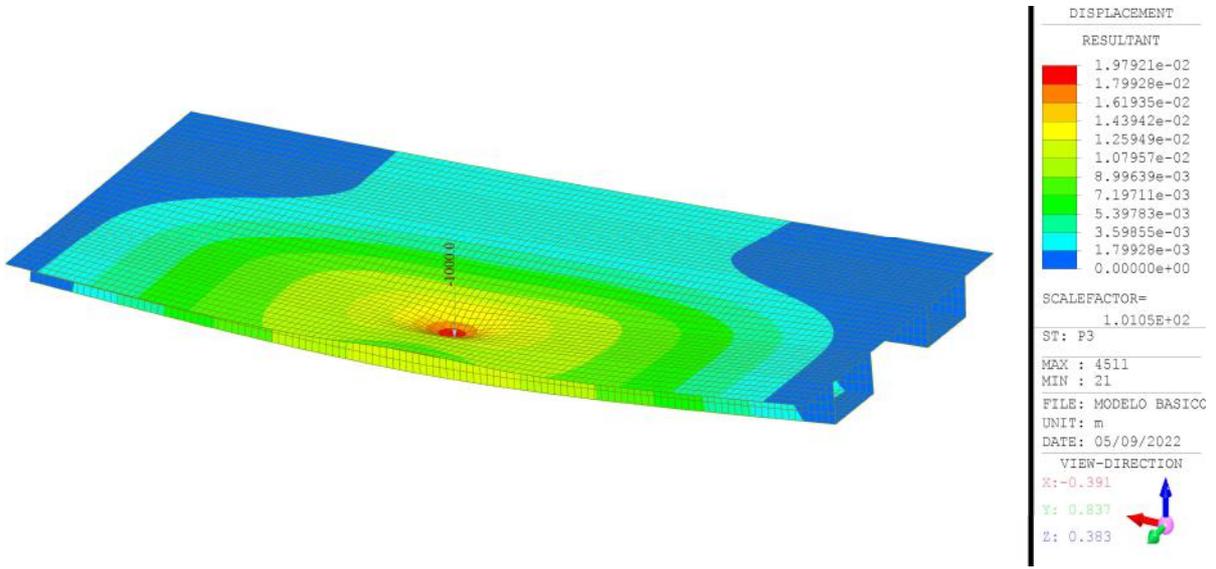


Figura 135. Desplazamientos (m) del modelo de 4 metros de ancho de cajones para la carga P3

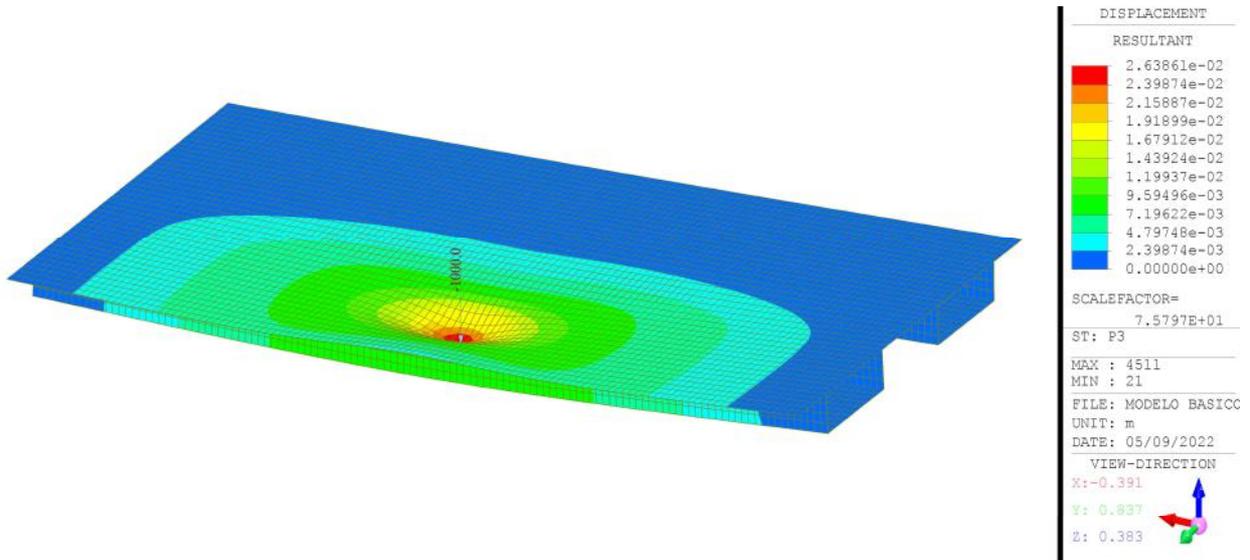


Figura 136. Desplazamientos (m) del modelo de 6 metros de ancho de cajones para la carga P3

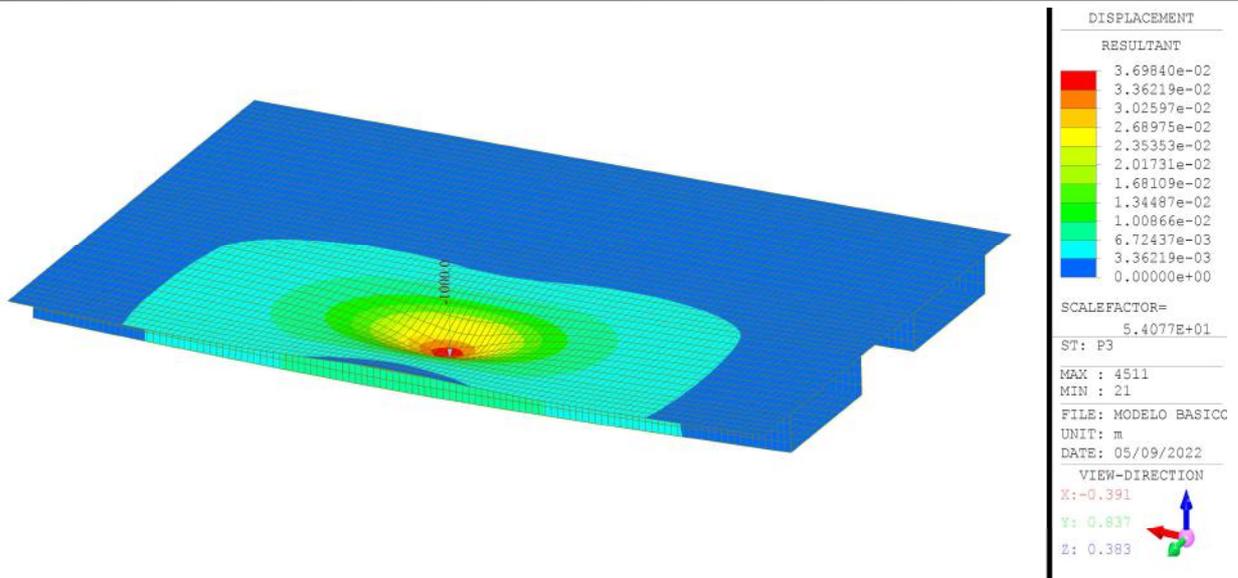


Figura 137. Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de ancho de cajones para la carga P3

Al contrario que en el anterior, para este caso de carga, cuando aumenta el ancho de los cajones aumenta el desplazamiento en la zona de influencia de la carga.

Como se ha indicado en el capítulo 2, las posiciones de carga más favorables son aquellas del tablero que coinciden con el alma de los cajones. Por tanto, cuanto más se aleje la posición de la carga de este punto, mayores serán los desplazamientos. Esto supone que, al aumentar el ancho de los cajones, como la carga se mantiene aplicada sobre el nudo 4, cada vez está más alejada del alma y, es por ello, que la flecha aumenta.

Recopilando estos datos para todos los casos de carga, se obtienen las siguientes gráficas:

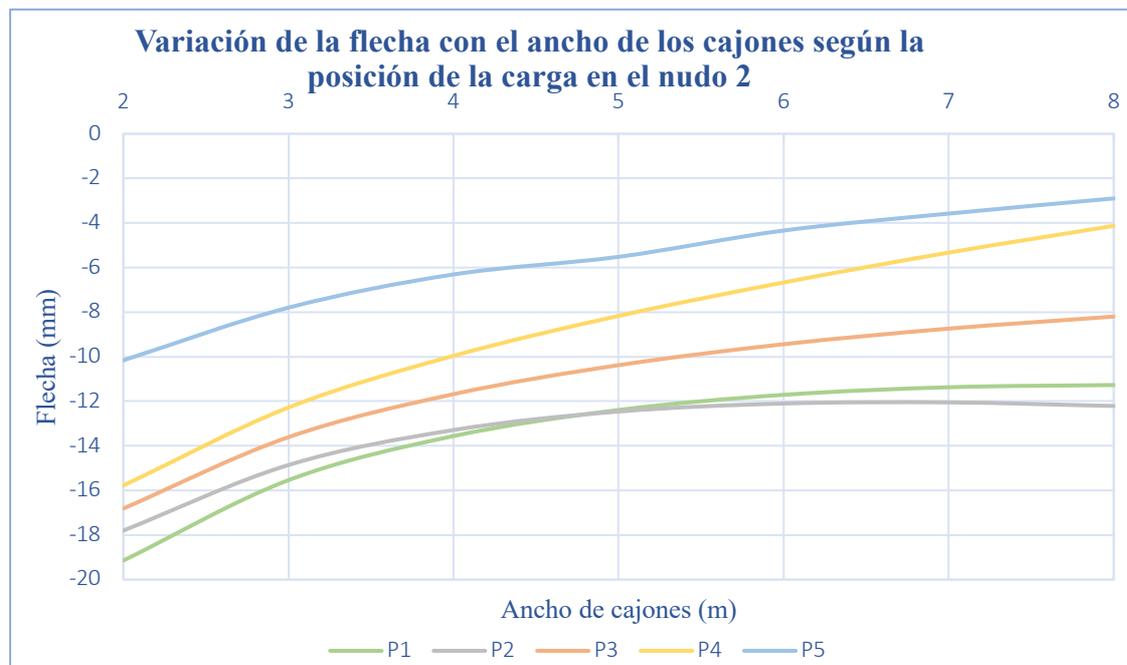


Figura 138. Variación de la flecha con el ancho entre cajones según la posición de la carga en el nudo 2

De esta gráfica se confirma que, para los casos de carga P1 (nudo 1) y P2 (nudo 2), en el nudo 2 (que pertenece

al cajón izquierdo) a partir de los 6 metros y medio la curva cambia de pendiente y la flecha comienza a aumentar. Pero para el resto de los casos, siempre que aumente el ancho de los cajones, aumentará el desplazamiento vertical.

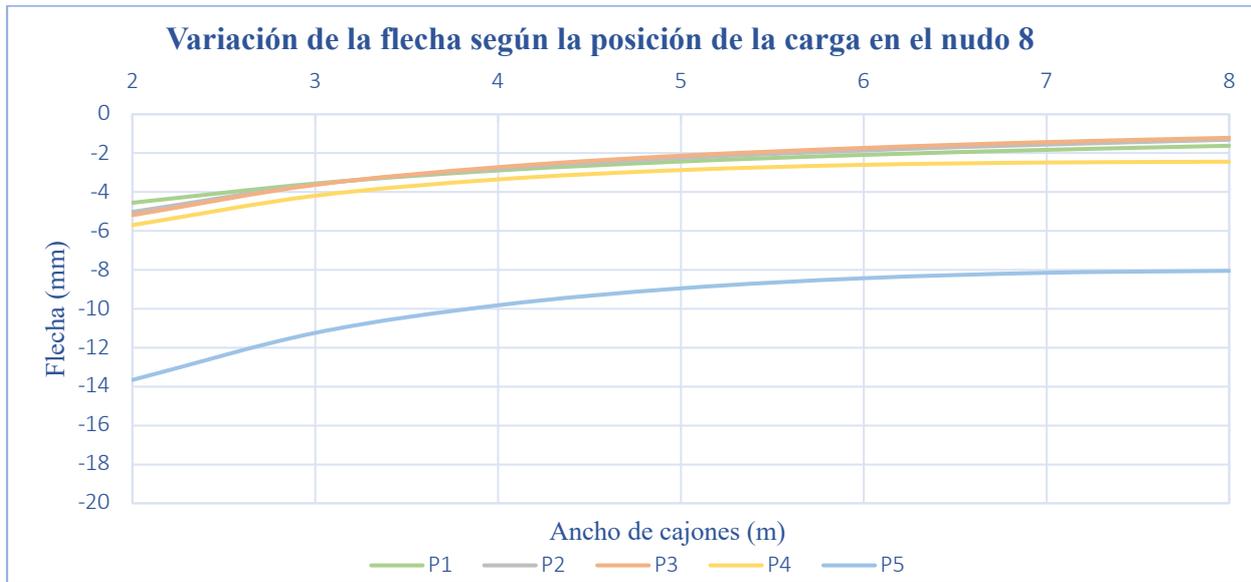


Figura 139. Variación de la flecha con el ancho entre cajones según la posición de la carga en el nudo 8

Al estudiar el comportamiento en el nudo 8 (que pertenece al cajón derecho) se puede observar, que para todos los casos, los desplazamientos son menores que los del cajón izquierdo (cajón cargado), a excepción del quinto caso de carga. Para este quinto caso, al estar el nudo 8 más cerca del punto de aplicación de carga, tiene desplazamientos mayores.

Si se representan las flechas máximas de cada uno de los modelos estudiados para este caso, se obtiene una gráfica como la de la figura 140. Los casos de carga P1, P2, P4 y P5 son similares, la flecha disminuye conforme aumenta el ancho de los cajones. Sin embargo, como ya se ha explicado anteriormente, para P3, la flecha aumenta a medida que aumenta el ancho.

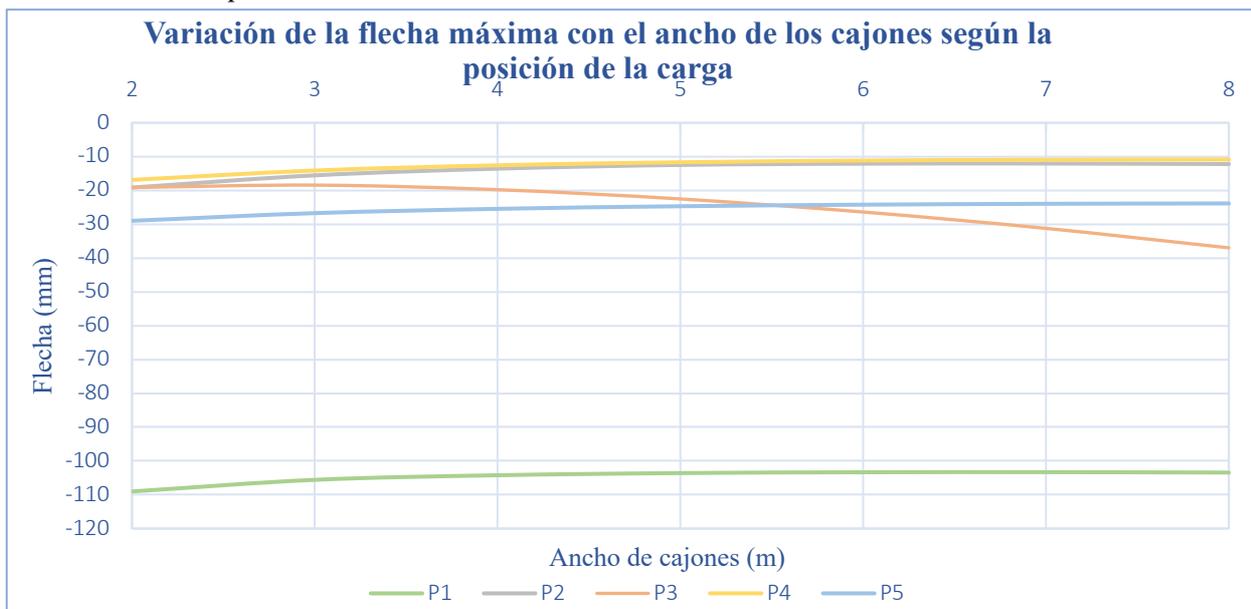


Figura 140. Variación de la flecha máxima con el ancho entre cajones según la posición de la carga

4.3.2.2 Distorsión

De la misma forma que se ha procedido en los casos anteriores, se calcula la distorsión de ambos cajones para

la sección central.

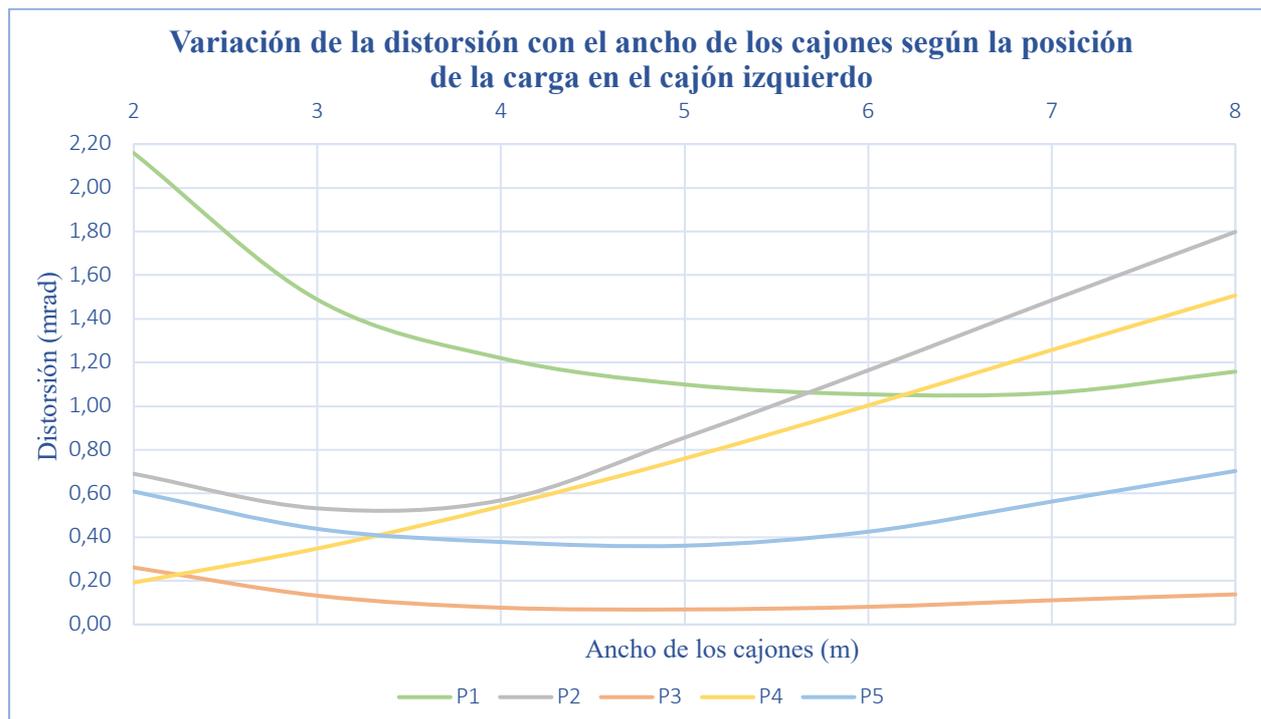


Figura 141. Variación de la distorsión con el ancho de cajones en el cajón izquierdo

A partir de esta gráfica se puede llegar a varias conclusiones.

En primer lugar, se aprecia como, para un ancho de 2 metros, la distorsión máxima se da cuando la carga está situada en el extremo (P1). Sin embargo, a medida que va aumentando el ancho de los cajones, el valor máximo de la distorsión lo alcanza la carga P2 (situada sobre el alma izquierda del cajón izquierdo).

Además, se puede observar como la carga P5 (situada en el centro de la sección) provoca distorsión. Esto resulta de interés porque, al compararlo con el modelo de un tablero de una viga cajón con una carga en el centro de la sección, la distorsión es nula.

Para el primer caso de carga, al estar situada en el extremo, la distorsión se debe en mayor medida a la torsión producida y, por tanto, cuando aumenta el ancho, aumenta la rigidez a torsión y la distorsión del cajón disminuye.

Para el segundo y cuarto caso de carga, la distorsión se ve más afectada por la flexibilidad de las barras y, como al aumentar el ancho, esta aumenta, la distorsión aumenta.

Para los casos de carga tercero y quinto, tanto la rigidez a torsión como la flexibilidad de las barras intervienen en gran medida en la distorsión. Cuando aumenta el ancho, la rigidez a torsión aumenta y provoca una disminución en la distorsión y la flexibilidad de las barras aumenta y provoca un aumento en la distorsión. Es por esto por lo que, ambas curvas permanecen prácticamente constantes.

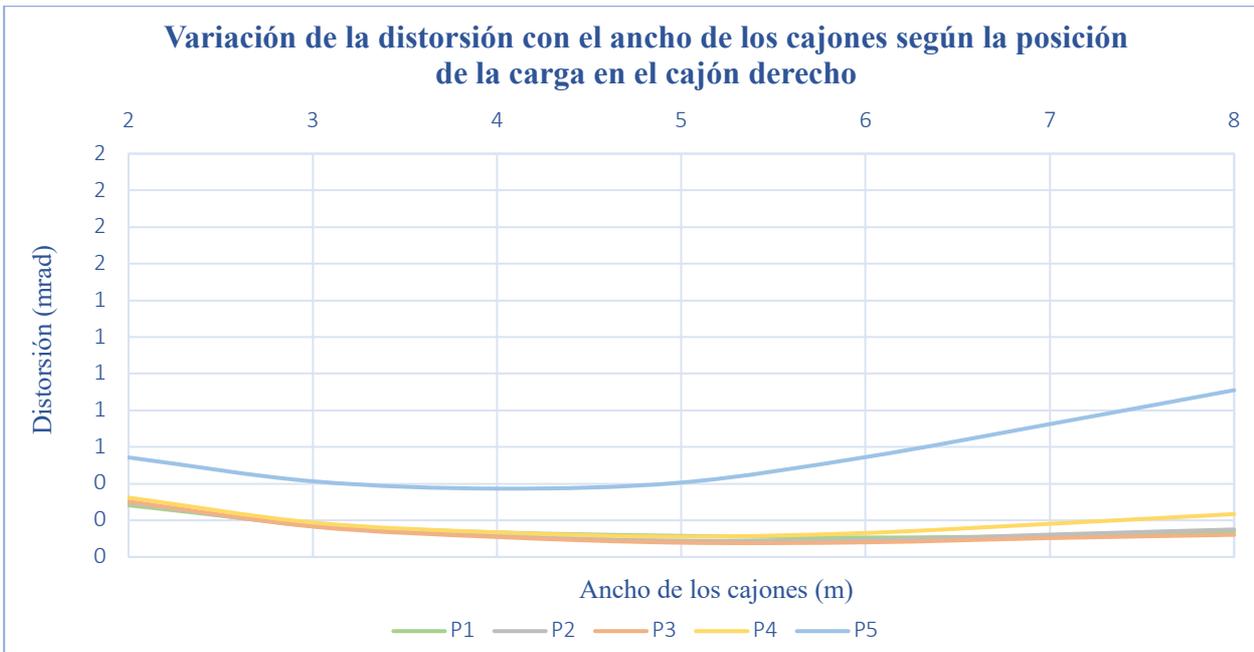


Figura 142. Variación de la distorsión con el ancho de cajones en el cajón derecho

Por último, se puede observar como la distorsión en el cajón izquierdo es mayor que en el cajón derecho. Esto tiene lógica ya que es el cajón que se encuentra cargado.

4.3.2.3 Esfuerzos

En este apartado, se procede a estudiar los esfuerzos para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de ancho de los cajones para las distintas posiciones de la carga puntual.

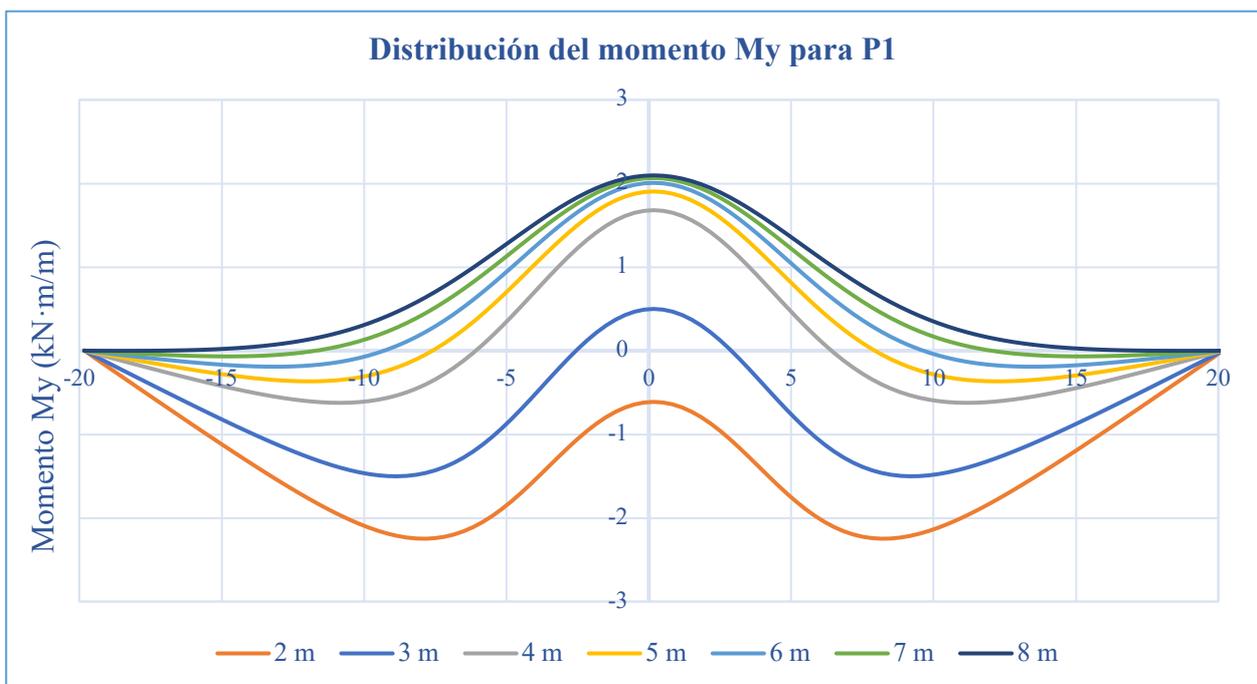


Figura 143. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P1

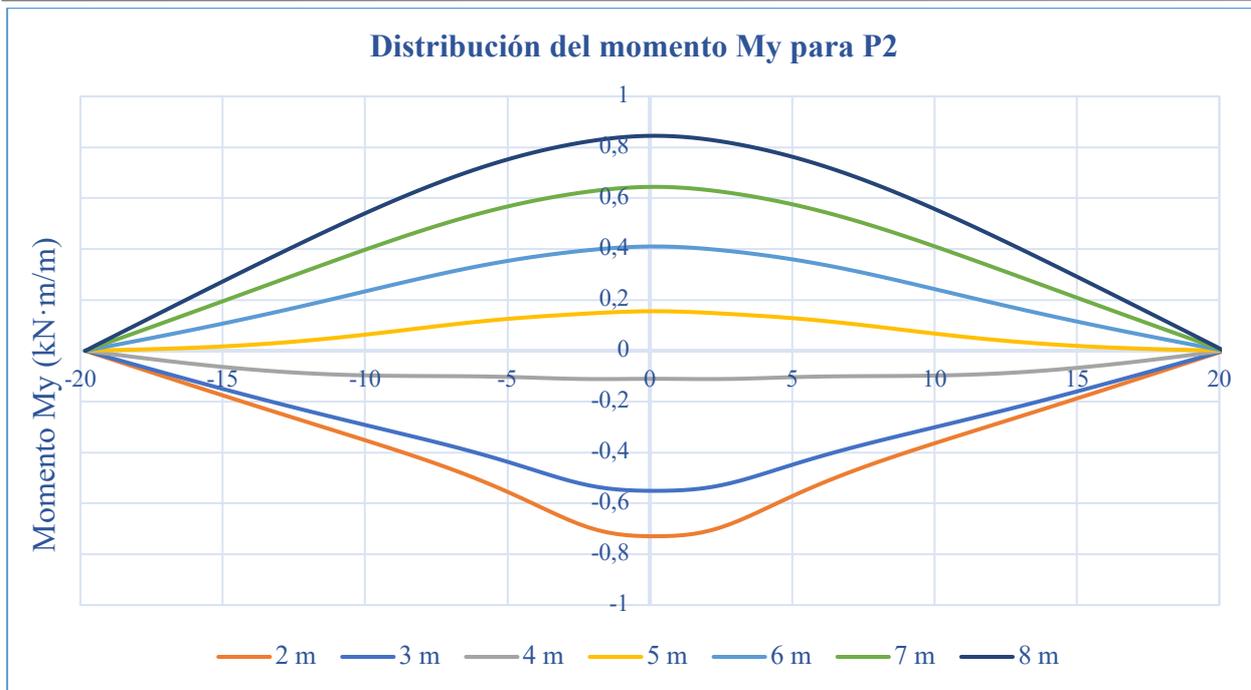


Figura 144. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P2

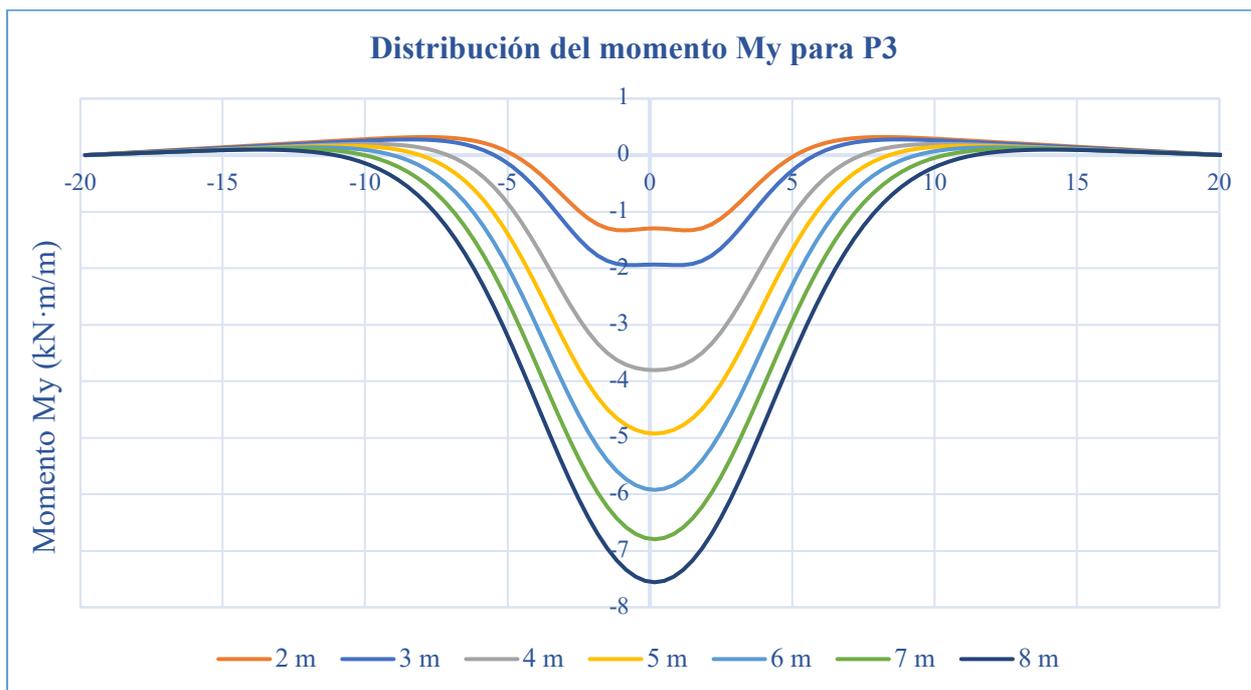


Figura 145. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P3

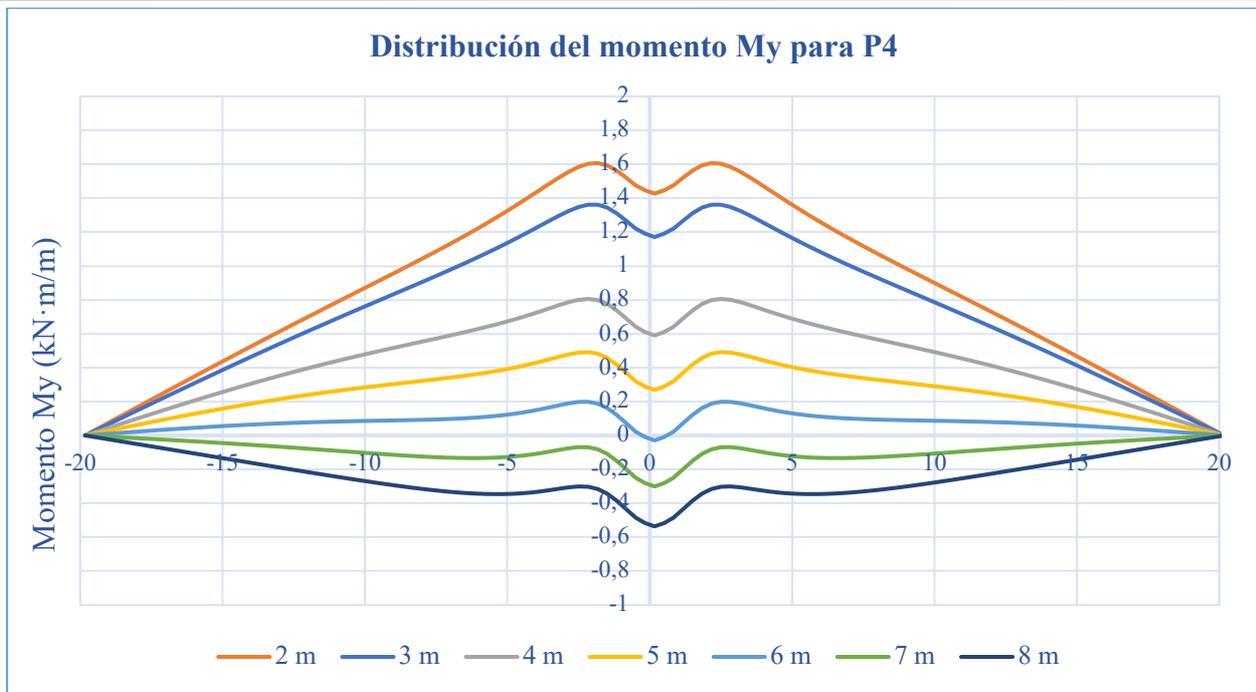


Figura 146. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P4

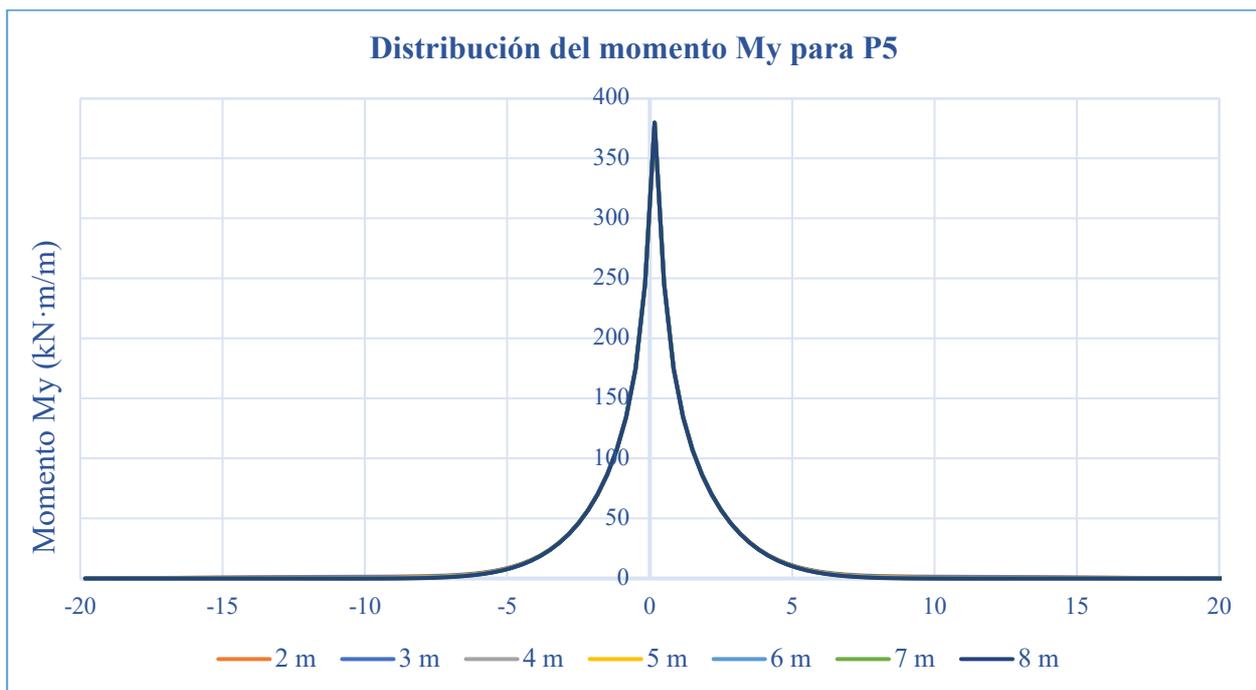


Figura 147. Distribución del momento M_y al variar el ancho de los cajones para P5

Para cada caso de carga, se observan comportamientos diferentes. Para los dos primeros (P1 y P2) cuando el ancho de los cajones es pequeño, los momentos son negativos, mientras que cuando esta medida aumenta, los momentos pasan a ser positivos.

Para el tercer caso de carga, todos los momentos son negativos y van aumentando su valor a medida que aumenta el ancho de los cajones. Esto se debe a que, al aumentar el ancho, el punto de aplicación de la carga se aleja cada vez más de las almas, que le sirven de apoyo y, por tanto, los momentos aumentan,

En el cuarto caso de carga ocurre al revés que en los primeros, cuando el ancho de los cajones es pequeño, los momentos flectores son positivos y cuando el ancho es más grande, los momentos son negativos.

Para el último caso de carga (P5) de nuevo se aprecia el efecto local de la carga, al estudiar la misma sección en la que se ha aplicado esta carga. Por tanto, los momentos flectores son mayores que los del resto de cargas y su cuantía es prácticamente independiente de la luz del puente.

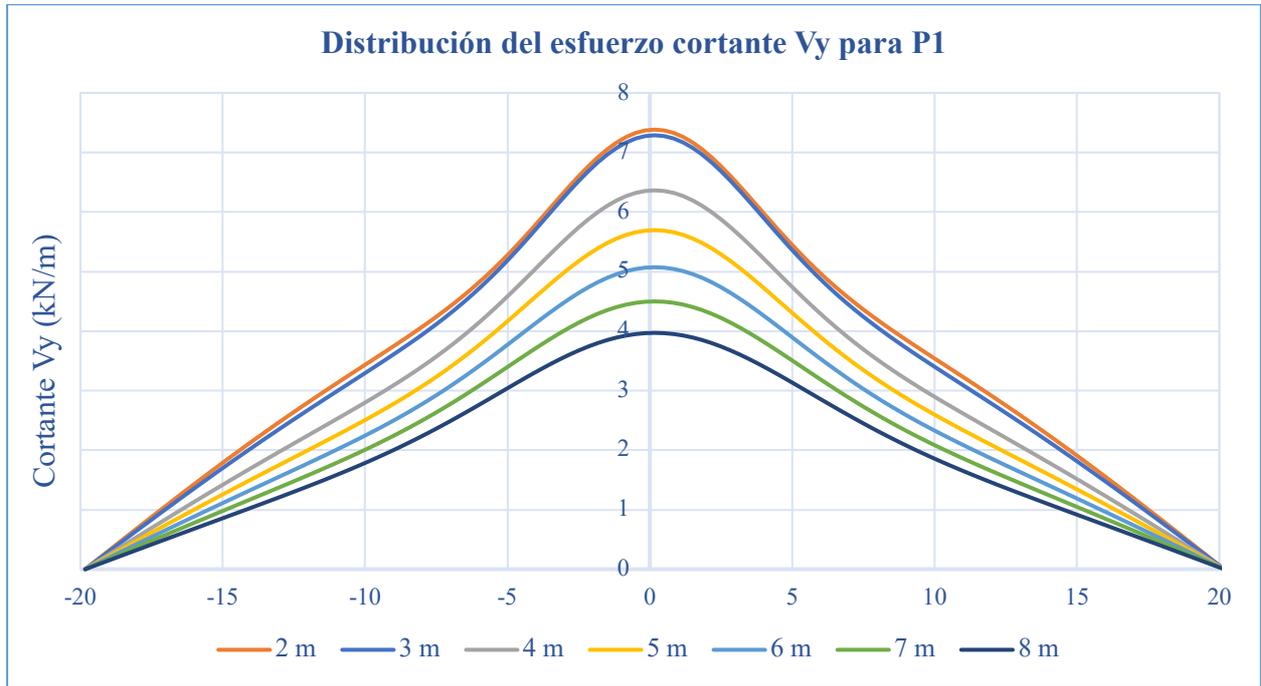


Figura 148. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P1

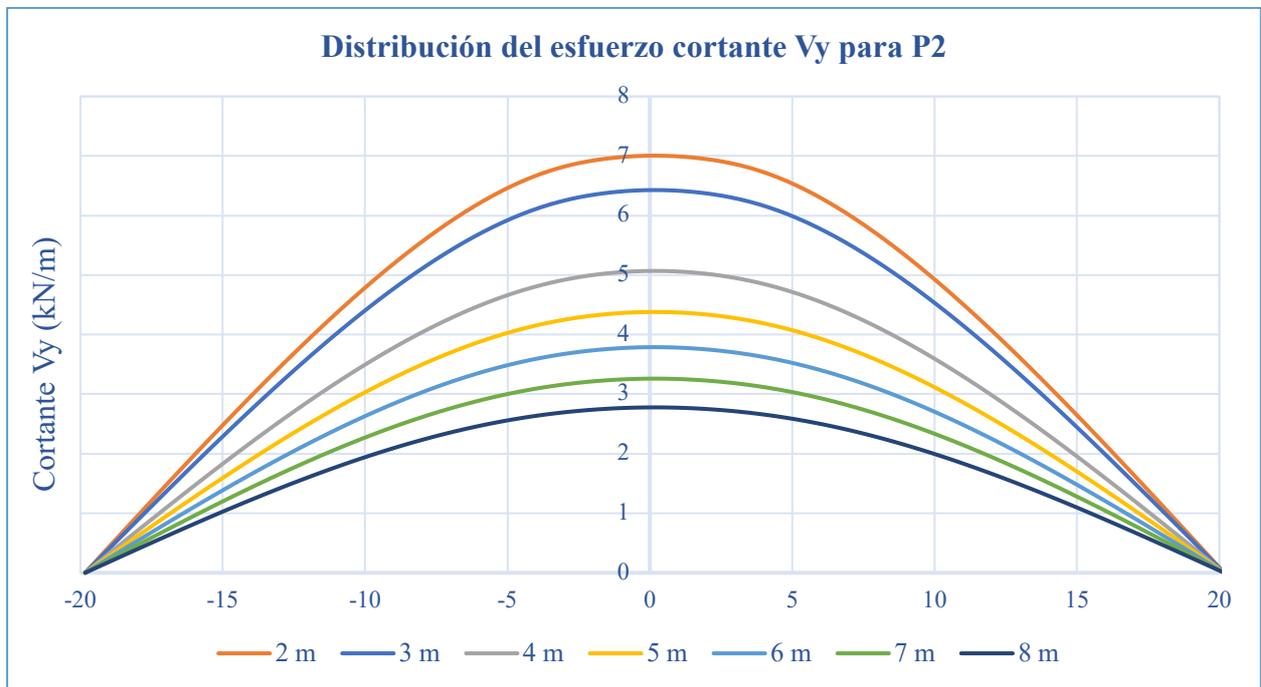


Figura 149. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P2

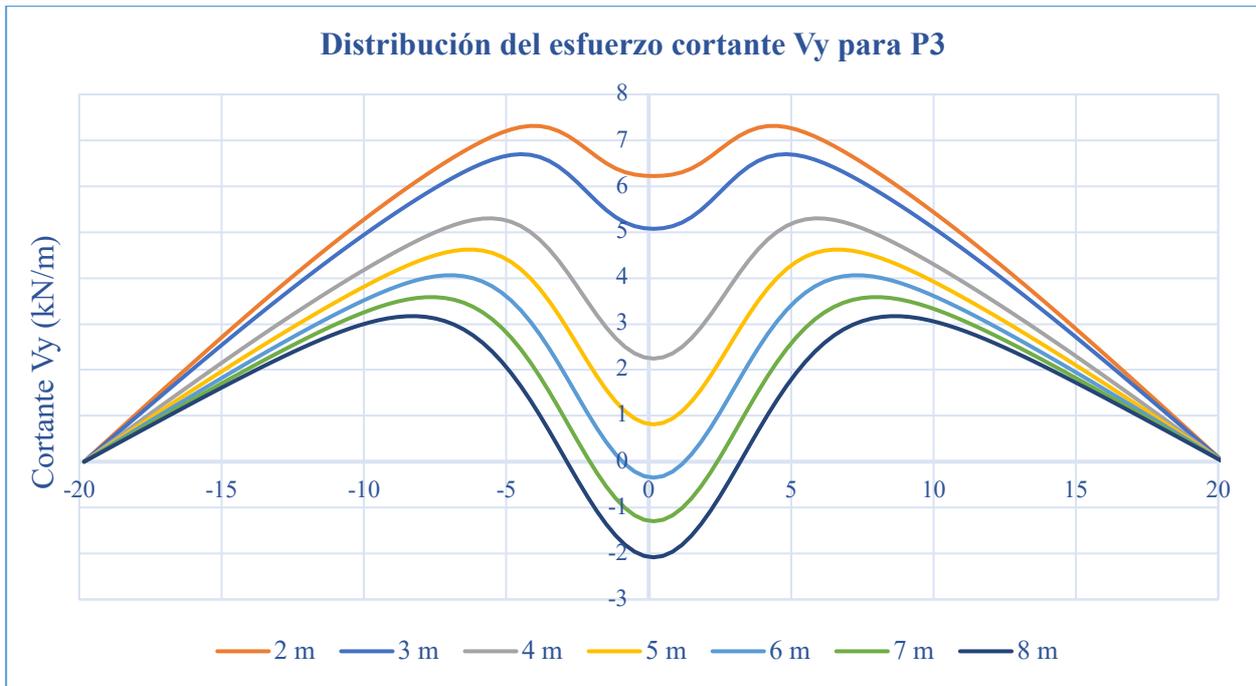


Figura 150. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P3

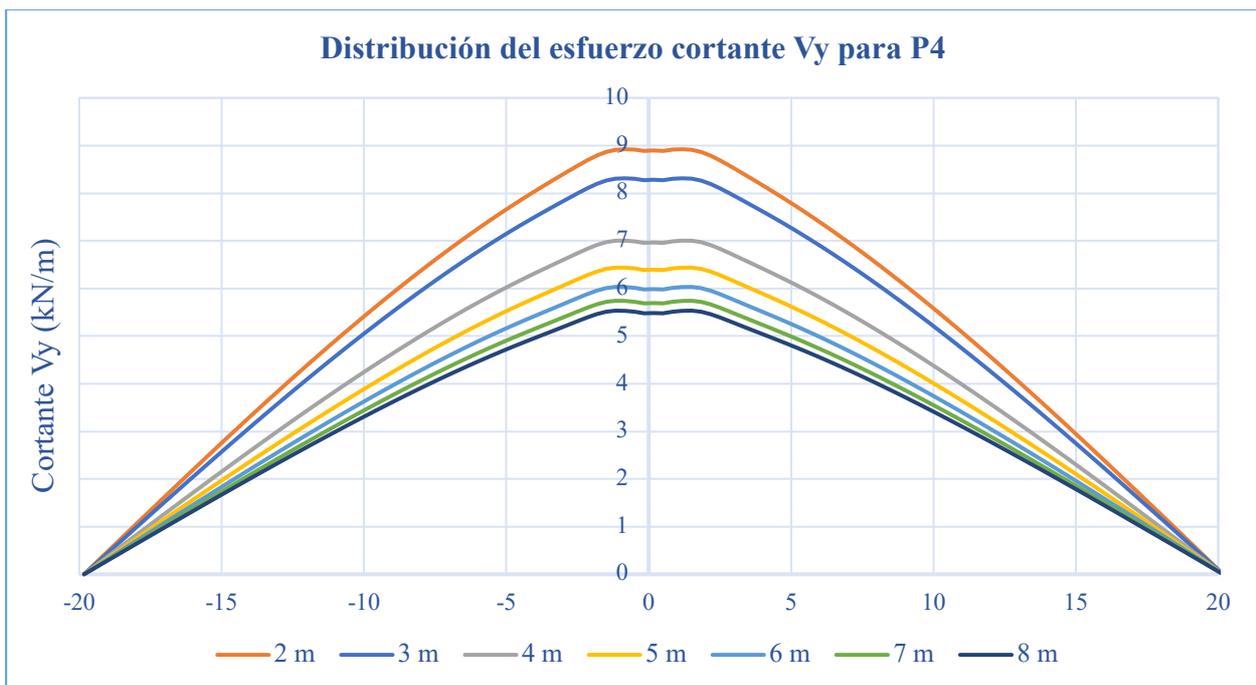


Figura 151. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P4

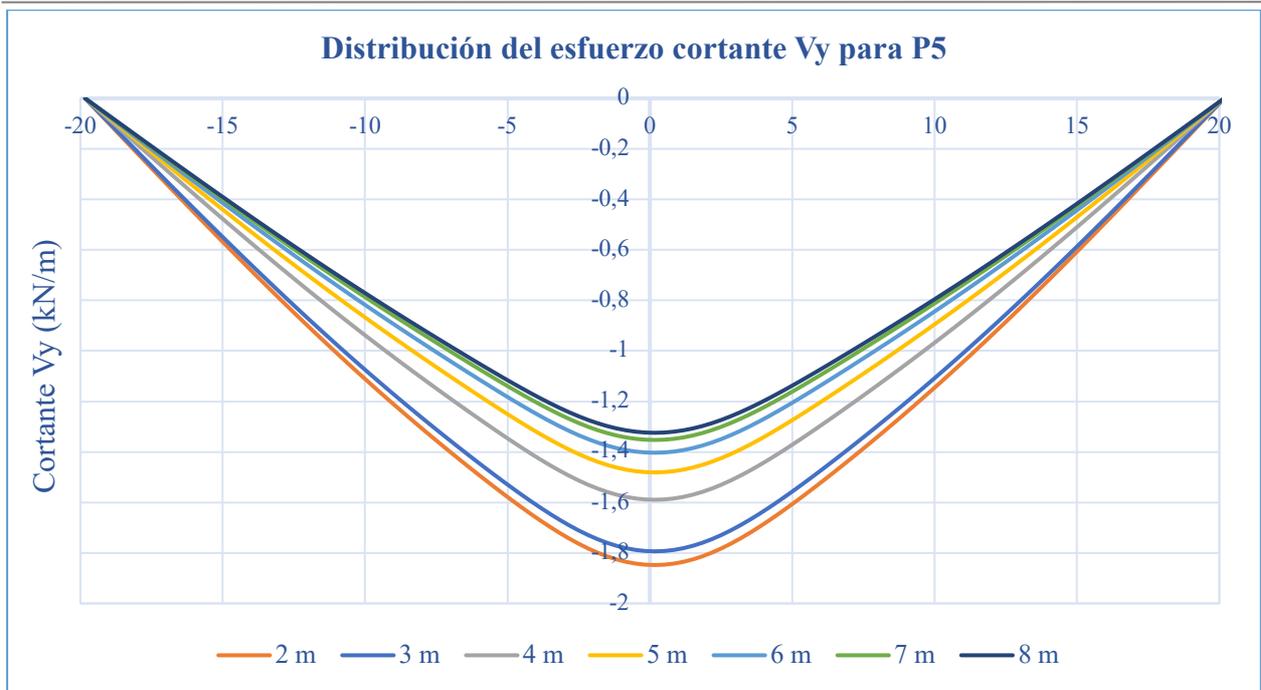


Figura 152. Distribución del momento Q_y al variar el ancho de los cajones para P5

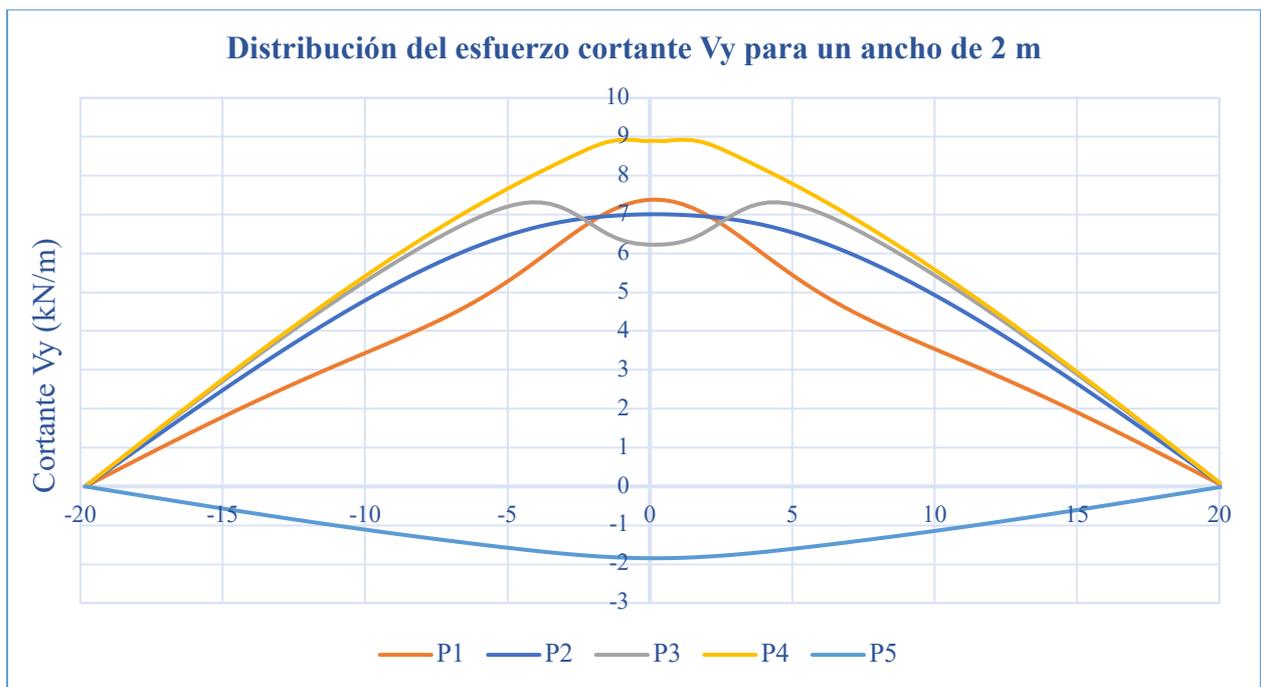


Figura 153. Distribución del momento Q_y según la posición de la carga para un ancho de 2 m

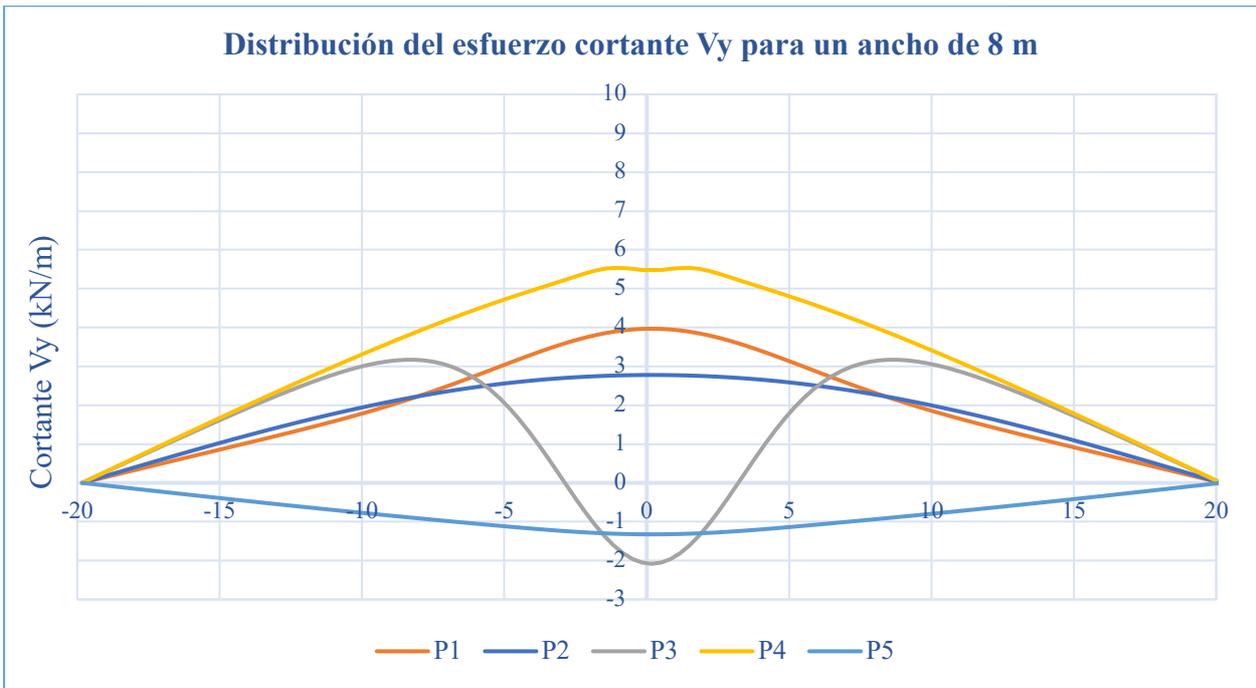


Figura 154. Distribución del momento Q_y según la posición de la carga para un ancho de 8 m

En cuanto al cortante Q_y , en todos los modelos se alcanza su máximo en la sección central, siendo menor cuanto menor es el ancho de los cajones, a excepción del caso de carga P3. Para este caso, se puede apreciar el efecto local de la carga que provoca una disminución de los esfuerzos en la parte central. Este efecto influye más cuanto mayor es el ancho de los cajones.

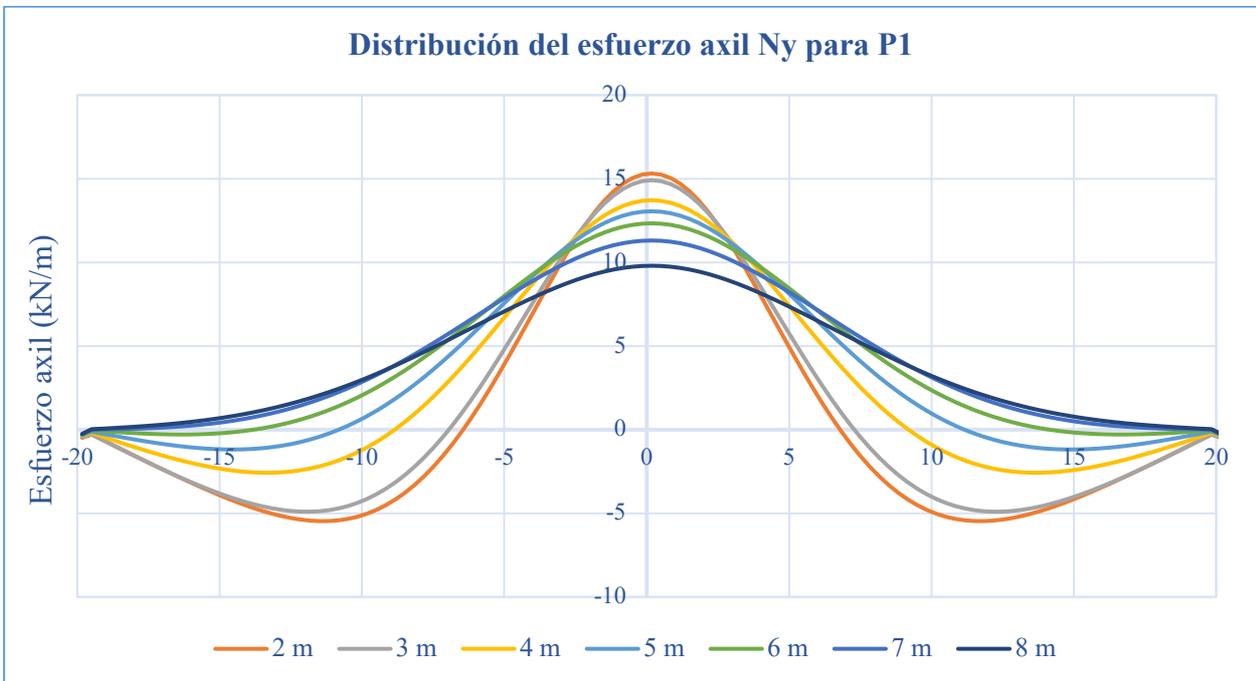


Figura 155. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P1

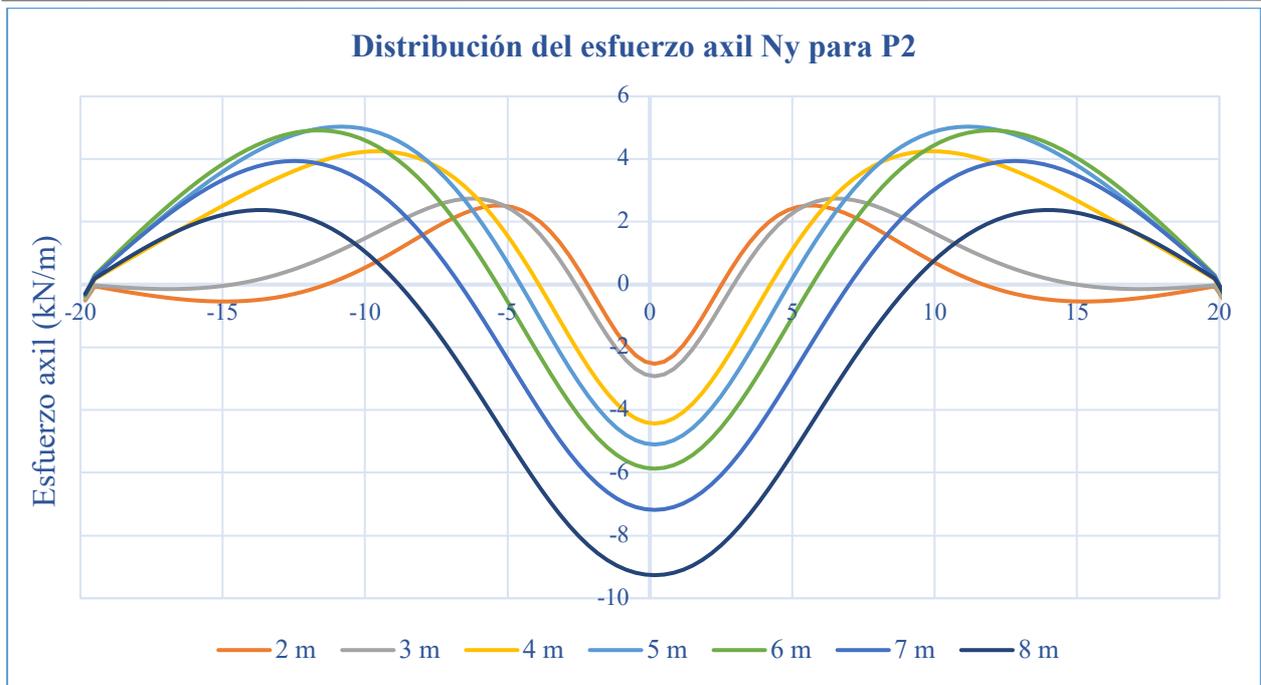


Figura 156. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P2

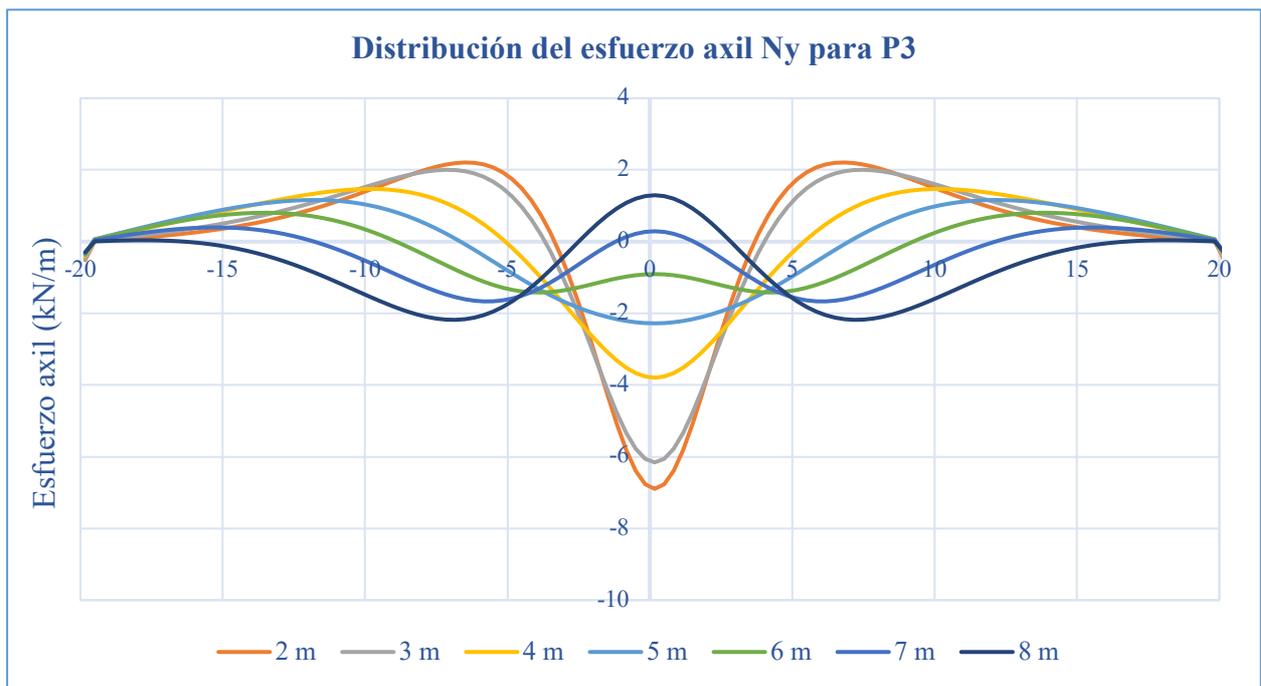


Figura 157. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P3

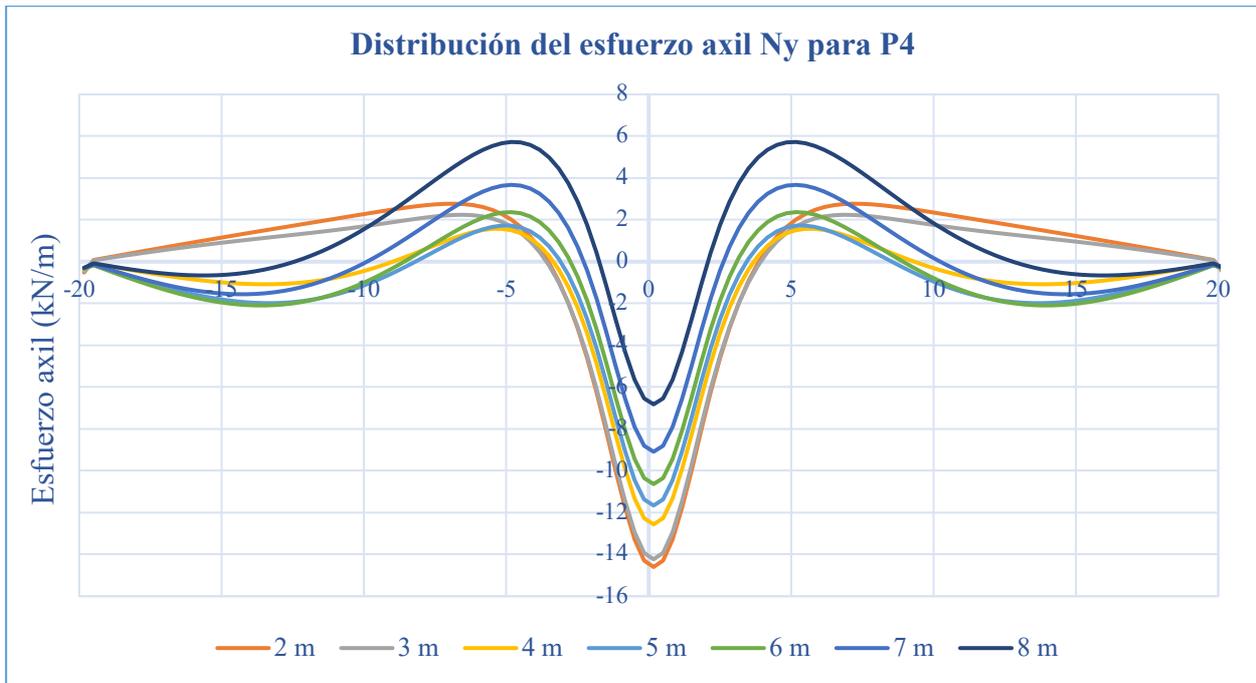


Figura 158. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P4

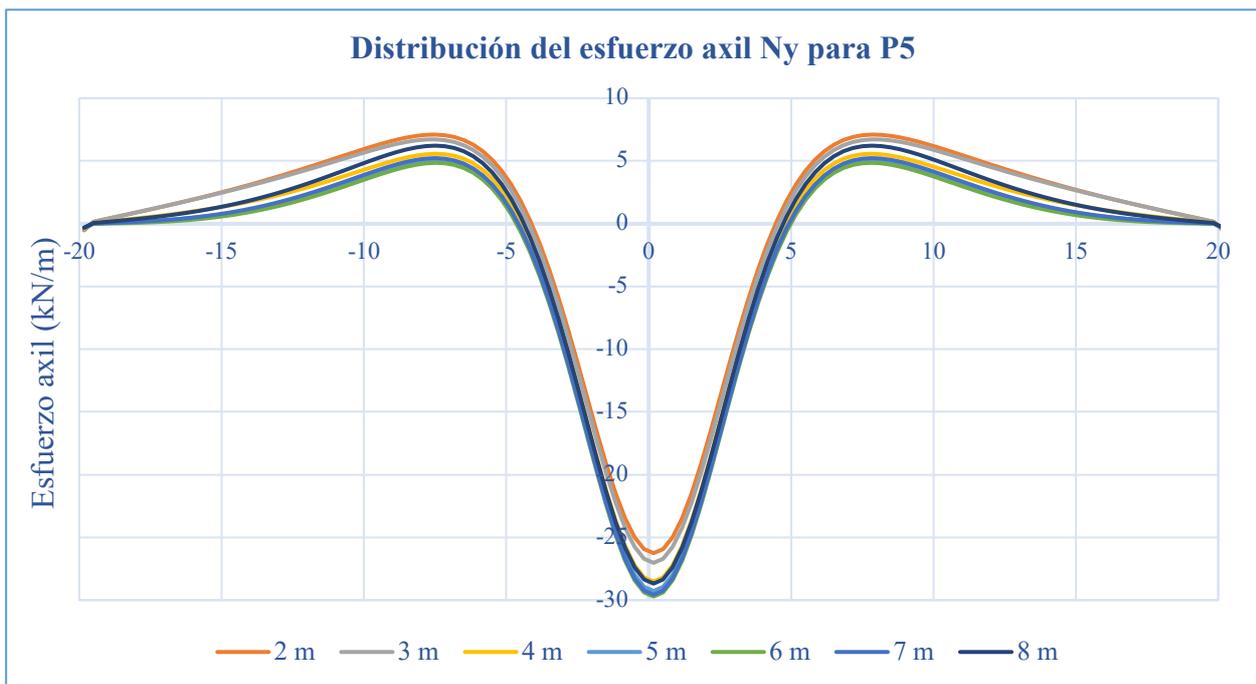


Figura 159. Distribución del momento N_y al variar el ancho de los cajones para P5

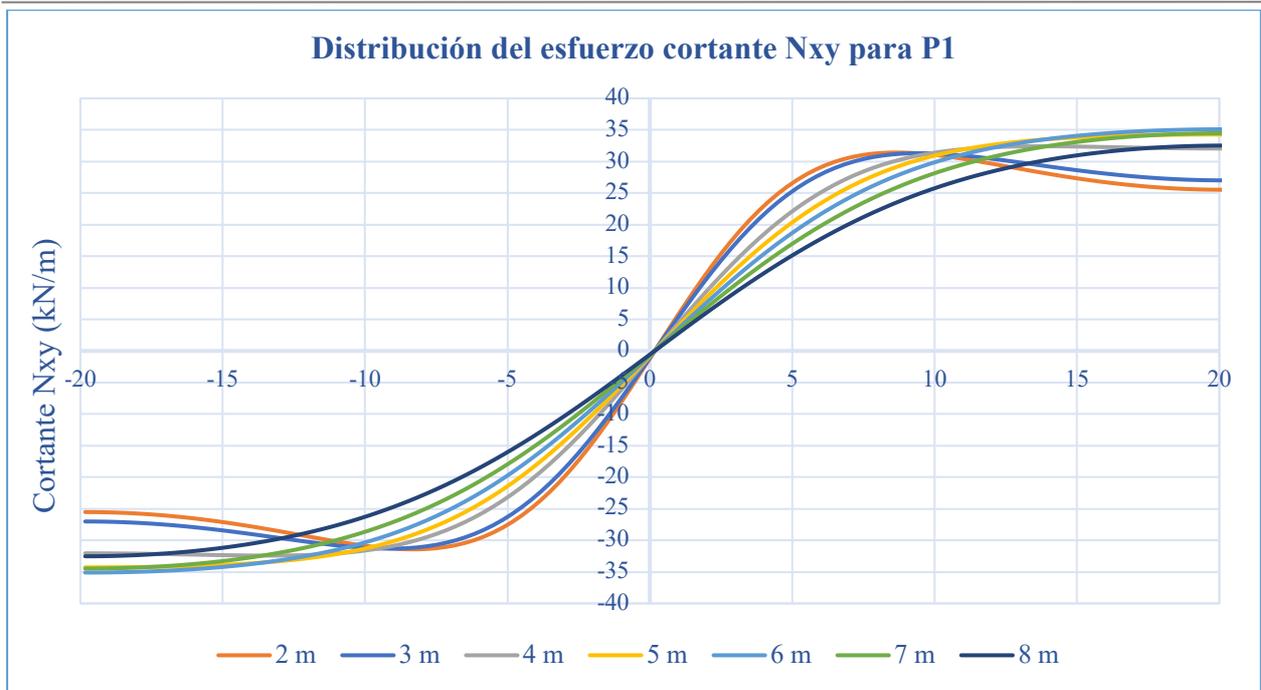


Figura 160. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P1

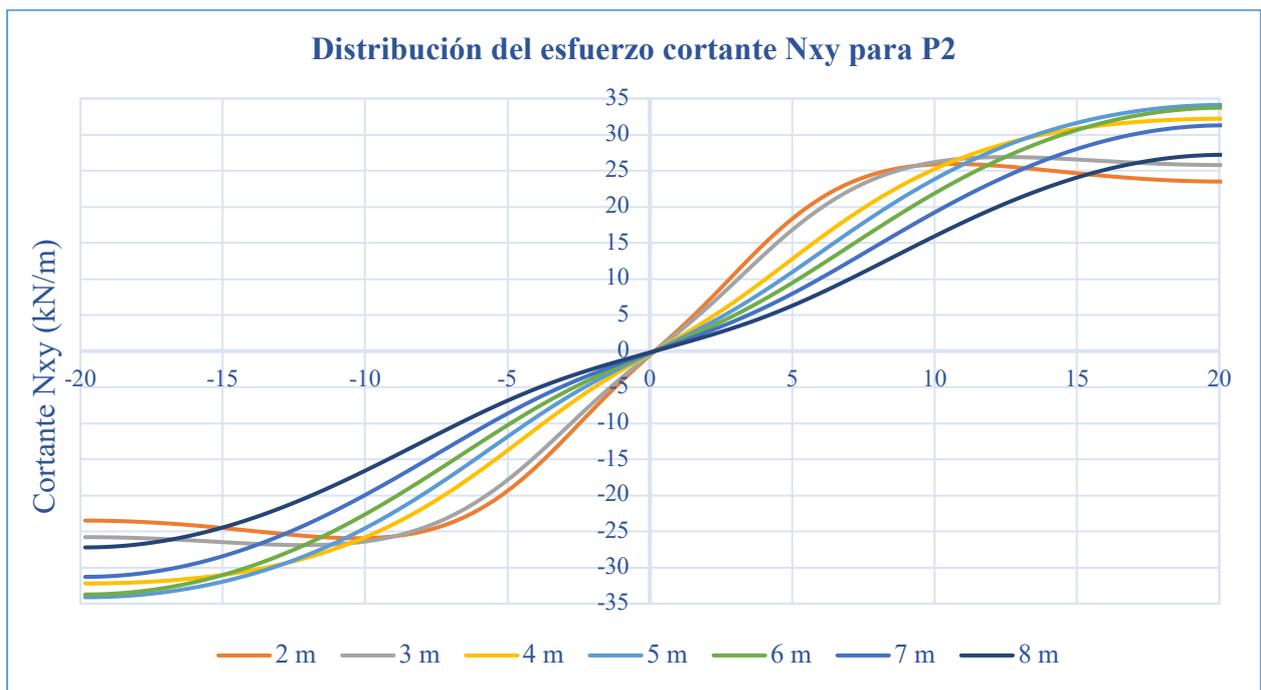


Figura 161. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P2

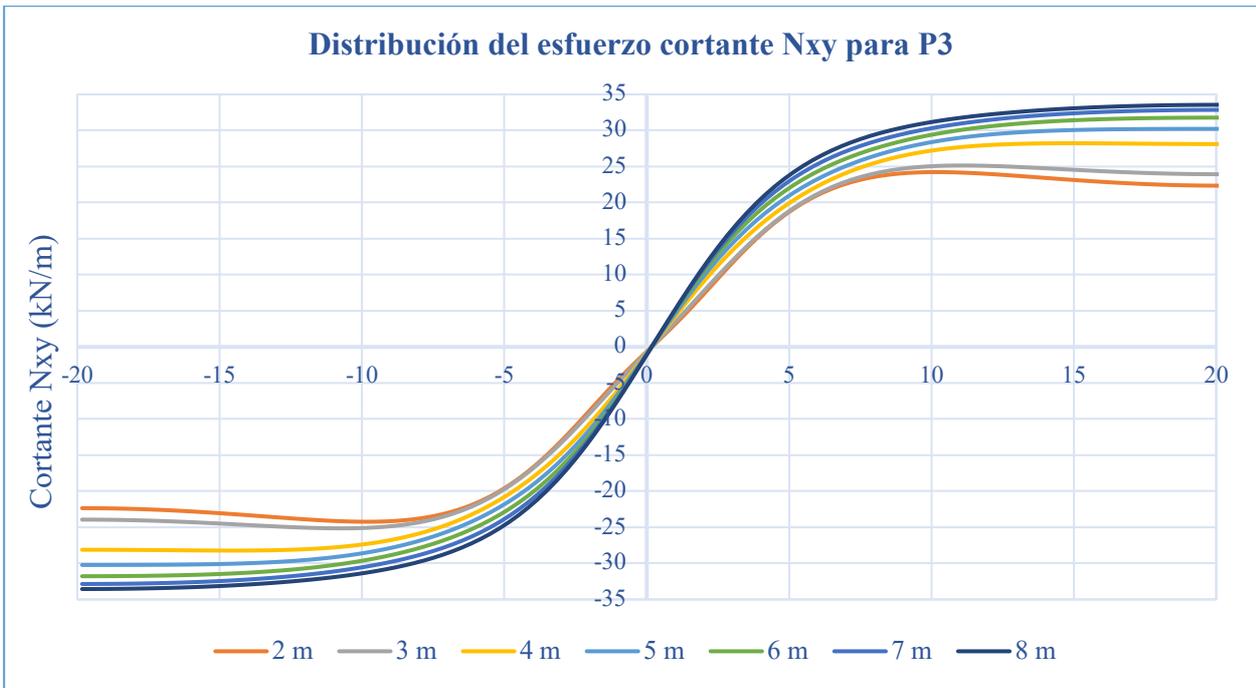


Figura 162. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P3

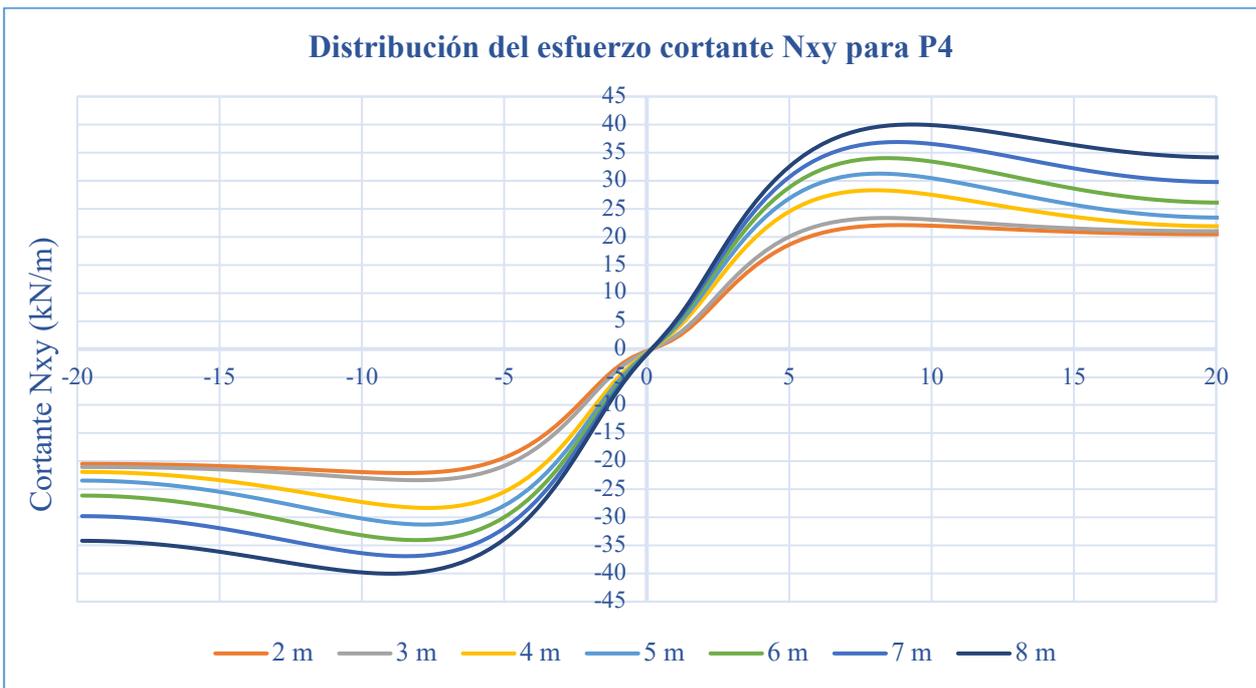


Figura 163. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P4

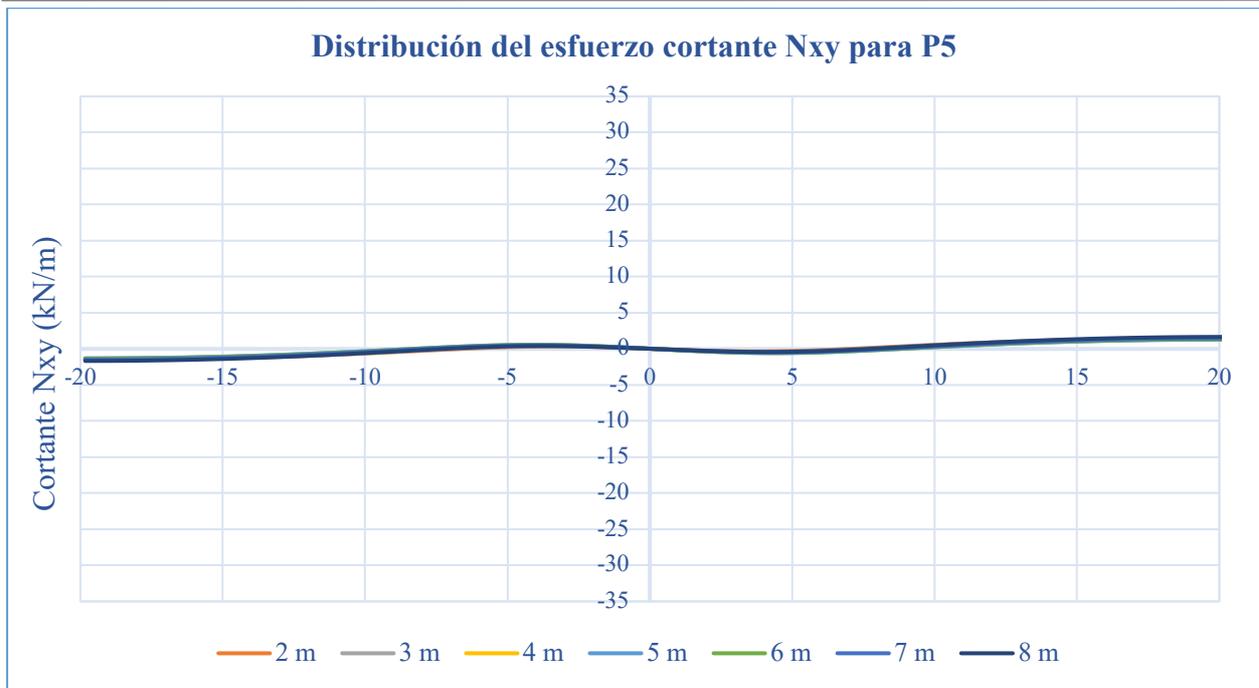


Figura 164. Distribución del momento N_{xy} al variar el ancho de los cajones para P5

Por último, se representan los cortantes N_{xy} . Se observa que, cuando la carga está más alejada del centro de la sección, el cortante va aumentando con el ancho del cajón hasta alcanzar su valor máximo, que se da para un ancho de 5 metros. A partir de ese punto, el cortante comienza a disminuir si se sigue incrementando el ancho. Sin embargo, cuando la carga está más centrada, los esfuerzos aumentan progresivamente a medida que aumenta el ancho del cajón.

4.3.2.4 Tensiones

Para el estudio de las tensiones, se analizarán como varían en el nudo 3, al igual que en los casos anteriores, por ser el que está sometido a mayor cambio. Además, se muestran las distribuciones de las tensiones en las secciones transversales centrales de varios casos.

Únicamente se procede a estudiar las tensiones normales porque las tensiones tangenciales apenas varían en los nudos del alma cargada.

A continuación, se representan las variaciones de las tensiones en el nudo 3 según el ancho de los cajones para cada caso de carga.

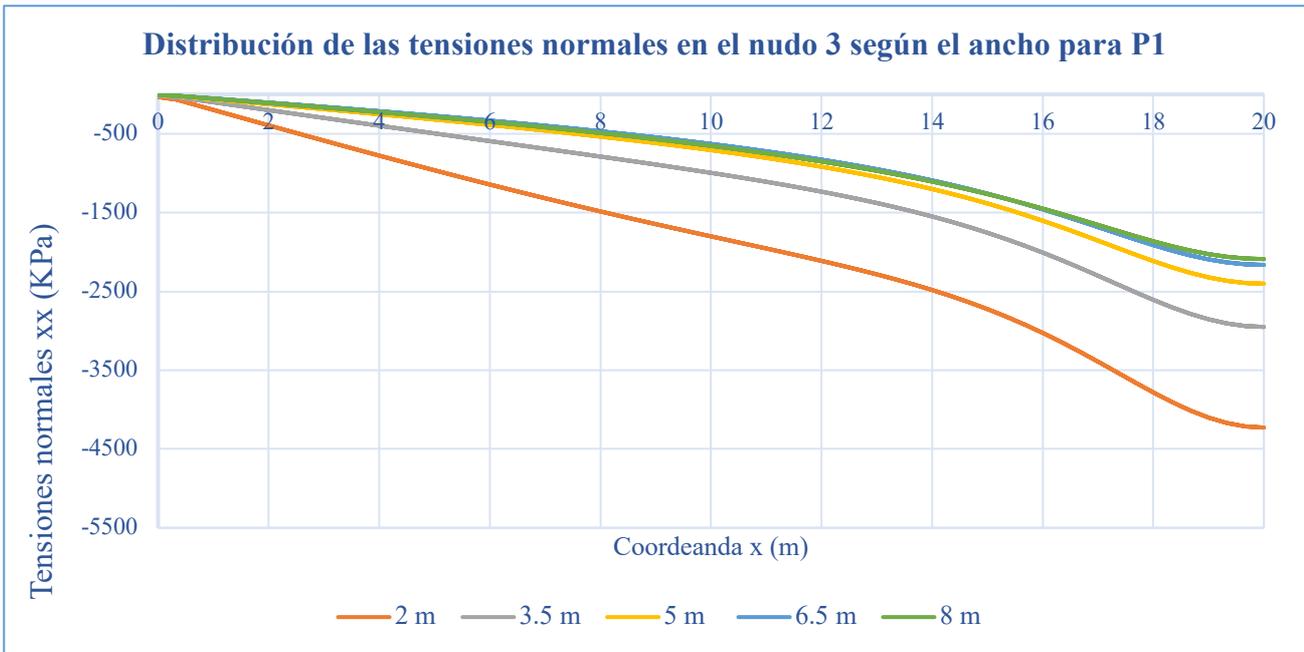


Figura 165. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P1

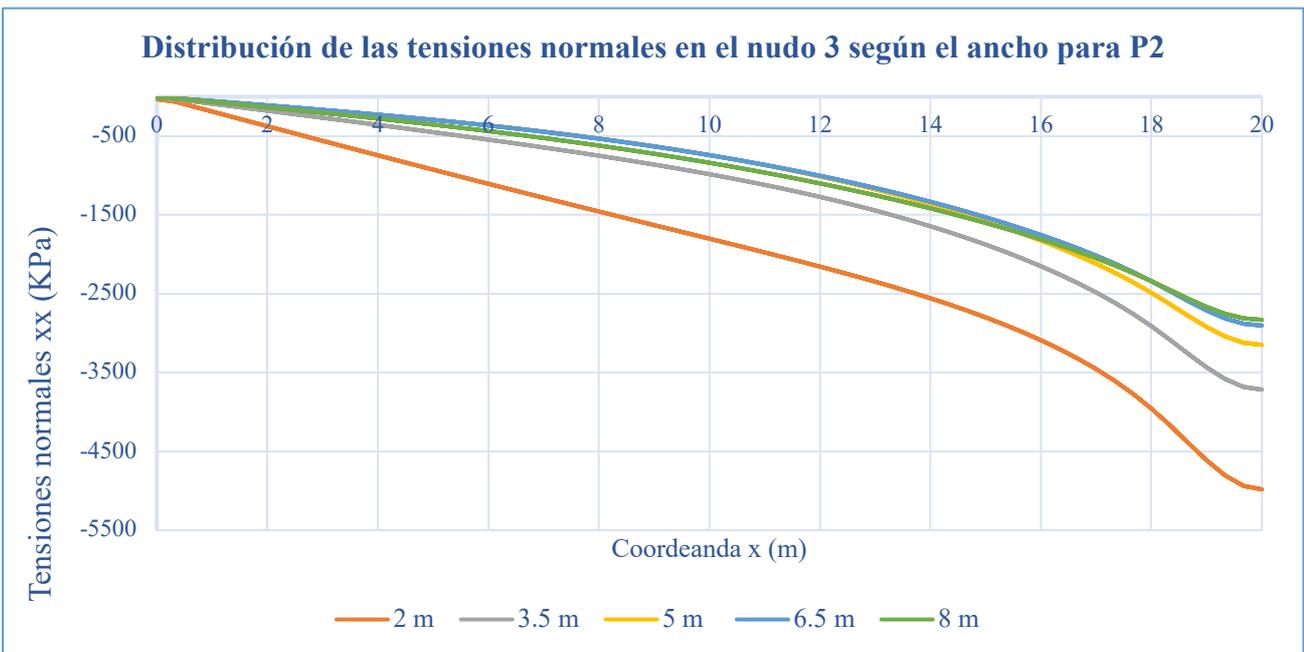


Figura 166. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P2

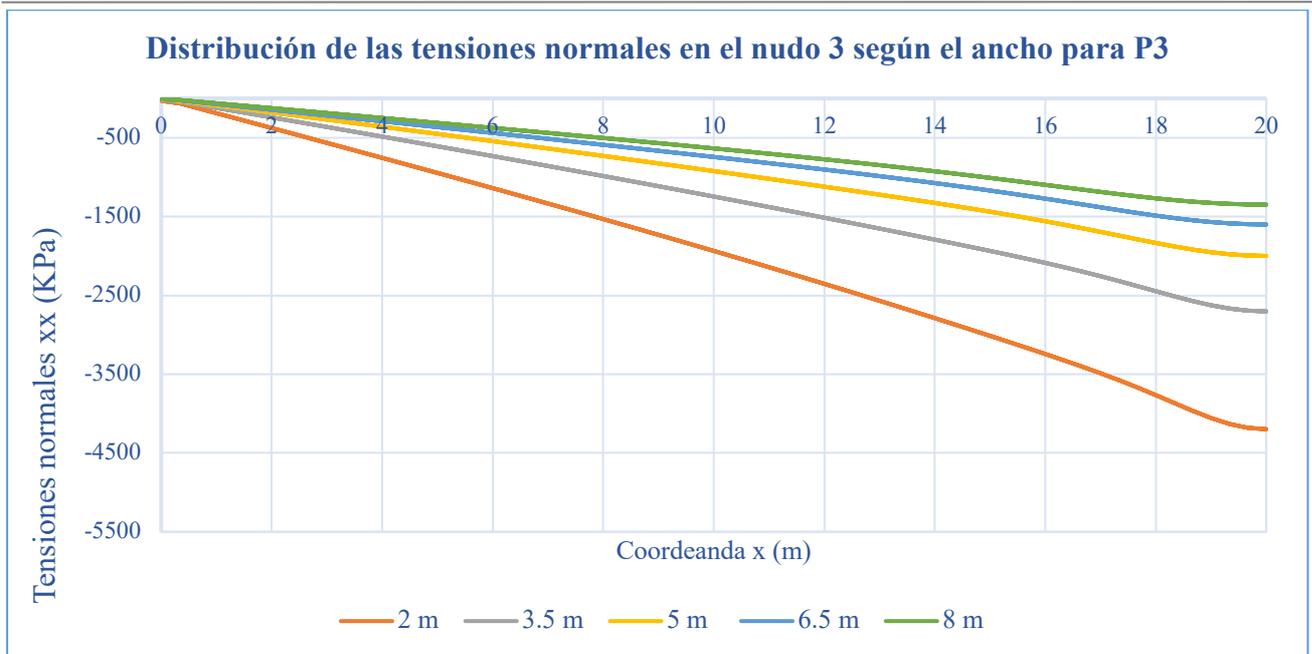


Figura 167. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P3

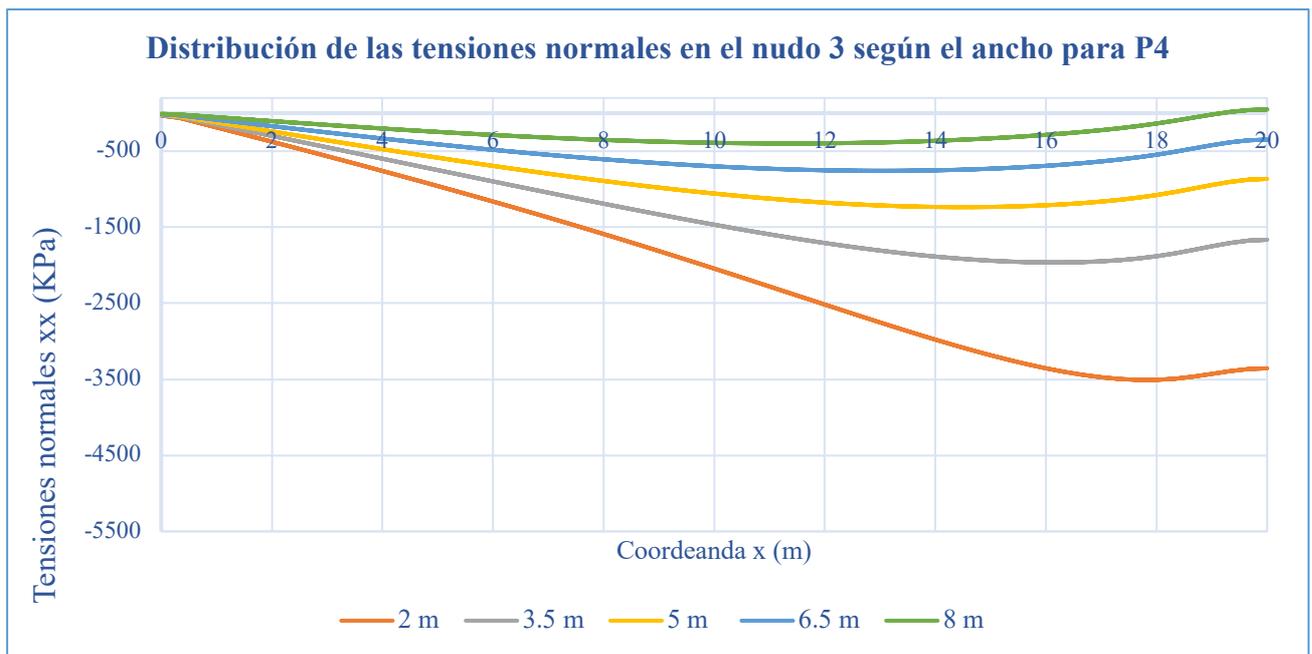


Figura 168. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P4

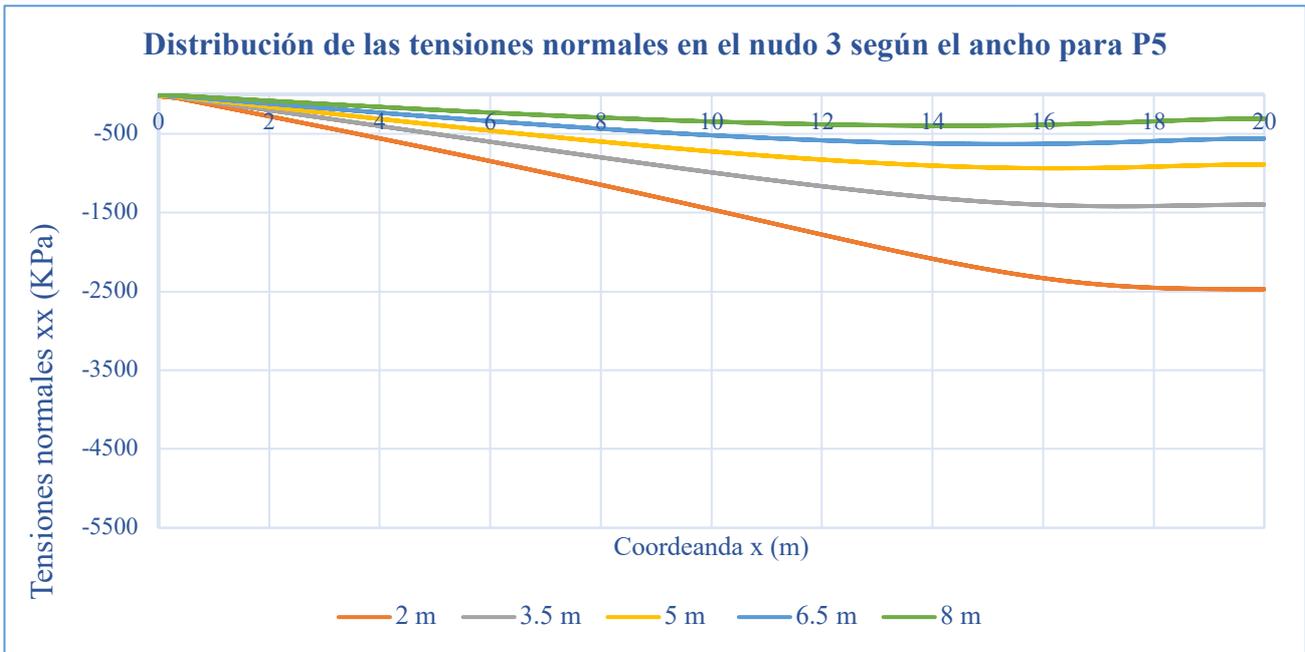


Figura 169. Distribución de las tensiones normales según el ancho para P5

Se observa como a medida que aumenta el ancho de los cajones, las tensiones normales en el nudo 3 van disminuyendo. Sin embargo, en el caso de carga P2, el mínimo se da para el modelo de 6.5 m de ancho, por lo que las tensiones disminuyen con el ancho hasta llegar a los 6.5 m, a partir de los cuales, las tensiones comienzan a aumentar de nuevo.

Por último, se representan las distribuciones de las tensiones en las secciones transversales centrales del modelo de 2 metros de ancho, para poder comparar los valores de las tensiones en las situaciones extremas.

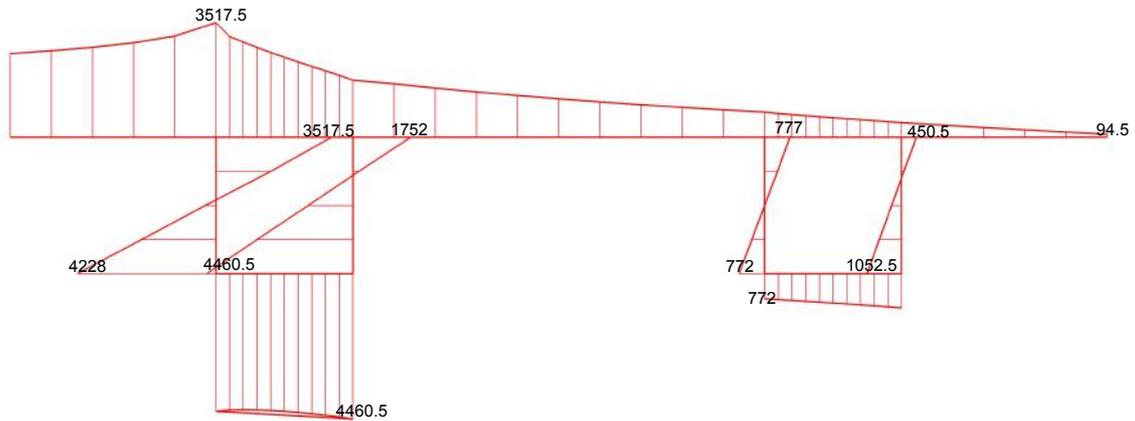


Figura 170. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P1, del modelo de 2 m de ancho

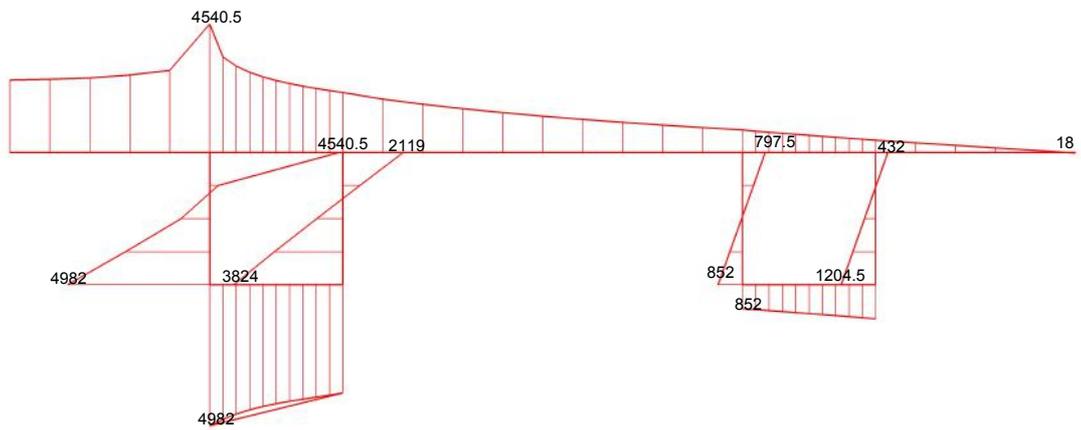


Figura 171. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P2, del modelo de 2 m de ancho

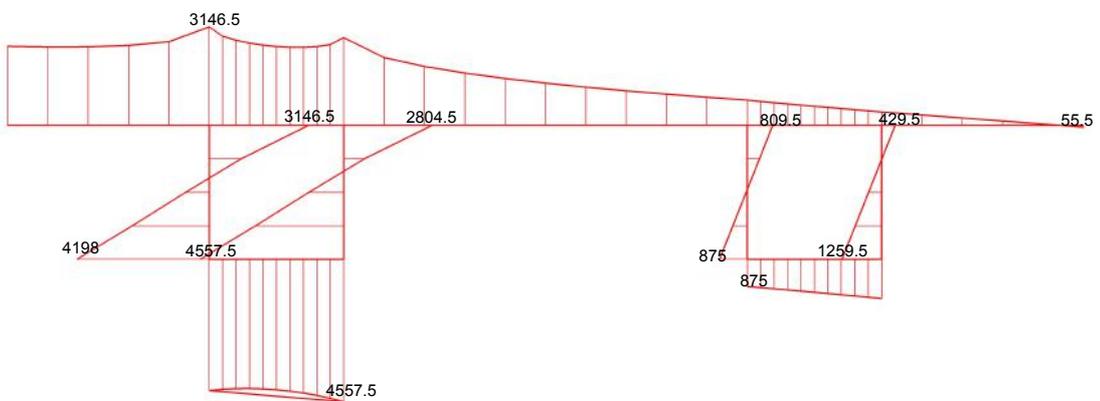


Figura 172. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P3, del modelo de 2 m de ancho

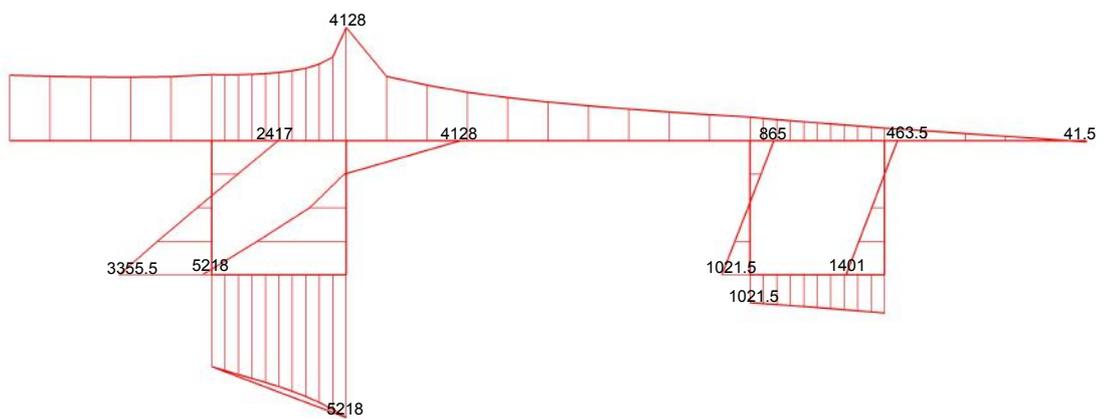


Figura 173. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 2 m de ancho

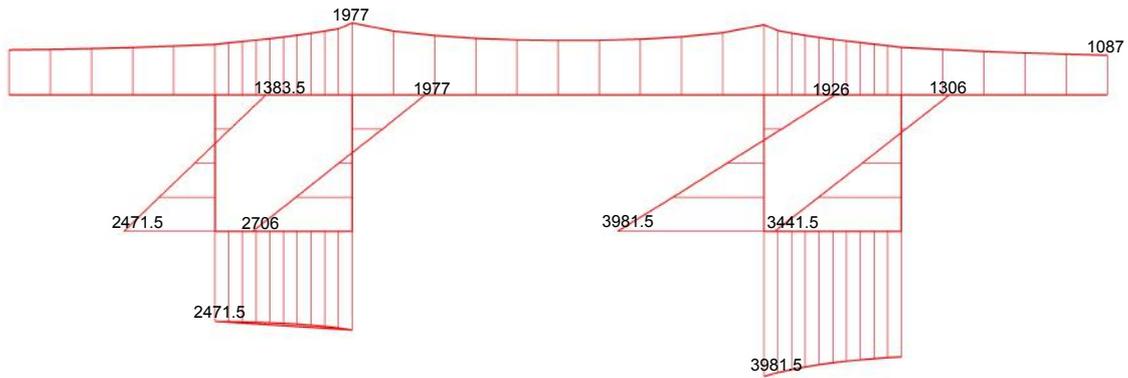


Figura 174. Distribución de (KPa) en la sección x=20 m para P5, del modelo de 2 m de ancho

4.4 Caso 4: Variación de la separación entre cajones

4.4.1 Descripción del modelo

Para este último estudio se han utilizado siete modelos, modificando la separación entre los cajones desde los 2 hasta los 8 metros, aumentando en cada modelo 1 metro esta distancia. Por tanto, la longitud de la losa superior también ha ido aumentando.

4.4.2 Respuesta ante cargas puntuales

4.4.2.1 Desplazamientos

En las siguientes imágenes se representan los desplazamientos cuando la carga está aplicada en el nudo 2 (P2) de los modelos con una separación de 2, 6 y 8 metros.

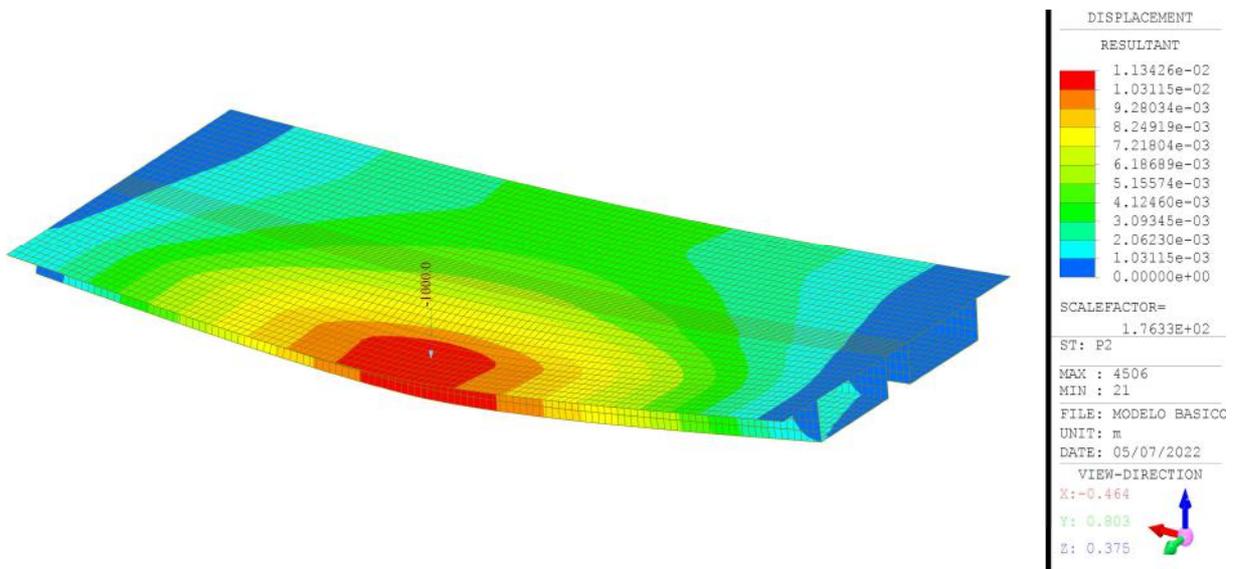


Figura 175. Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de separación entre cajones para la carga P2

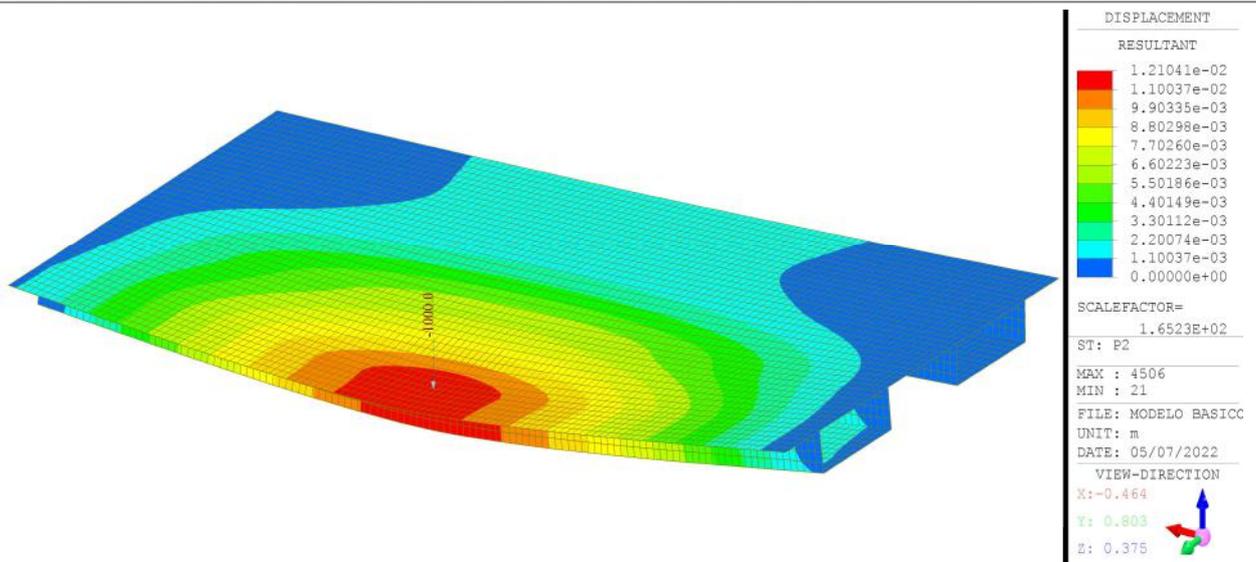


Figura 176. Desplazamientos (m) del modelo de 6 metros de separación entre cajones para la carga P2

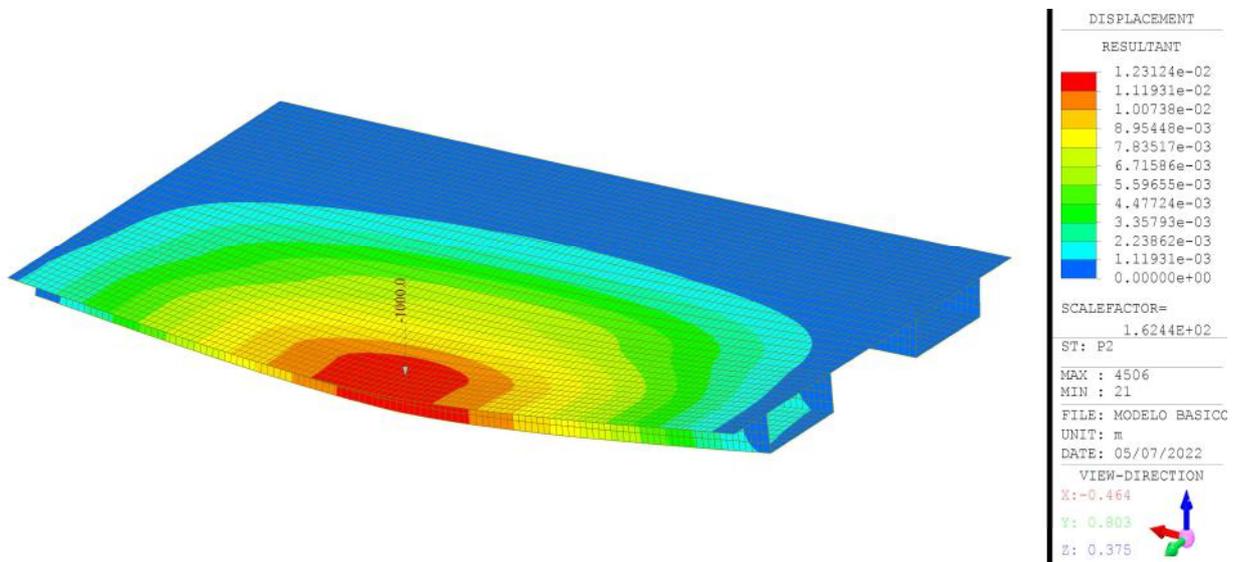


Figura 177. Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de separación entre cajones para la carga P2

Se puede ver como, para una separación de 2 metros entre cajones, el cajón derecho ayuda en gran medida a soportar la carga y, por ello, la zona de influencia es más grande y los desplazamientos son más pequeños.

Sin embargo, para una separación de 8 metros, al estar más alejados los cajones entre sí, el cajón derecho no interviene en soportar la carga y es el cajón izquierdo el que debe hacerlo en su totalidad. Es por esto por lo que los desplazamientos en el cajón izquierdo son mayores.

Por tanto, a medida que va aumentando la separación de los cajones la zona de influencia es menor y los desplazamientos son mayores.

A continuación, se representan los desplazamientos cuando la carga está aplicada en el nudo 7 (P5) de los modelos con una separación de 2, 6 y 8 metros.

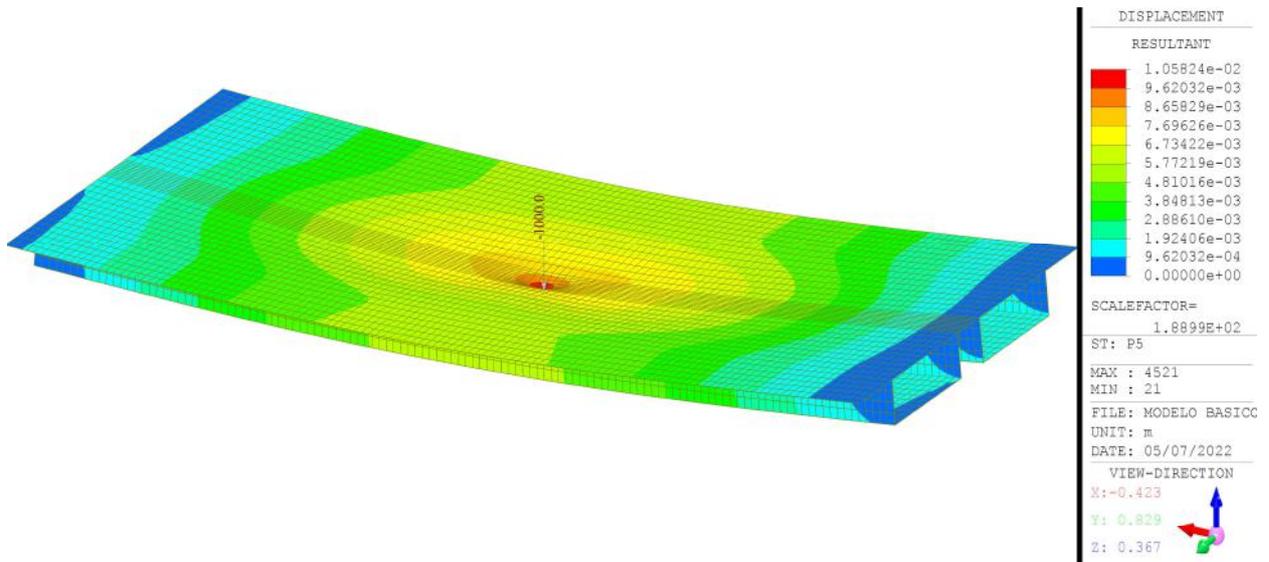


Figura 178. Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de separación entre cajones para la carga P5

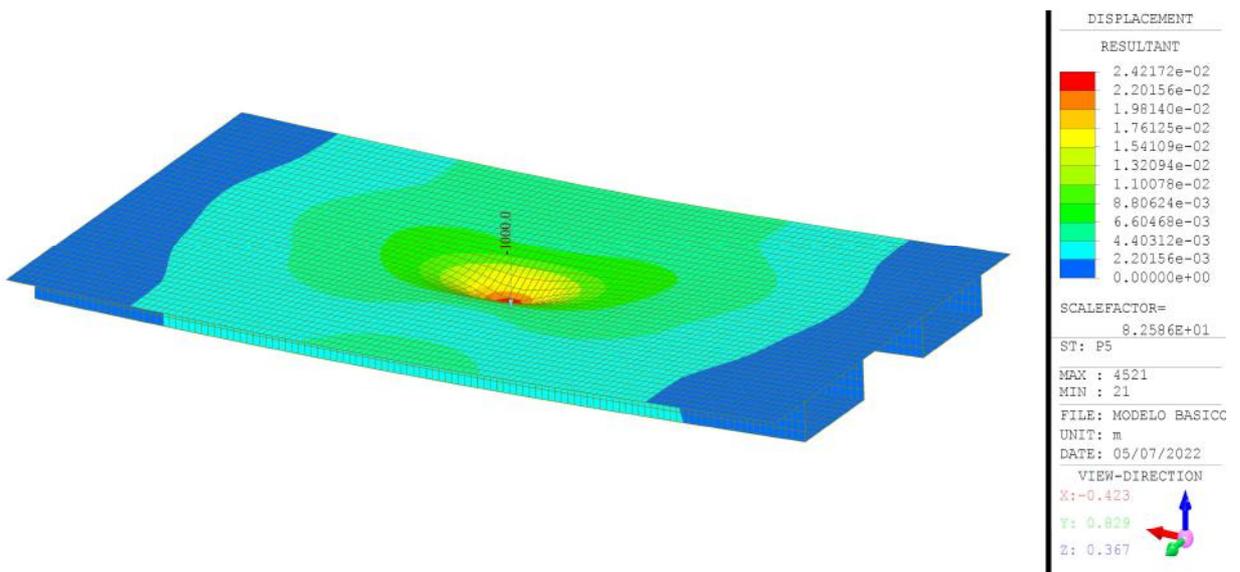


Figura 179. Desplazamientos (m) del modelo de 6 metros de separación entre cajones para la carga P5

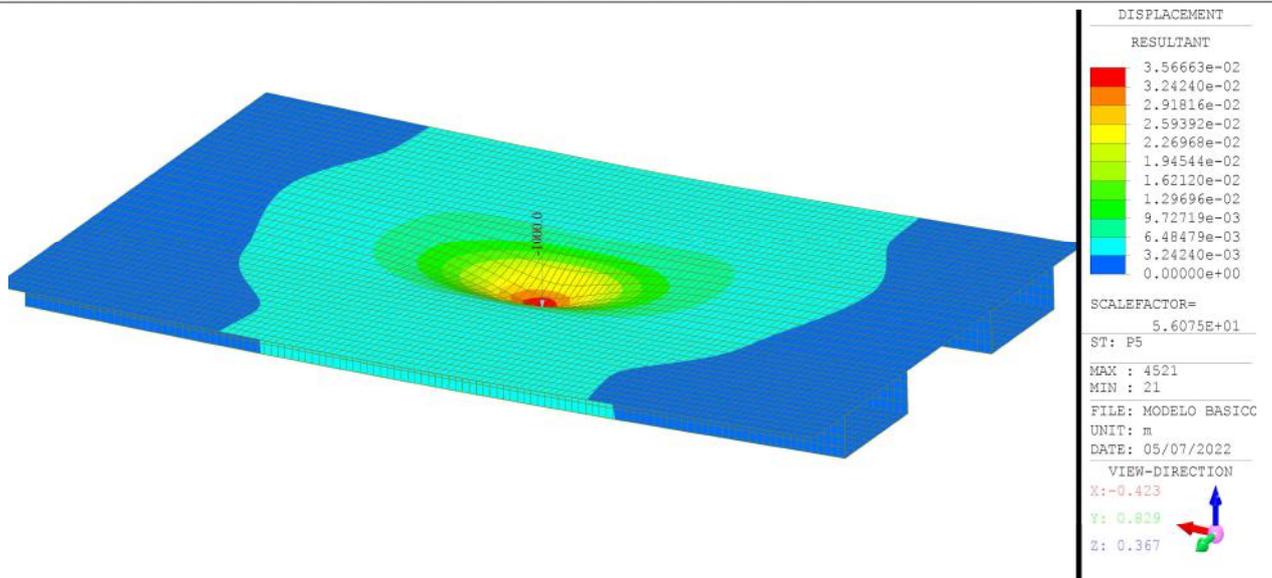


Figura 180. Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de separación entre cajones para la carga P5

En este caso, ocurre igual que en el anterior, a medida que va aumentando la separación de los cajones la zona de influencia es menor y los desplazamientos son mayores.

Las siguientes gráficas (figuras 181 y 182) recogen cómo varía la flecha de los nudos 2 y 8 al modificar la separación entre cajones y la posición de la carga.

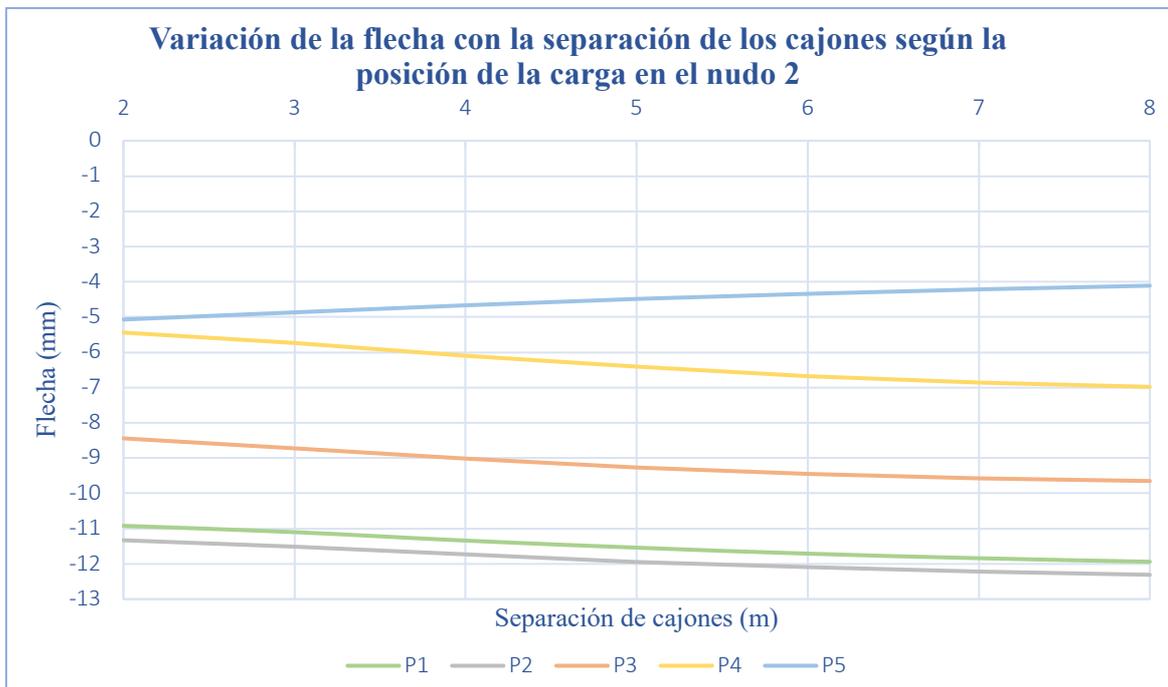


Figura 181. Variación de la flecha con la separación entre cajones según la posición de la carga en el nudo 2

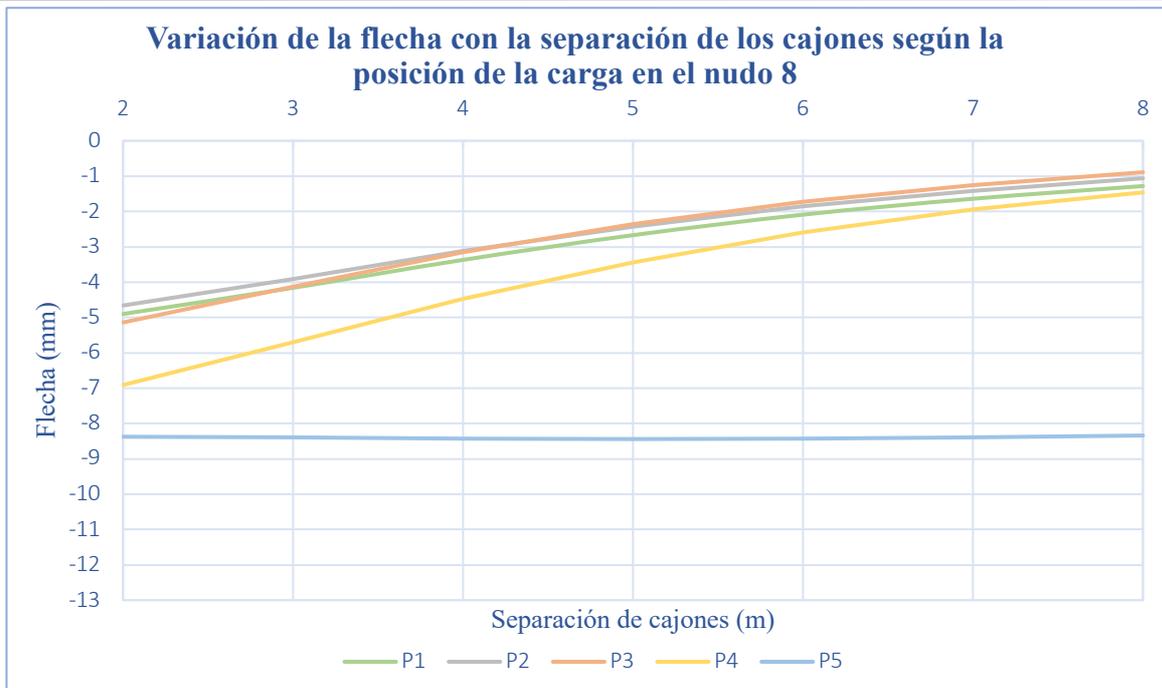


Figura 182. Variación de la flecha con la separación entre cajones según la posición de la carga en el nudo 8

De estas gráficas se deduce que el comportamiento para los cuatro primeros casos de carga es similar, pues en todos ellos, el desplazamiento del nudo 2 va aumentando a medida que se separan los cajones porque siempre se encuentra dentro de la zona de influencia de la carga, mientras que los desplazamientos del nudo 8 van disminuyendo porque cuanto mayor es la distancia entre los cajones menor es la influencia de la carga en este nudo.

Sin embargo, para el quinto caso de carga ocurre al contrario. Los desplazamientos del nudo 2 van disminuyendo porque la influencia de la carga va siendo menor y los del nudo 8 van aumentando.

Por último, se relacionan los desplazamientos máximos del eje z:

Separación (m)	P1	P2	P3	P4	P5
2	-102,51	-11,34	-24,96	-9,19	-10,58
3	-102,7	-11,52	-25,44	-9,74	-12,8
4	-102,94	-11,74	-25,86	-10,3	-15,82
5	-103,16	-11,94	-26,17	-10,78	-19,63
6	-103,34	-12,11	-26,38	-11,17	-24,22
7	-103,49	-12,22	-26,53	-11,46	-29,56
8	-103,59	-12,31	-26,62	-11,66	-35,67

Tabla 4. Desplazamientos verticales máximos (mm) según la separación entre cajones y la posición de la carga

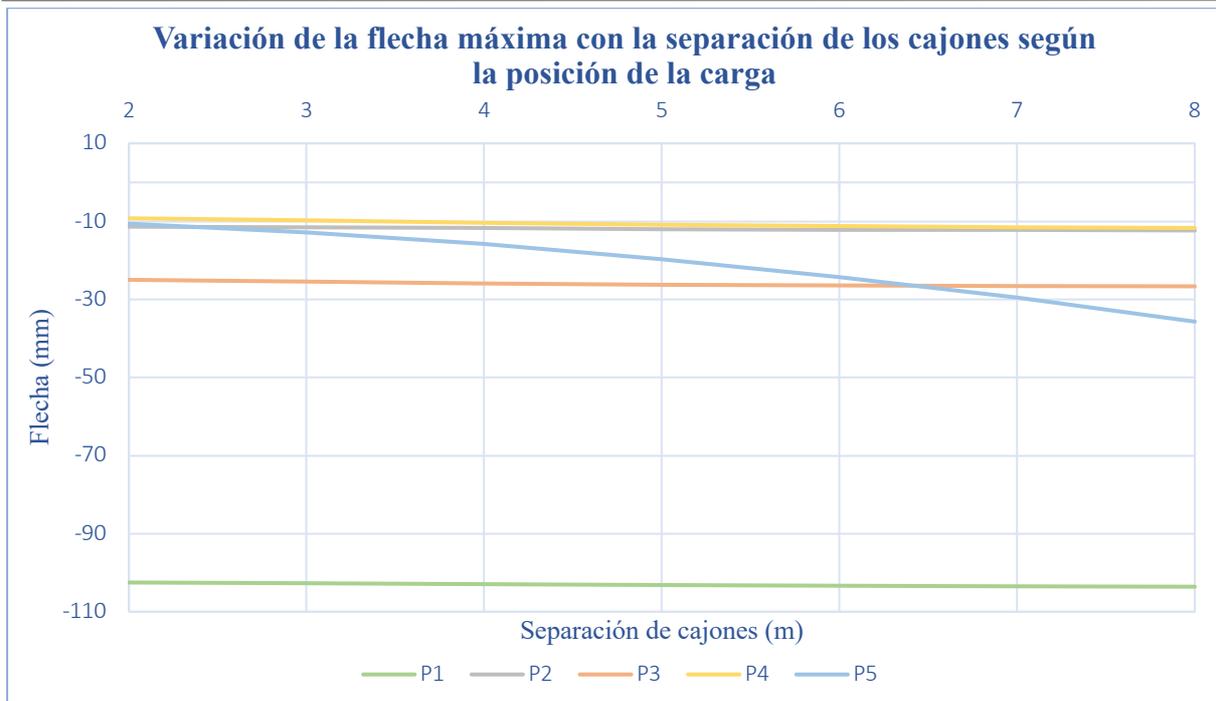


Figura 183. Variación de la flecha máxima con la separación de los cajones según la posición de la carga

Se comprueba que la flecha va aumentando, lentamente, conforme va aumentando la distancia de separación entre los cajones.

4.4.2.2 Distorsión

La distorsión se calcula para la sección central, ya que al ser la que sufre más deformación, la distorsión será mayor también.

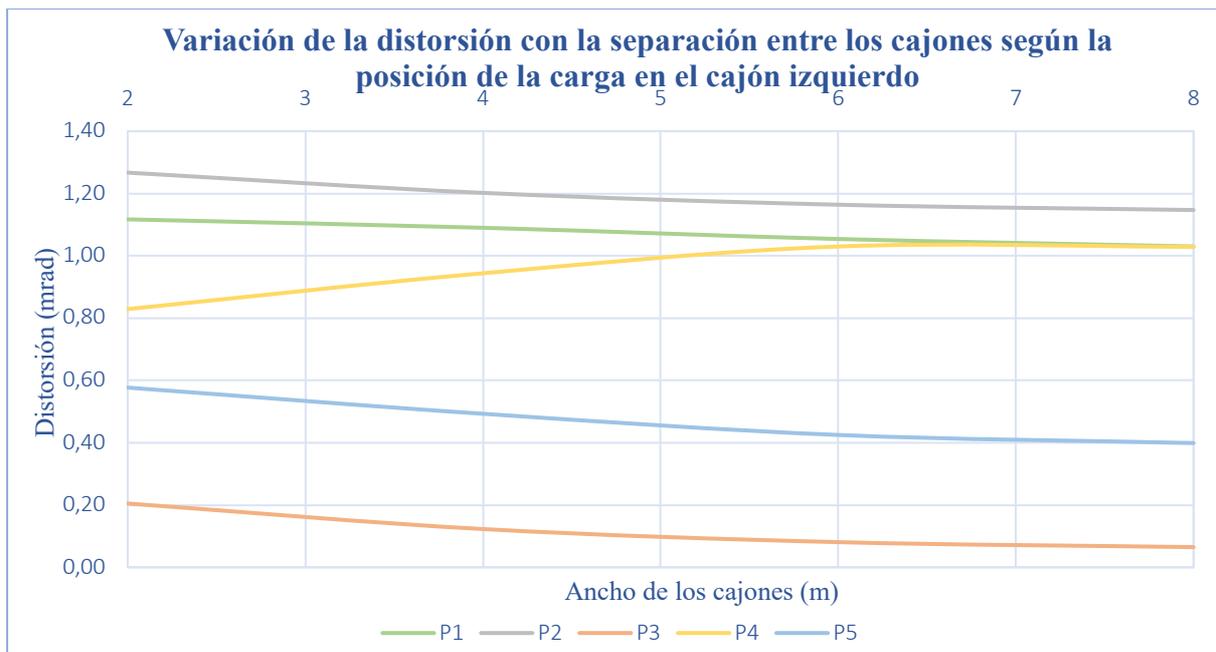


Figura 184. Variación de la distorsión con la separación de cajones en el cajón izquierdo

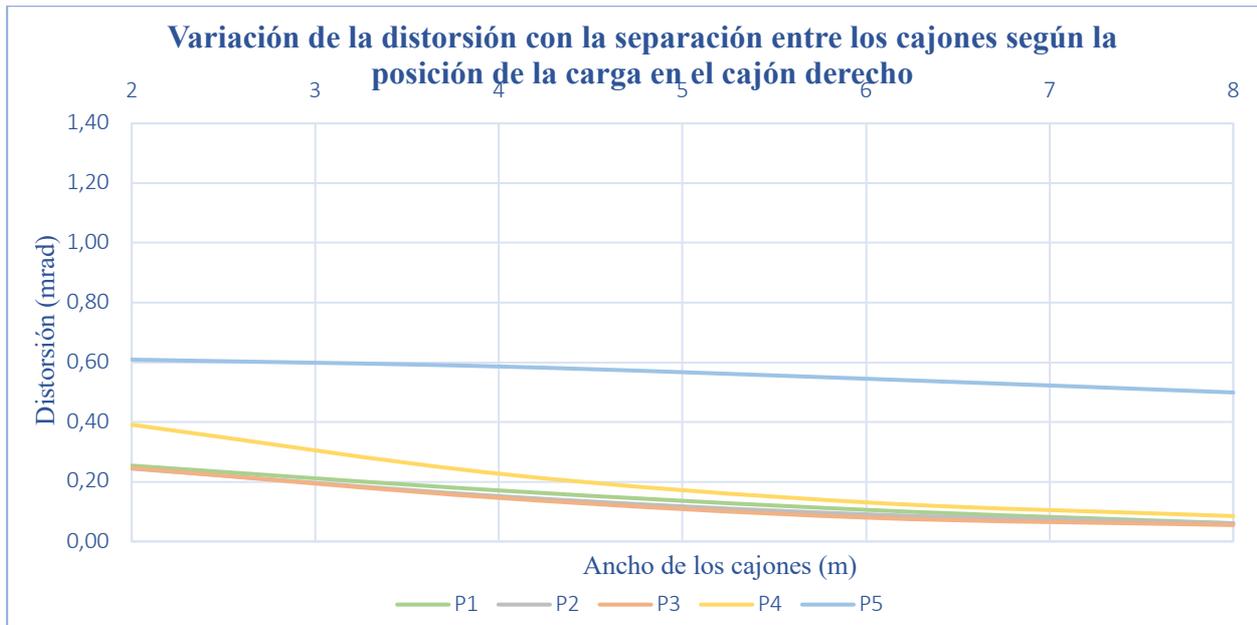


Figura 185. Variación de la distorsión con la separación de cajones en el cajón derecho

A medida que se separan los cajones, aumenta la rigidez a torsión y la flexibilidad de las barras. El aumento de la rigidez a torsión provoca una disminución de la distorsión y el aumento de la flexibilidad de las barras un aumento de la distorsión. Dependiendo de cada posición de la carga, tiene más relevancia un efecto u el otro. Por ello, mientras que para el caso de carga P4 la distorsión aumenta, para los demás casos disminuye.

Además, cabe indicar que las distorsiones en el cajón derecho son menores que en el cajón izquierdo, como ocurre en todos los casos estudiados.

4.4.2.3 Esfuerzos

Para este apartado se han estudiado los esfuerzos de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre los cajones, variando el punto de aplicación de la carga.

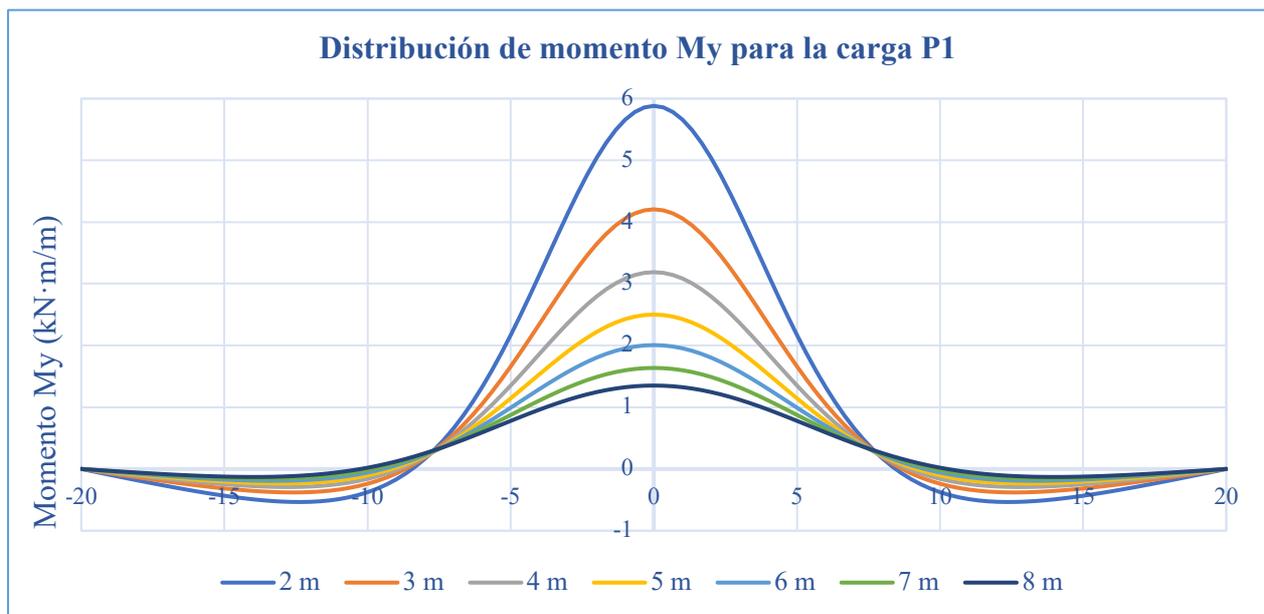


Figura 186. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P1

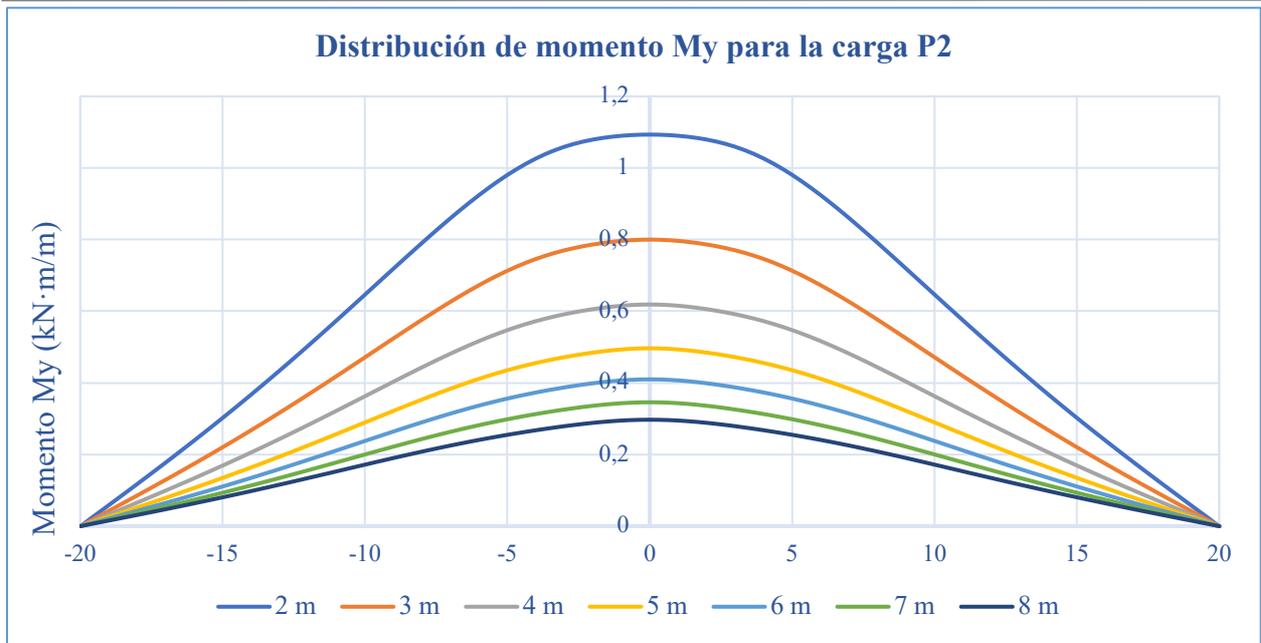


Figura 187. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P2

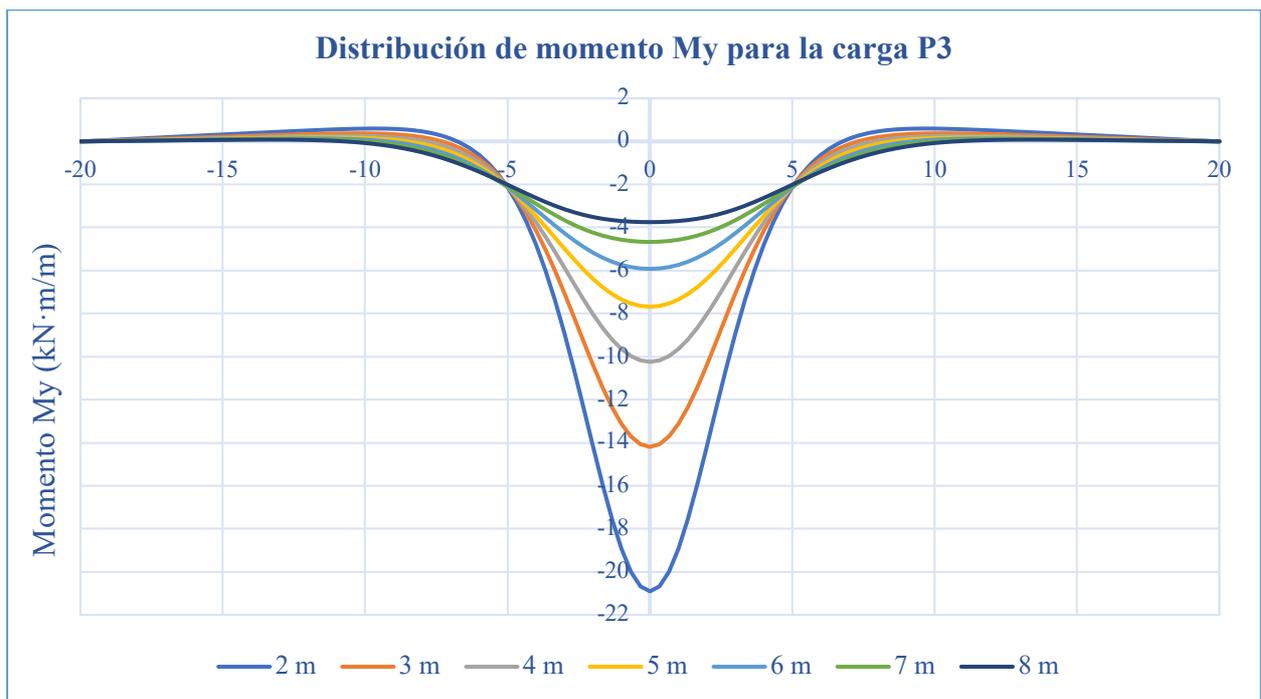


Figura 188. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P3

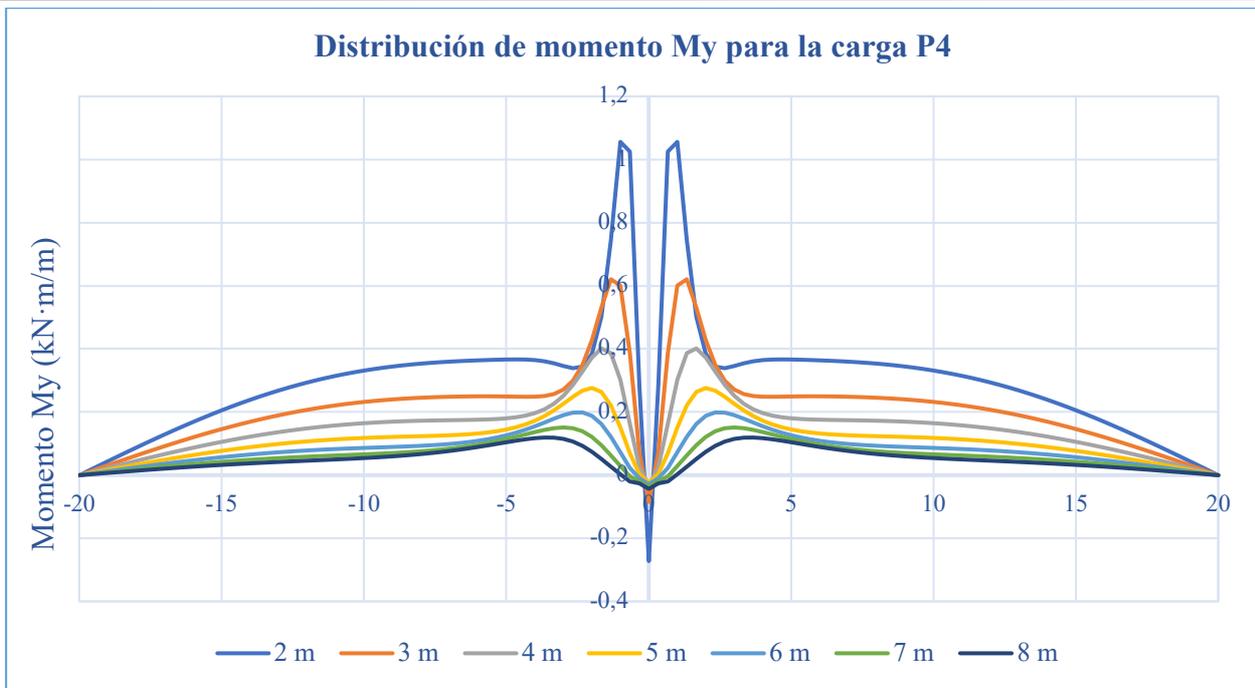


Figura 189. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P4

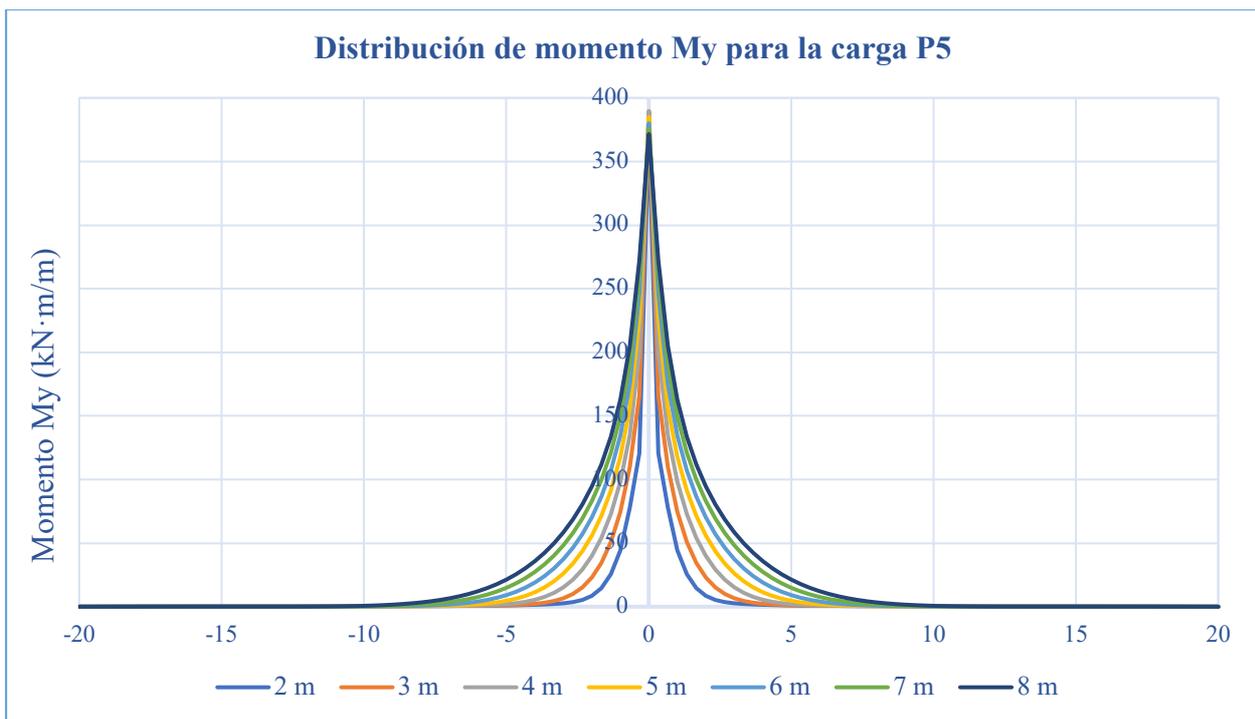


Figura 190. Distribución del momento M_y según la separación de los cajones para P5

Analizando las gráficas anteriores se llega a varias conclusiones. En primer lugar, para los cuatro primeros casos de carga, se aprecia como a medida que aumenta la separación entre cajones, los momentos disminuyen, esto ocurre porque al aumentar la separación de los cajones aumenta la distancia entre el punto de aplicación de la carga y la sección de estudio, por tanto, el efecto que provoca en esta sección es menor. Sin embargo, los dos primeros y el cuarto tienen momentos positivos y el tercero momentos negativos porque, como ya se ha explicado en el caso I (variación de luz), las almas de los cajones hacen de apoyo para la losa y la parte central se levanta

Para el último caso de carga, P5, se aprecia el efecto local de la carga, ya que se ha aplicado sobre la misma

sección de estudio.

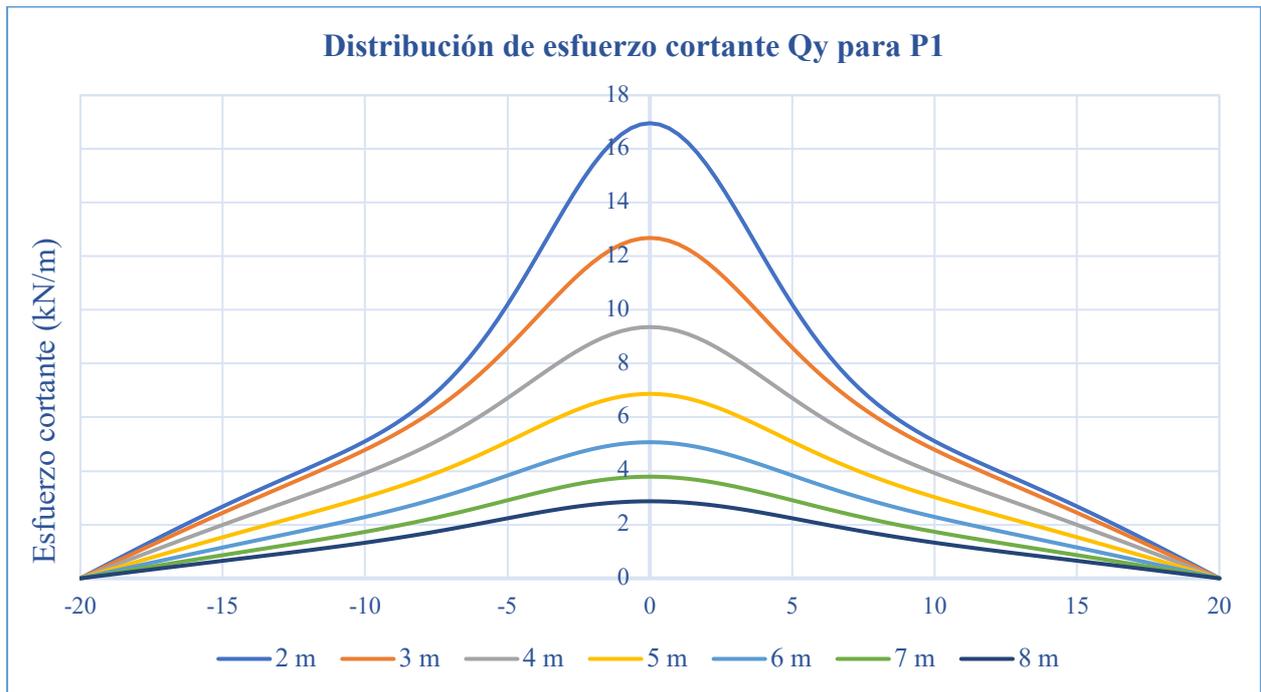


Figura 191. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P1

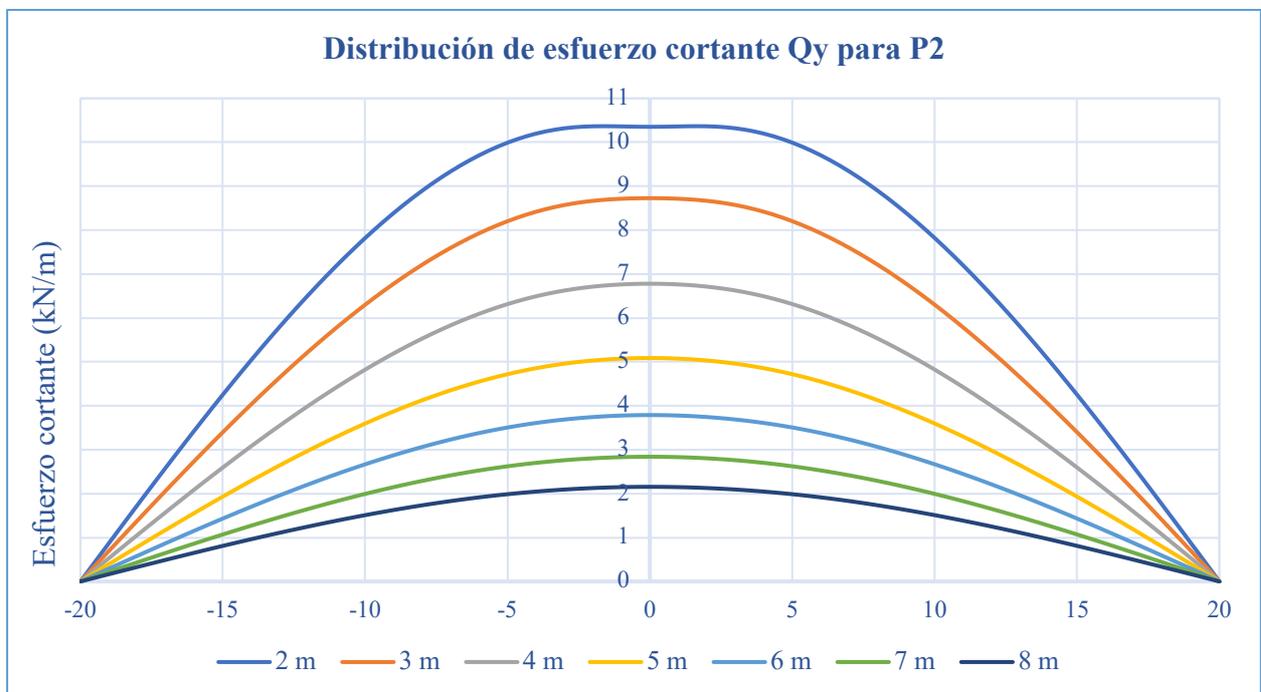


Figura 192. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P2

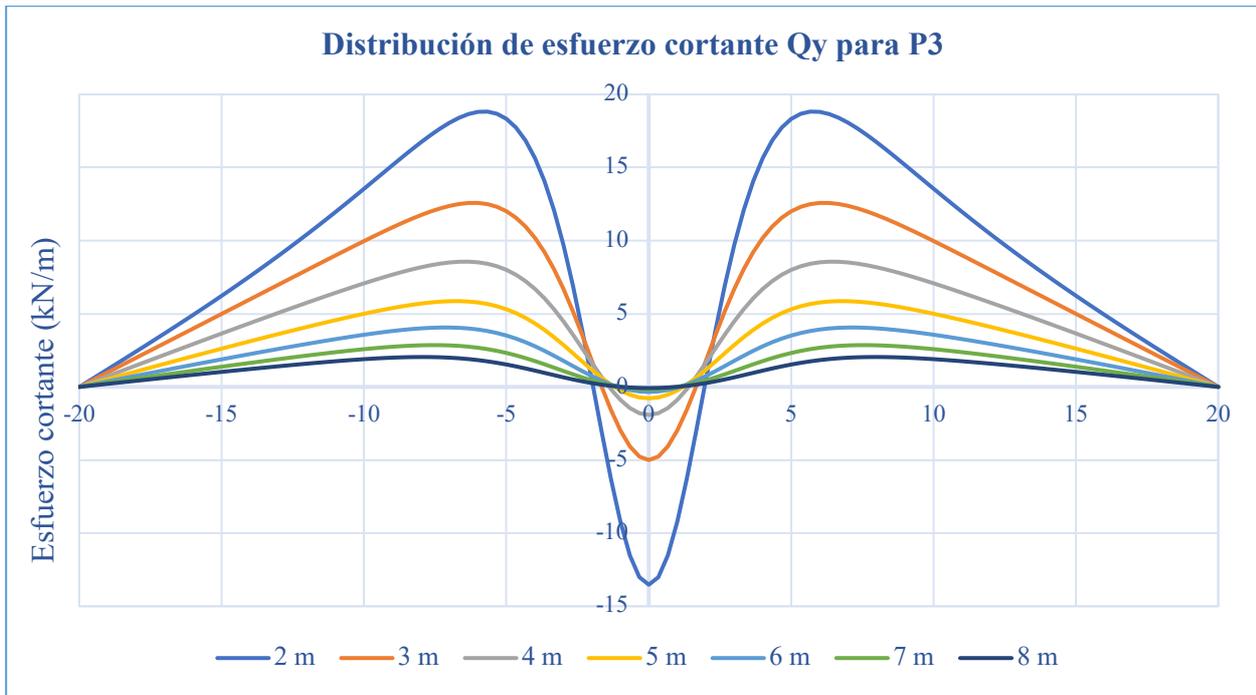


Figura 193. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P3

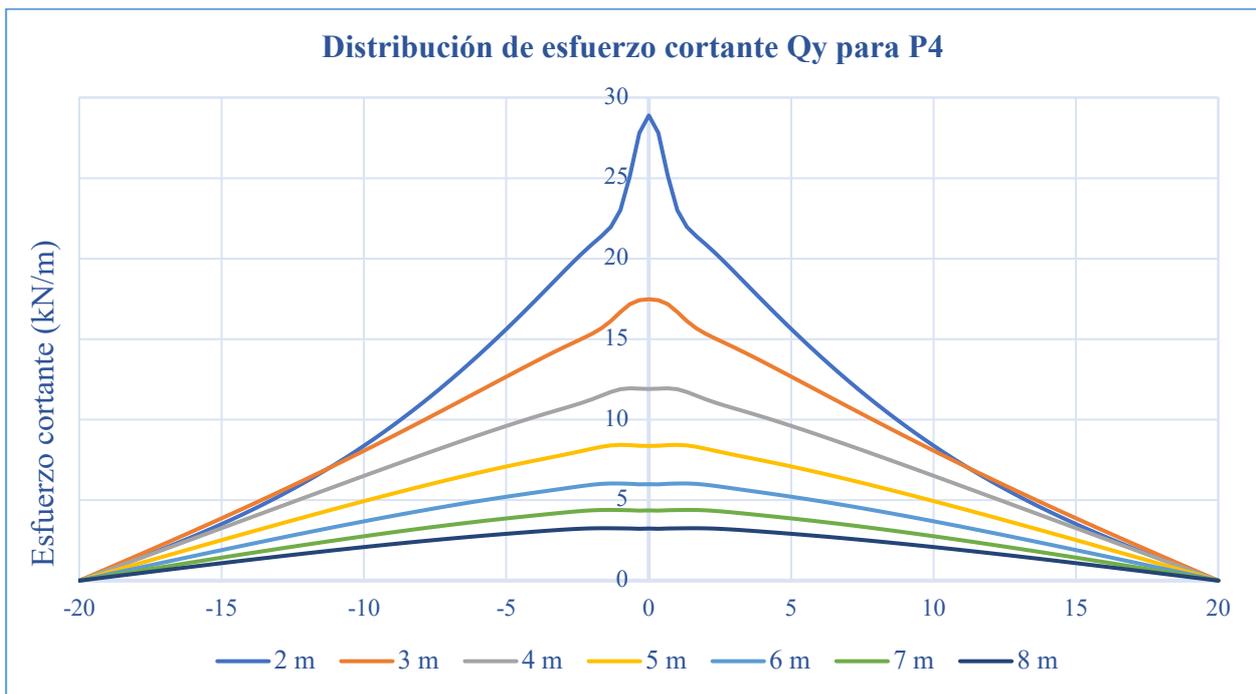


Figura 194. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P4

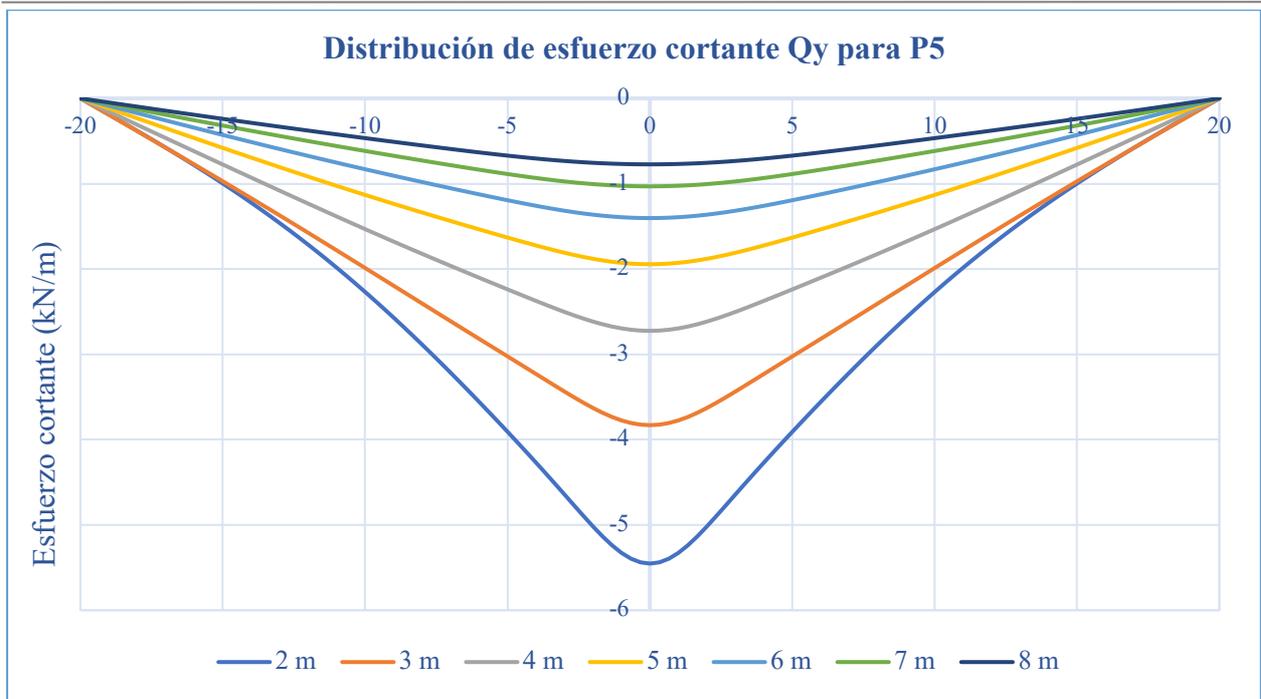


Figura 195. Distribución del momento Q_y según la separación de los cajones para P5

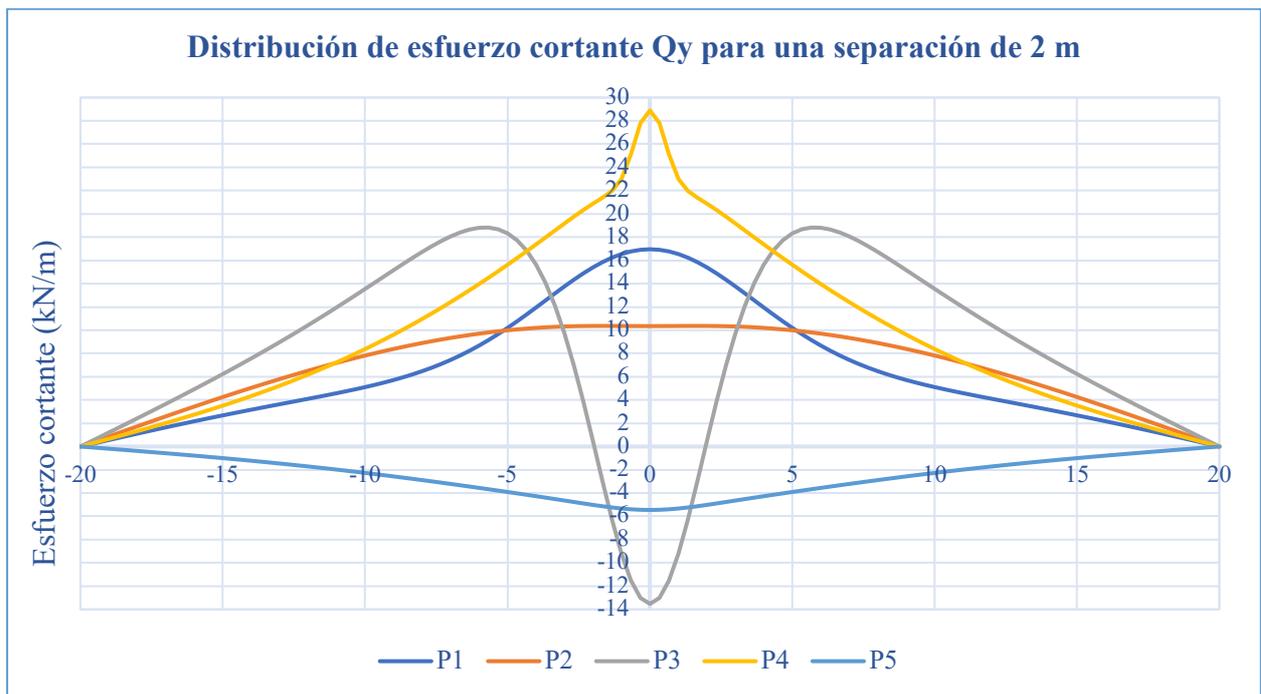


Figura 196. Distribución del momento Q_y según la posición de la carga para una separación de 2 m

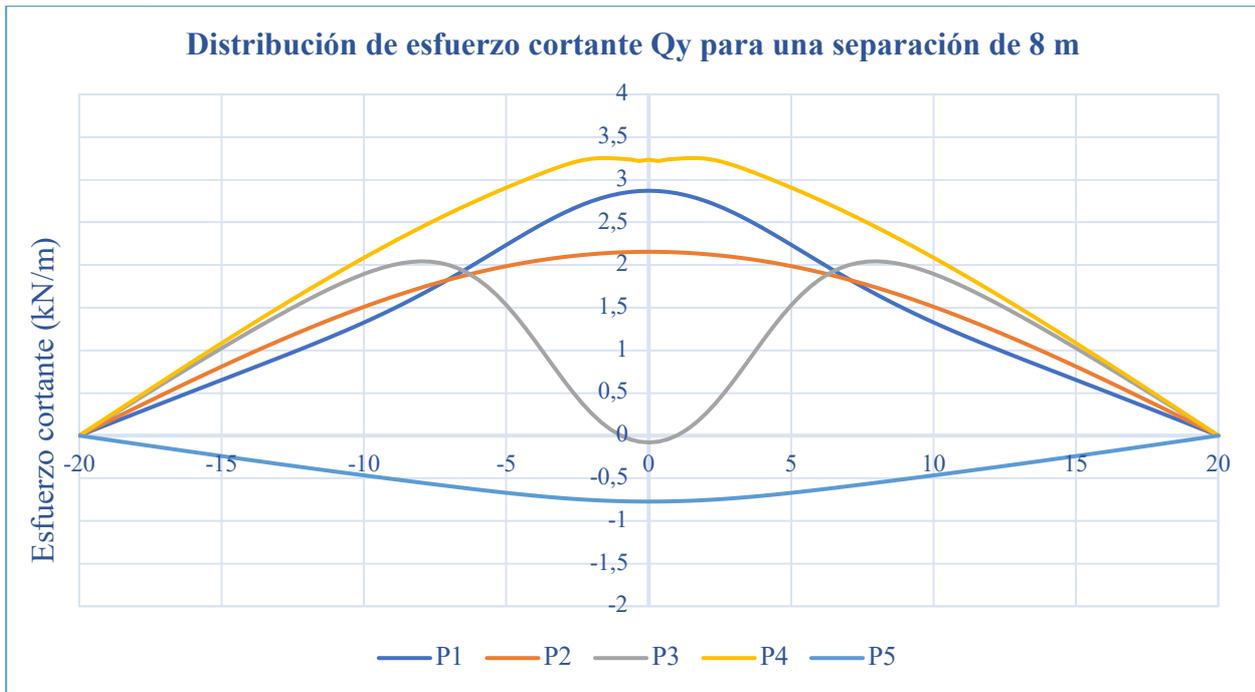


Figura 197. Distribución del momento Q_y según la posición de la carga para una separación de 8 m

De la misma forma, los esfuerzos cortantes Q_y disminuyen cuando aumenta la separación entre los cajones, y el valor máximo se obtiene en la sección central para todos los modelos, a excepción del caso de carga P3 (Figura 193). Para este caso, el efecto local de la carga se aprecia más cuando la separación es menor, pues el punto de aplicación de la carga está más cerca de la sección de estudio, y, por ello, en la sección central se dan momentos negativos, pero no máximos. Los valores máximos se dan a un tercio de los apoyos aproximadamente.

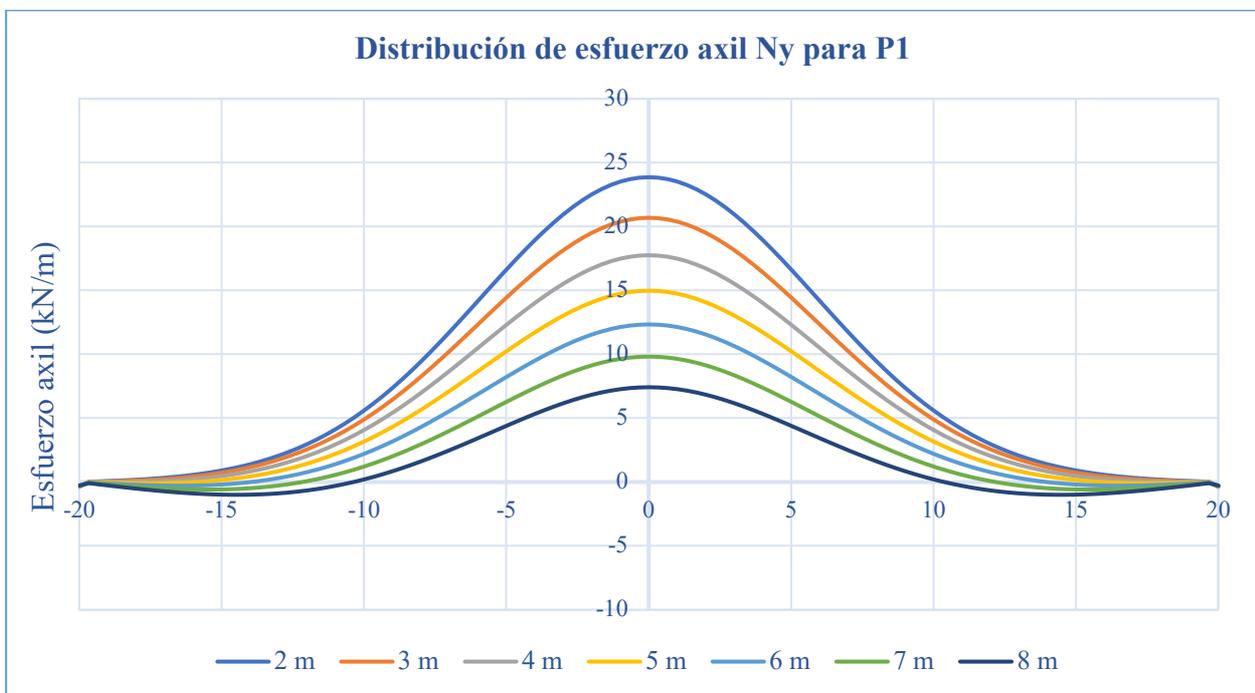


Figura 198. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P1

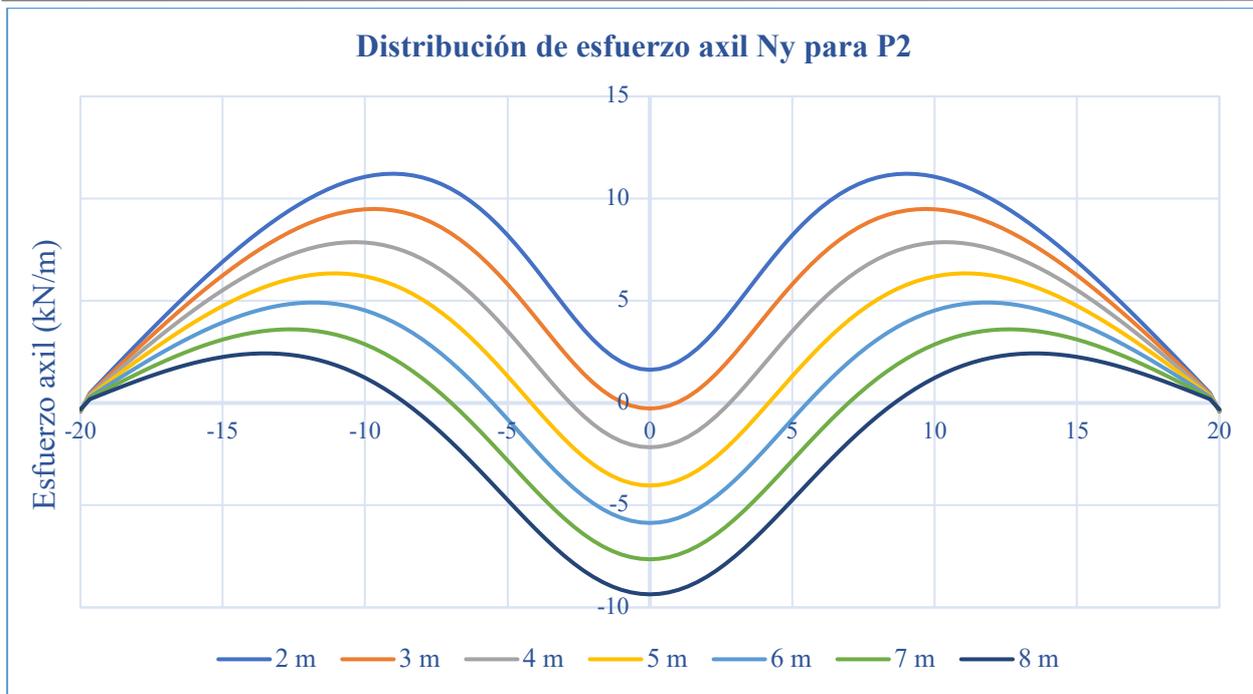


Figura 199. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P2

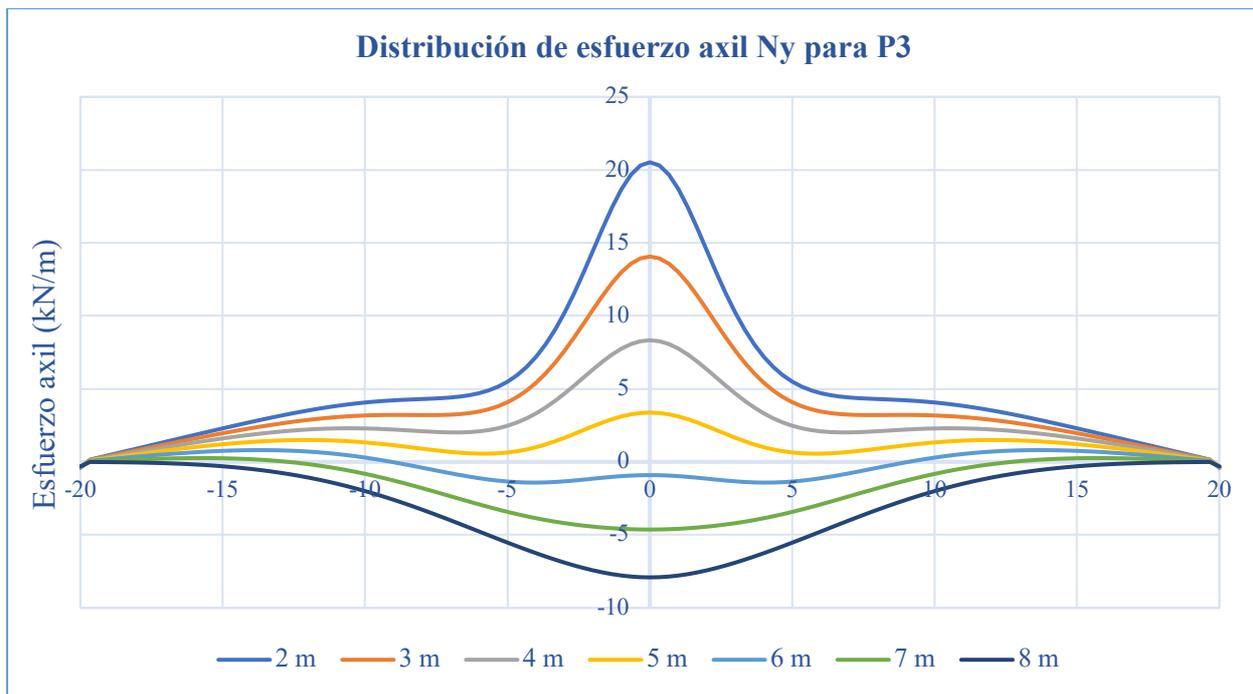
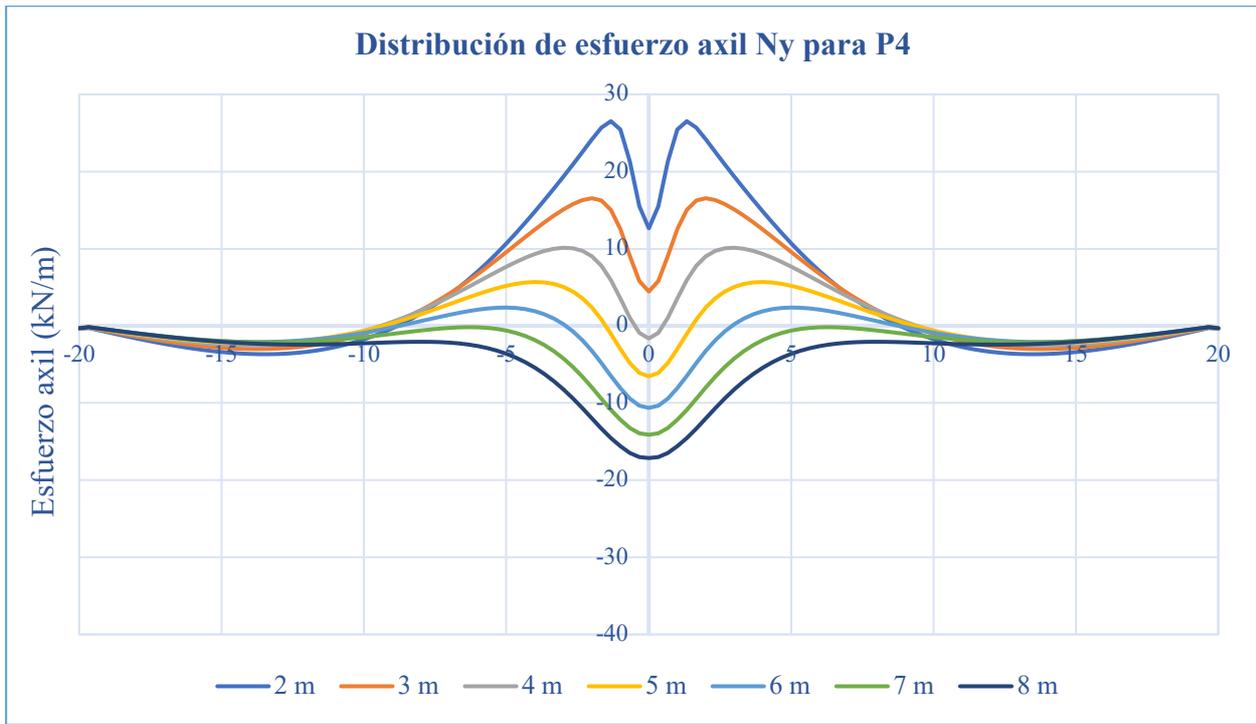
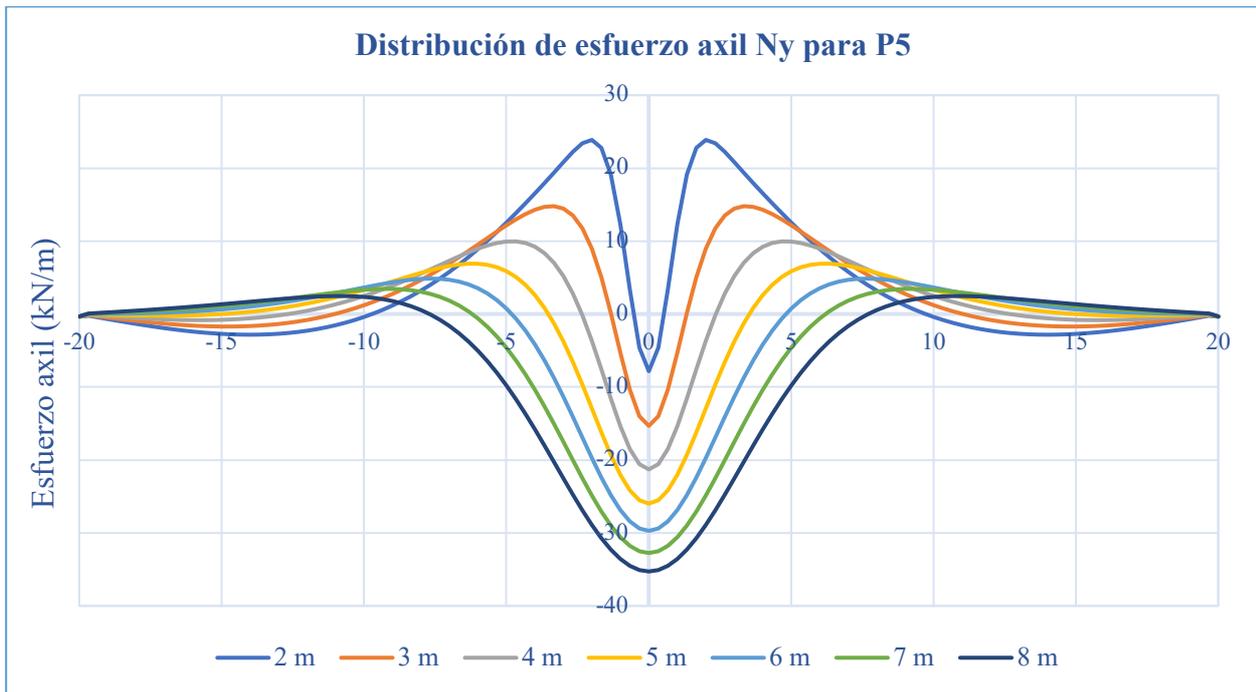


Figura 200. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P3

Figura 201. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P4Figura 202. Distribución del momento N_y según la separación de los cajones para P5

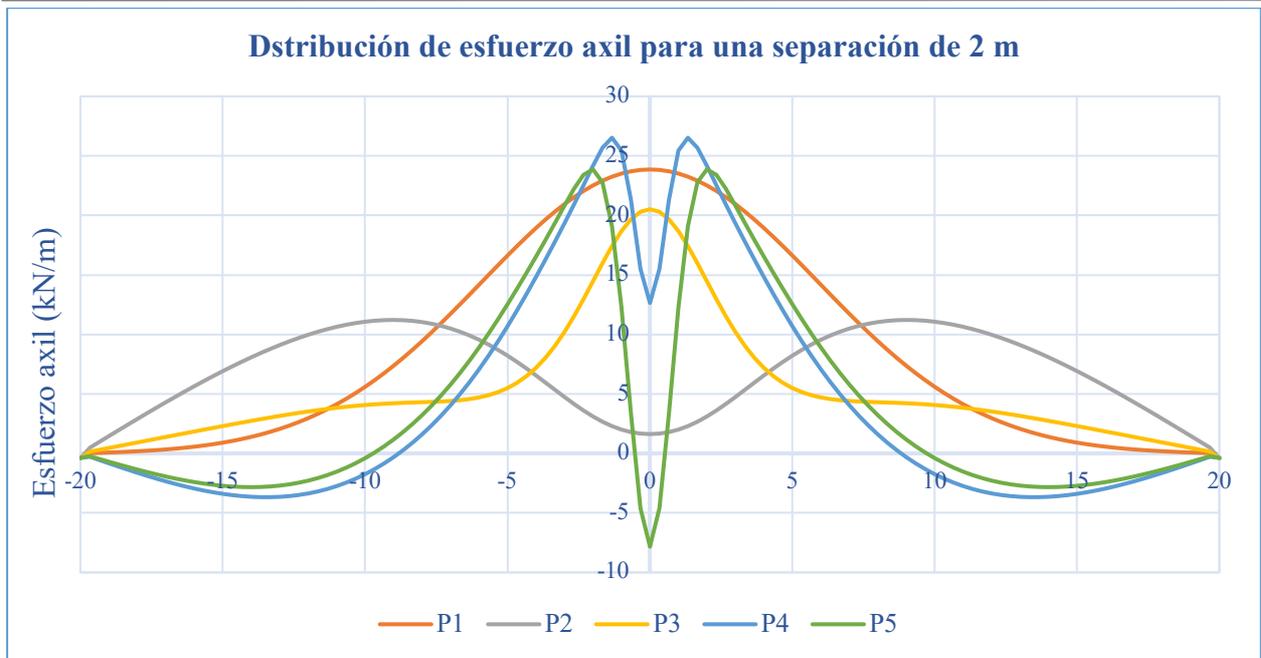


Figura 203. Distribución del momento N_y según la posición de la carga para una separación de 2 m

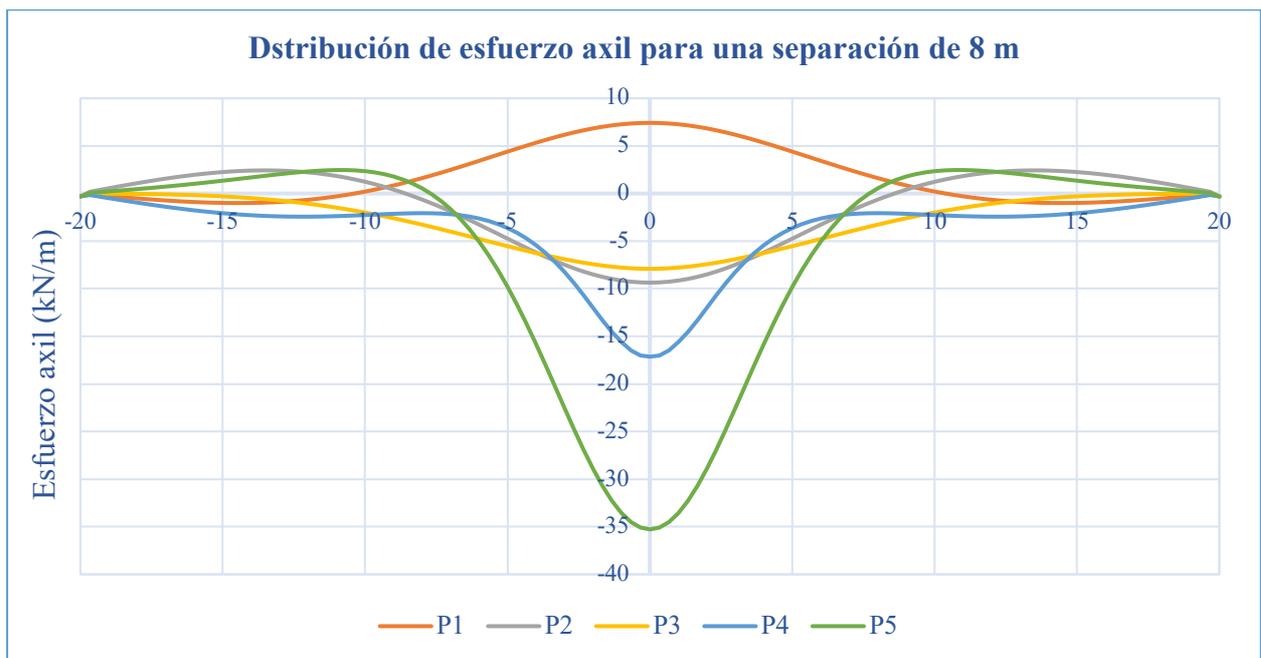
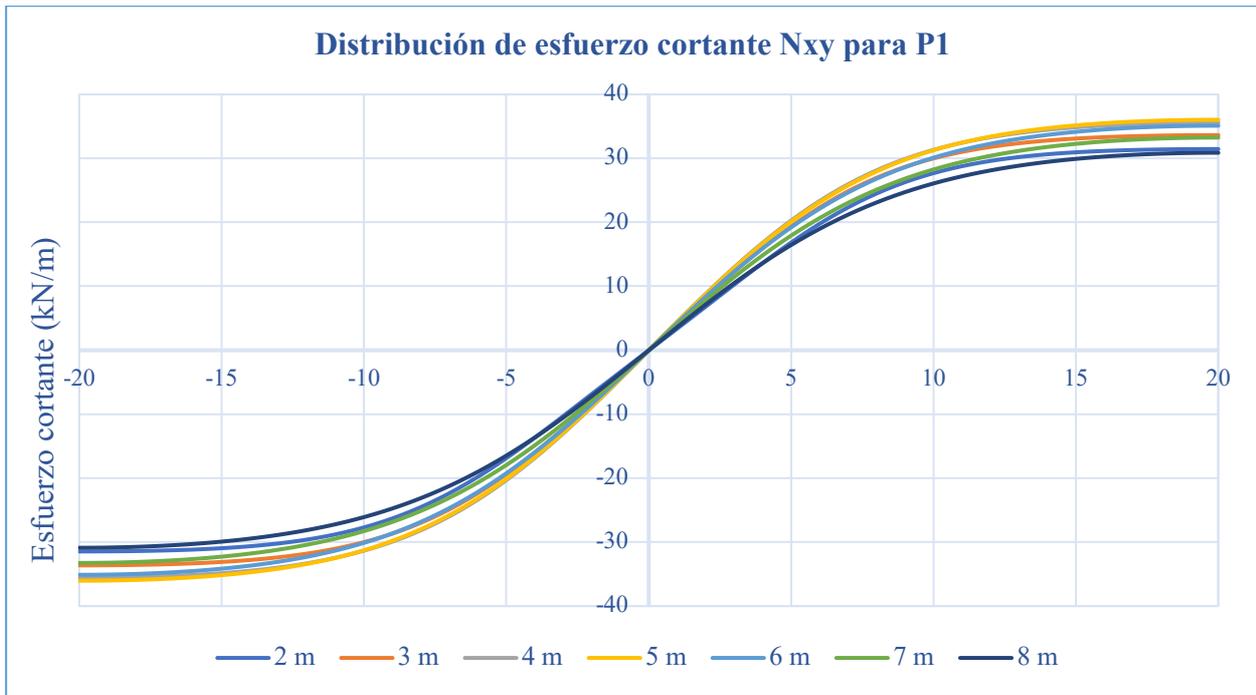
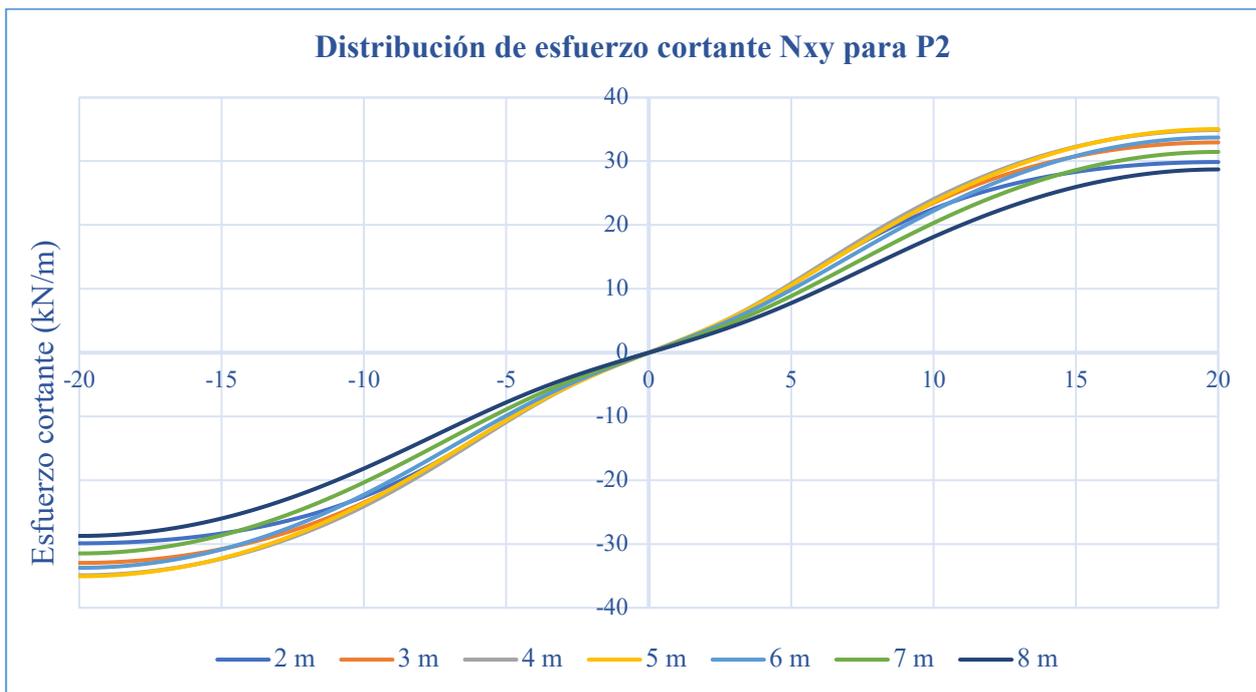


Figura 204. Distribución del momento N_y según la posición de la carga para una separación de 8 m

Al igual que en las distribuciones de esfuerzos estudiadas en este apartado anteriormente, cuando aumenta la separación de los cajones, el esfuerzo axial, que para una separación de 2 metros es positivo, disminuye, hasta llegar al punto en el que los esfuerzos pasan a ser negativos y van aumentando al incrementar la separación.

Figura 205. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P1Figura 206. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P2

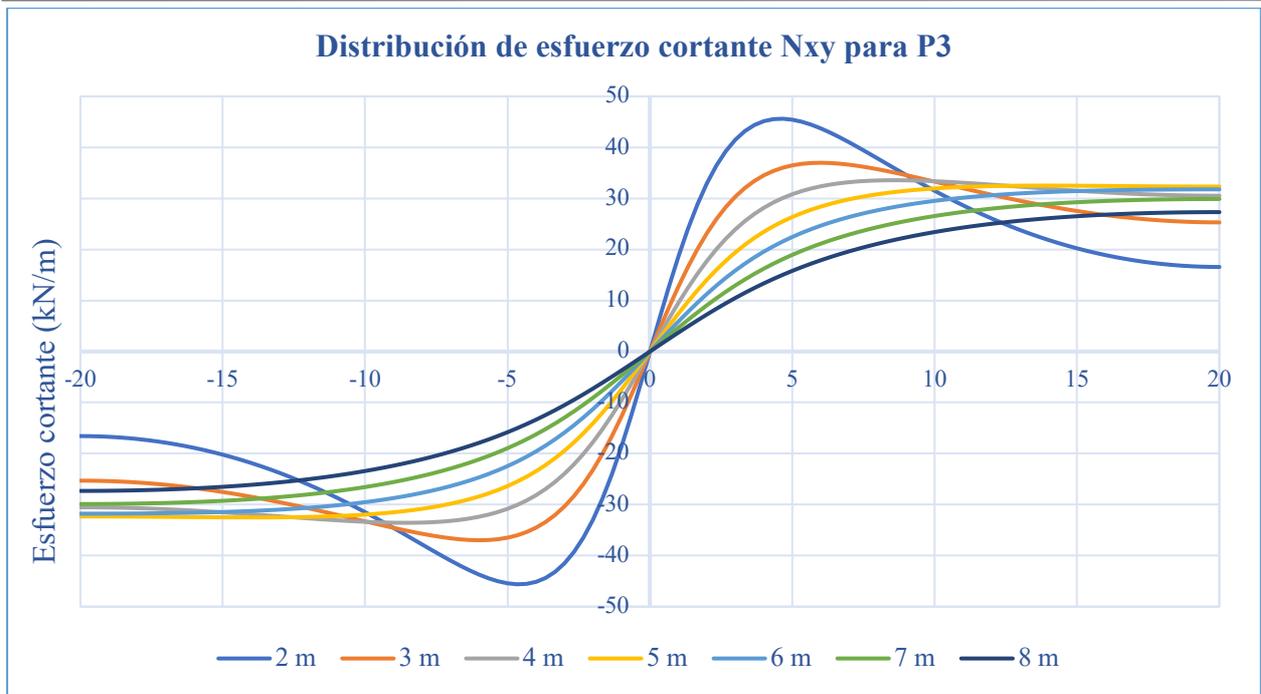


Figura 207. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P3

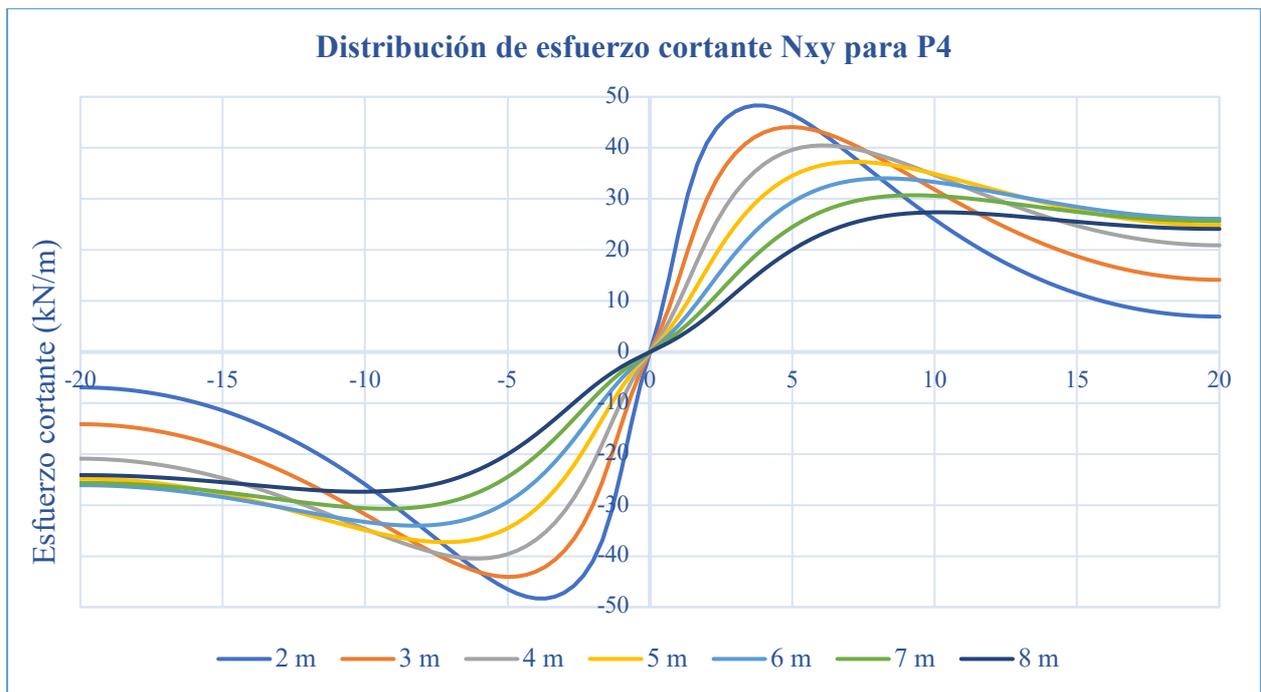


Figura 208. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P4

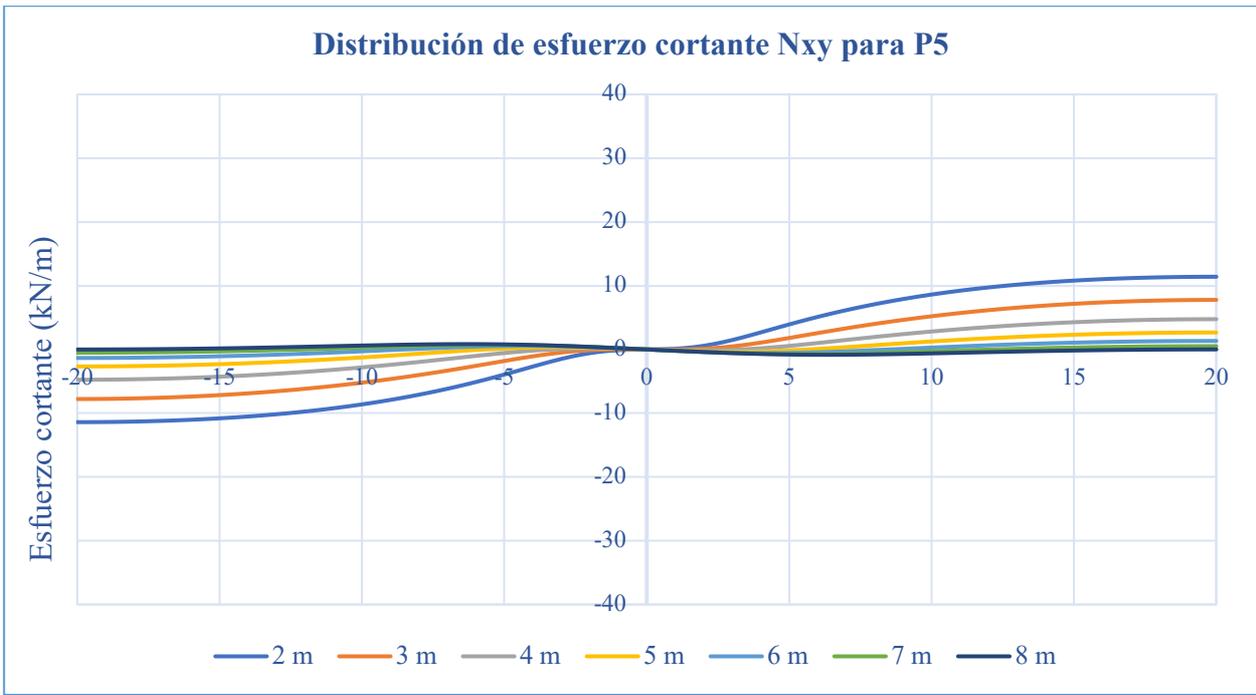


Figura 209. Distribución del momento N_{xy} según la separación de los cajones para P5

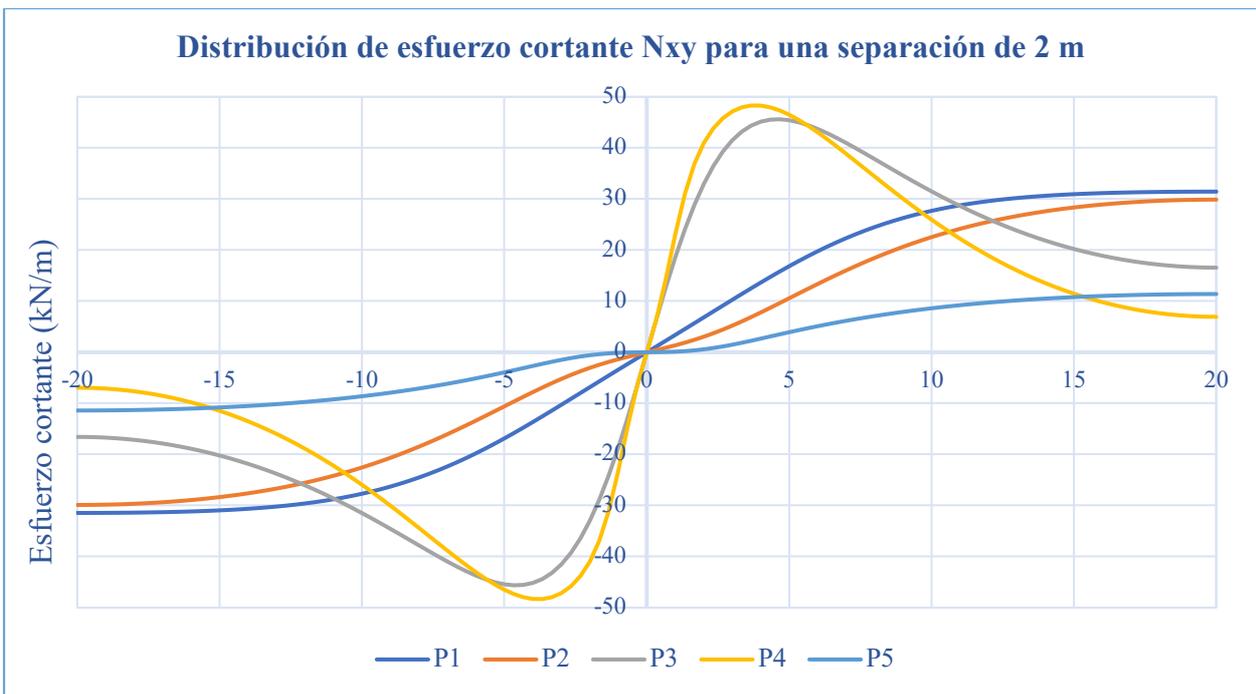


Figura 210. Distribución del momento N_{xy} según la posición de la carga para una separación de 2 m

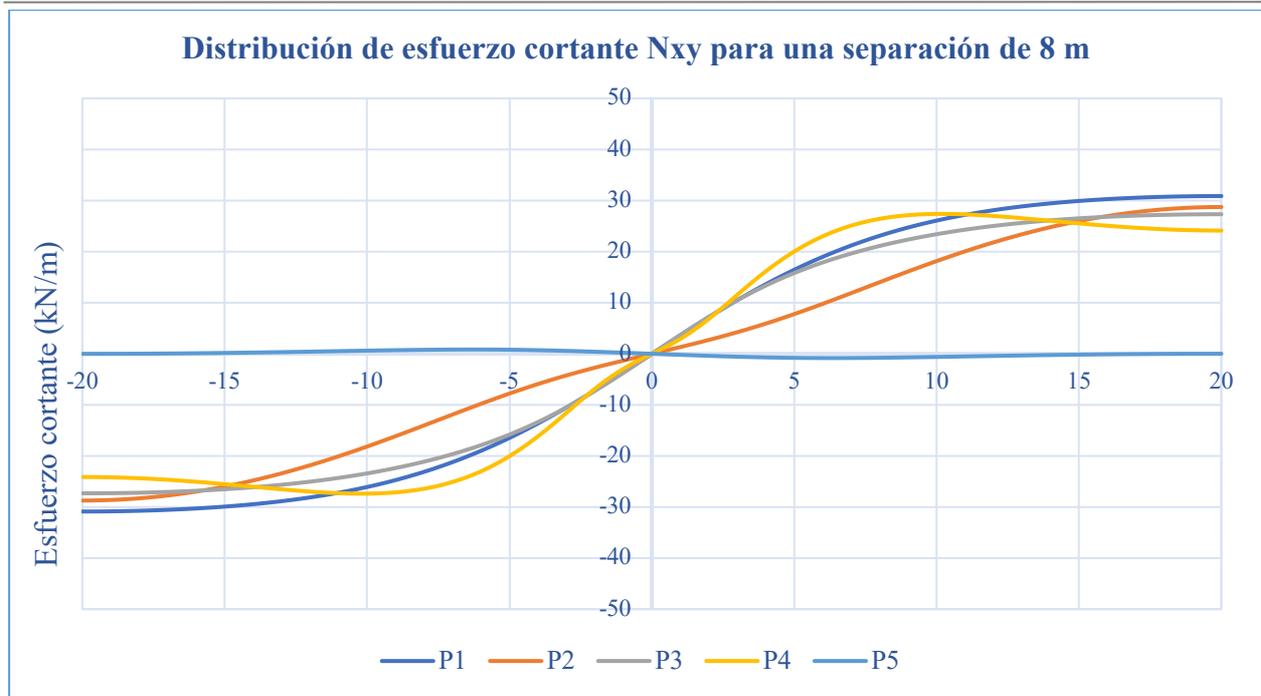


Figura 211. Distribución del momento N_{xy} según la posición de la carga para una separación de 8 m

Cuando la separación entre cajones es pequeña, a medida que el punto de aplicación de la carga se va acercando a la sección longitudinal central, los esfuerzos máximos se van acercando al centro, de modo que para las cargas más alejadas del centro el valor máximo se da en los extremos y para las cargas más cercanas al centro, el valor máximo se da aproximadamente a tres octavos de los extremos.

Sin embargo, cuando la separación entre cajones es mayor, los valores máximos de los esfuerzos axiales se dan en los extremos para todas las posiciones de carga, a excepción de la carga P4, que tiene su máximo a un tercio del extremo.

Además, cuando el punto de aplicación de la carga está más centrado, el valor máximo disminuye a medida que aumenta la separación entre los cajones, mientras que cuando la carga está más alejada del centro, el valor máximo de N_{xy} va aumentando hasta alcanzar su máximo con una separación de 5 metros. A partir de ese punto, el cortante comienza a disminuir si se sigue incrementando la separación entre cajones.

4.4.2.4 Tensiones

Para el estudio de las tensiones, se analizarán como varían en el nudo 3, al igual que en los casos anteriores, por ser el que está sometido a mayor cambio. Además, se muestran las distribuciones de las tensiones en las secciones transversales centrales de varios casos.

Únicamente se procede a estudiar las tensiones normales porque las tensiones tangenciales apenas varían en los nudos del alma cargada.

A continuación, se representan las variaciones de las tensiones en el nudo 3 según el ancho de los cajones para cada caso de carga.

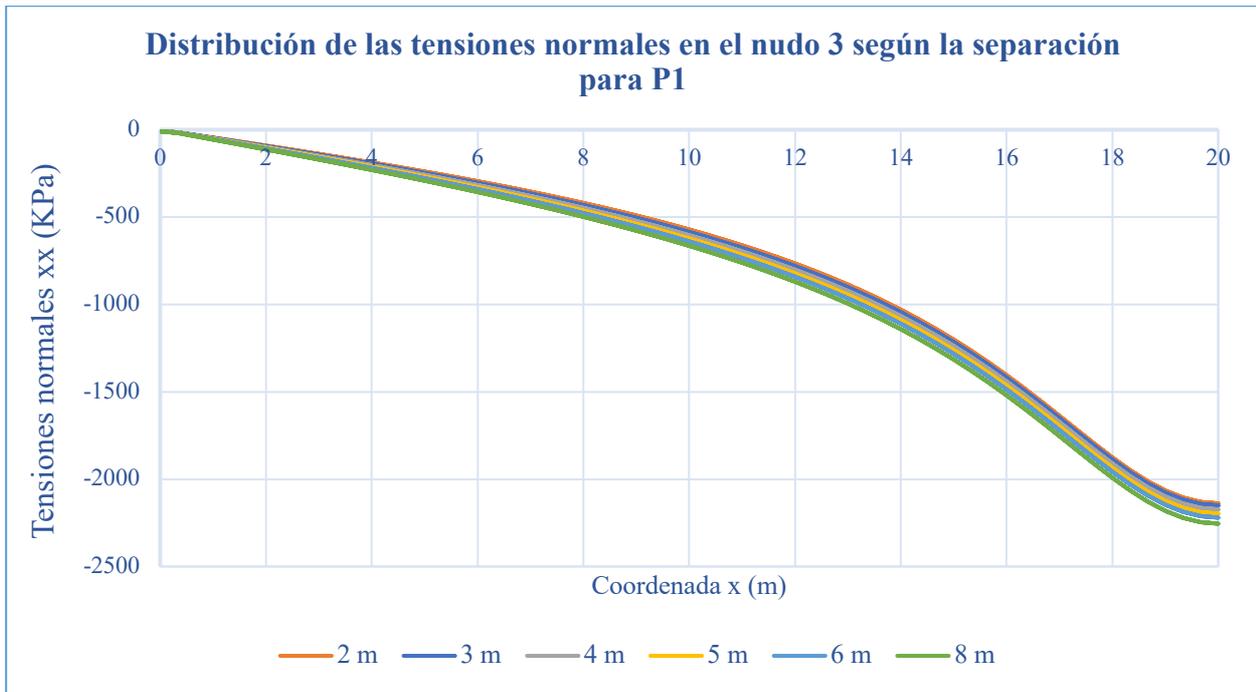


Figura 212. Distribución de las tensiones normales según la separación para P1

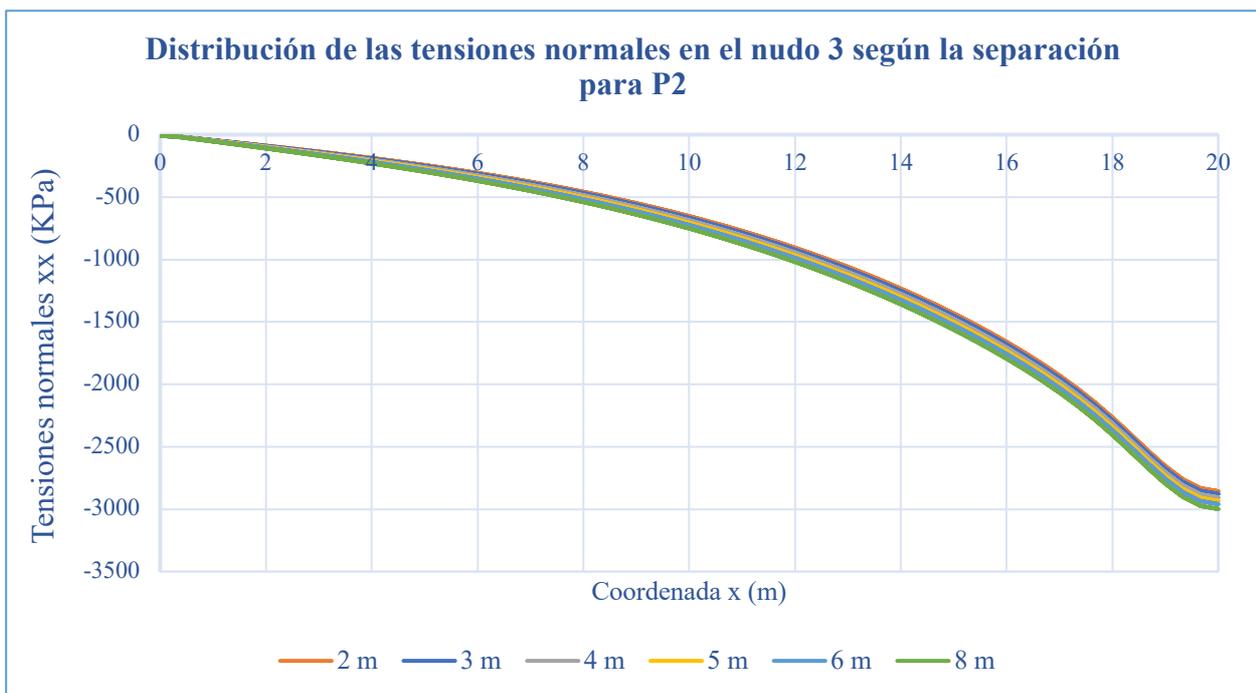


Figura 213. Distribución de las tensiones normales según la separación para P2

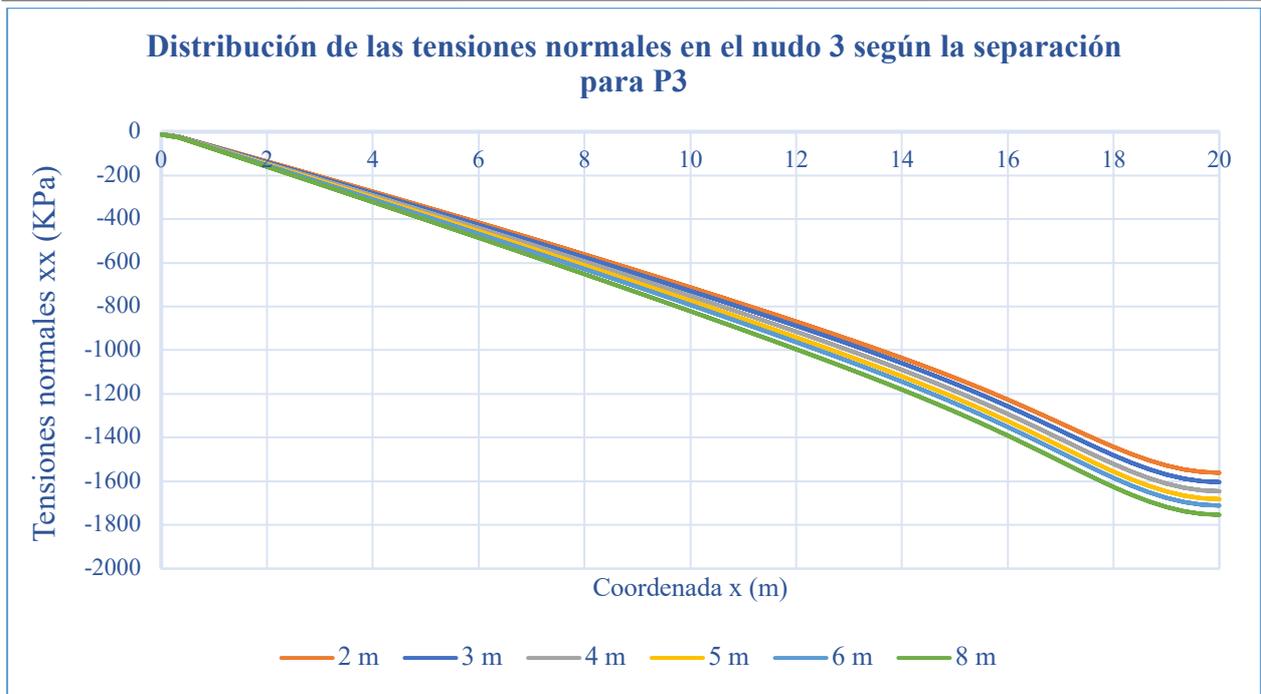


Figura 214. Distribución de las tensiones normales según la separación para P3

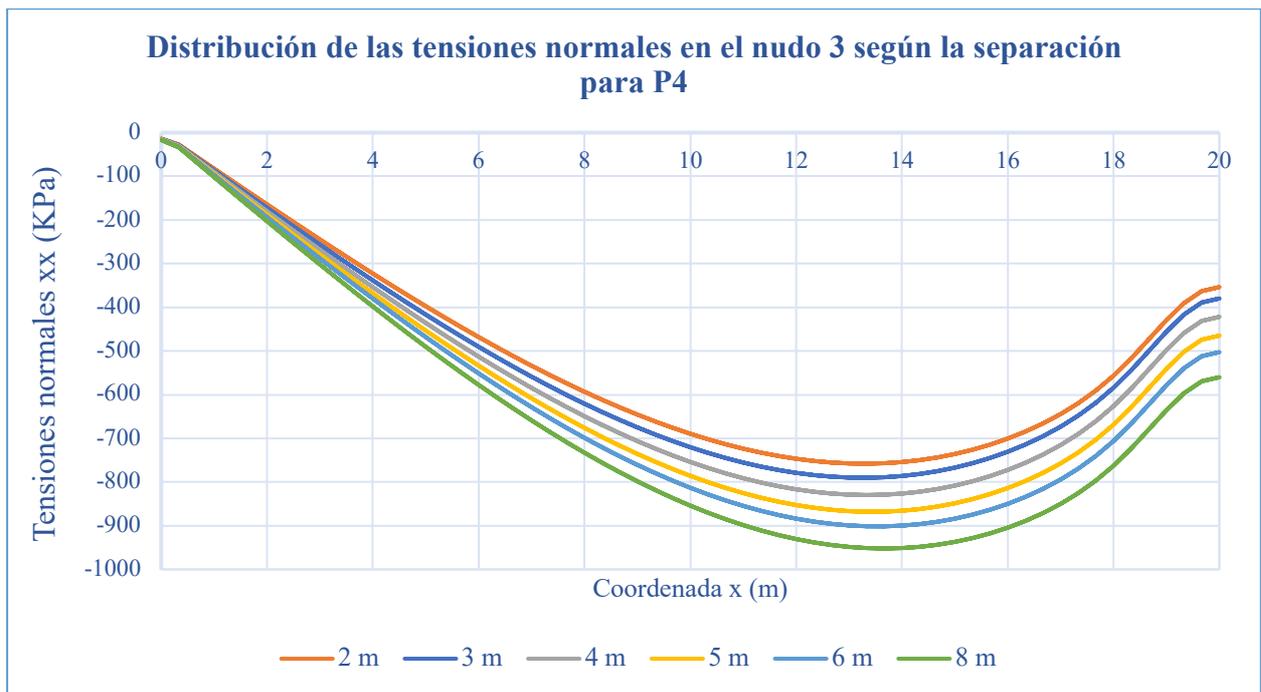


Figura 215. Distribución de las tensiones normales según la separación para P4

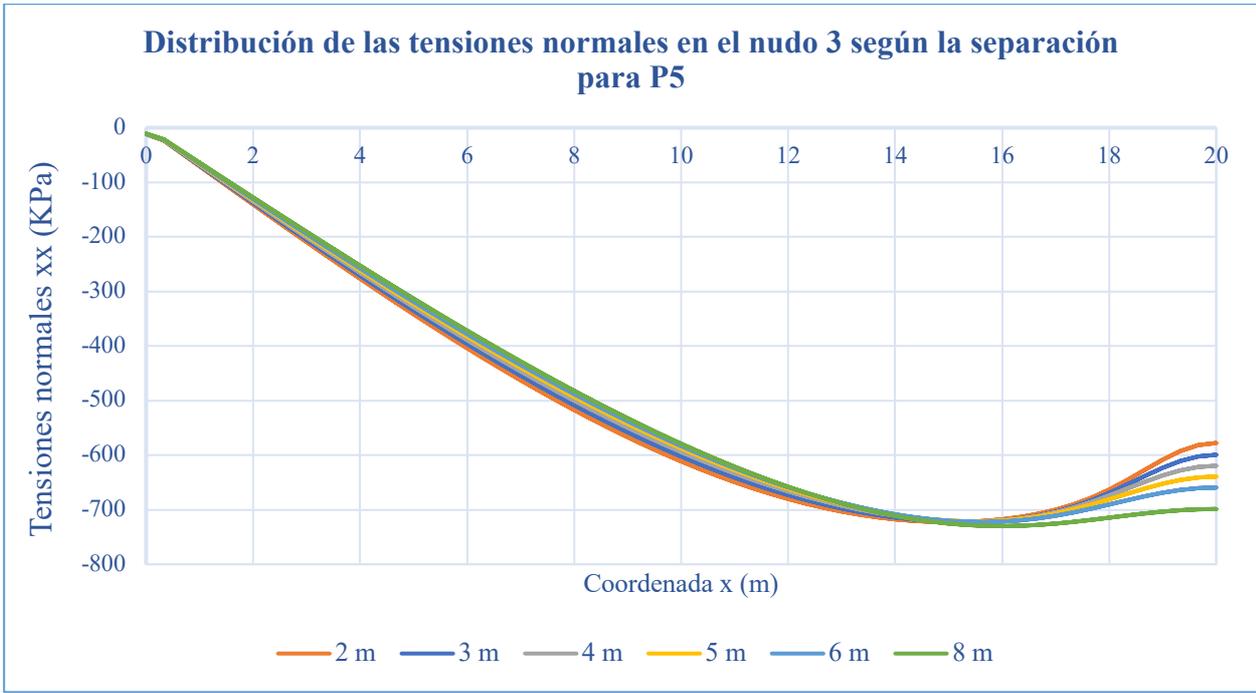


Figura 216. Distribución de las tensiones normales según la separación para P5

Para este último caso, las tensiones normales se ven afectadas por el cambio de la separación de los cajones en la medida de que cuando esta distancia aumenta, las tensiones normales también lo hacen.

Se aprecia que, cuando la carga está más alejada del centro, los valores máximos se dan en el centro del puente, mientras que cuando la carga está más centrada, los máximos se dan en la sección $x = 15$ m aproximadamente.

También cabe destacar que, cuando la carga está totalmente centrada, las tensiones en los extremos del puente son mayores cuando la separación es menor. Sin embargo, a partir de la sección $x = 15$ m esto cambia y las tensiones comienzan a aumentar con la separación.

Por último, se representan las distribuciones de las tensiones en las secciones transversales centrales del modelo de 2 metros de separación, para poder comparar los valores de las tensiones en las situaciones extremas.

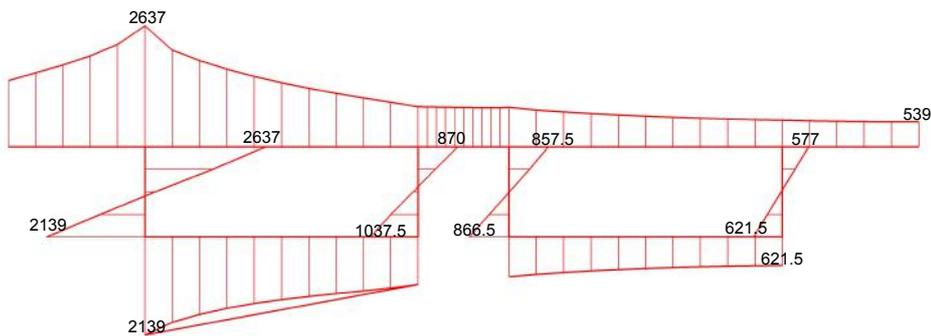


Figura 217. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P1, del modelo de 2 m de separación

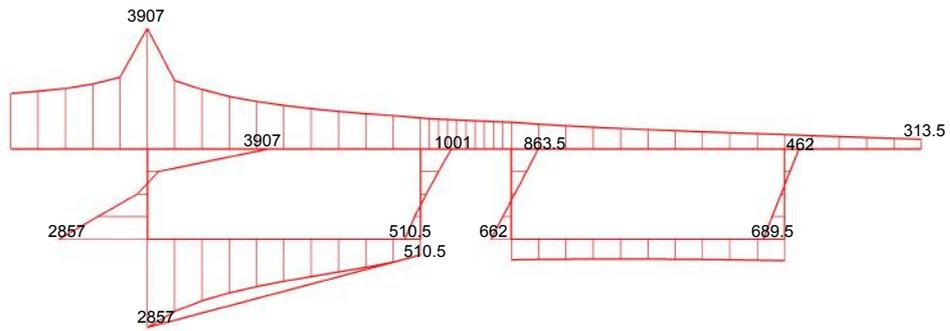


Figura 218. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P2, del modelo de 2 m de separación

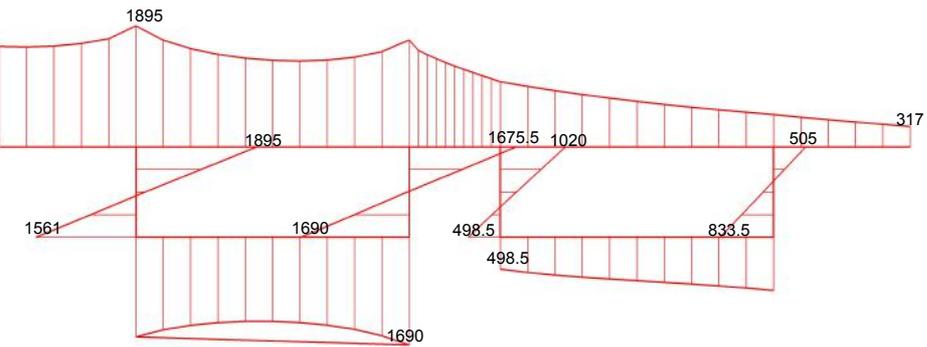


Figura 219. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P3, del modelo de 2 m de separación

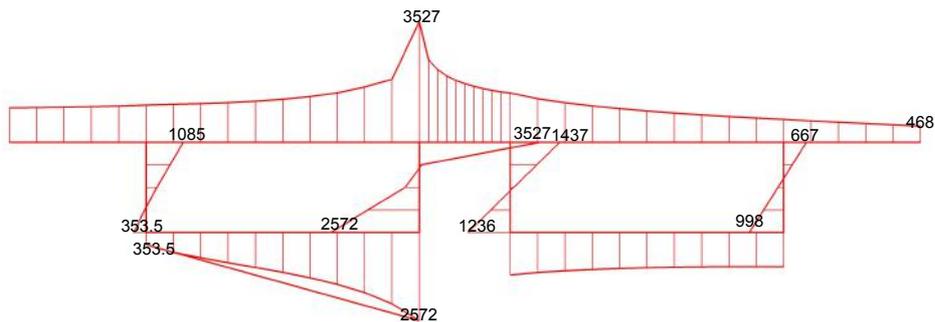


Figura 220. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P4, del modelo de 2 m de separación

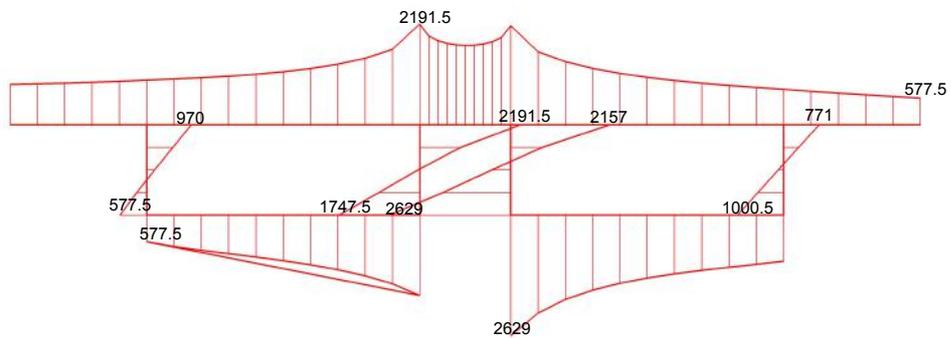


Figura 221. Distribución de (KPa) en la sección $x=20$ m para P5, del modelo de 2 m de separación

5 CONCLUSIONES

En este último capítulo, se realiza un breve resumen de las conclusiones que se han ido obteniendo a lo largo del trabajo al analizar todos los casos propuestos.

Para el primer caso, se analizó la influencia de la luz en el comportamiento de puentes de doble viga cajón. Se ha observado que, para todos los casos de carga estudiados, a medida que aumenta la luz, los desplazamientos también se incrementan y, por tanto, la distorsión también crece. El modelo más sensible frente a estos cambios es el de la carga situada en el extremo, ya que la torsión a la que está sometida el tablero es mayor a medida que aumenta la luz, y como consecuencia, la distorsión aumenta de manera más brusca. Sin embargo, la flecha aumenta con la luz más que la distorsión, por eso cuando aumenta la luz las flechas son más parecidas entre los extremos de la sección central.

Para los esfuerzos Q_y y M_y se aprecia como a medida que aumenta la luz estos también se incrementan. Cuando la carga se acerca al centro se aprecia más el efecto local de la carga y por ello, los esfuerzos son negativos. Para el caso P4, no se aprecia demasiado porque la carga está situada sobre un alma que ejerce de apoyo. Para el caso P5 en concreto, los momentos M_y son mucho más grandes que para el resto de las cargas debido al fuerte efecto local bajo la carga y no dependen de la luz. Por otro lado, el esfuerzo axil N_y apenas varía y el cortante N_{xy} disminuye con la luz. Para este último esfuerzo se observa como el valor máximo se va acercando al centro de la sección a medida que se centra la carga.

En el estudio de las tensiones se ha concluido con que las tensiones normales aumentan con la luz y que las tensiones longitudinales apenas varían en los nudos del alma cargada cuando se modifica esta característica geométrica. Las tensiones también permiten afirmar que hay un mayor reparto de las tensiones cuando aumenta la luz.

En el segundo caso, se modificó la inclinación de las almas para conocer la sensibilidad que tiene esta característica geométrica en el comportamiento del puente. Los desplazamientos disminuyen a medida que aumenta la inclinación de las almas para todos los casos de carga. Sin embargo, para la distorsión si influye en gran medida la posición de la carga, siendo la inclinación óptima para cada caso: 90° para P1, 65° para P2, mayor de 60° para P3, 55° para P4 y 80° para P5.

Los esfuerzos Q_y y M_y disminuyen cuando aumenta la inclinación de las almas. Para el cortante N_{xy} la influencia de la carga se aprecia en mayor medida. Cuando la carga está en P1 o P2, el cortante disminuye al aumentar la inclinación, y para el resto, aumenta.

Para los cinco casos de carga, se obtienen representaciones de la distribución de las tensiones similares. El valor máximo siempre se da en la sección central, a excepción de los modelos con inclinaciones superiores a 70° para los casos de carga P4 y P5, donde la tensión máxima se da en la sección $x=15$ m aproximadamente. Además, estos valores aumentan a medida que se disminuye la inclinación de las almas.

Para el caso 3, donde se modifica el ancho de los cajones se obtienen las siguientes conclusiones. Los desplazamientos máximos disminuyen a medida que aumenta el ancho de los cajones, a excepción del caso de carga P3 donde la flecha máxima aumenta con el ancho porque las almas (que hacen de apoyo) se separan cada vez más del punto de aplicación de la carga.

Al analizar la distorsión se aprecia en gran medida la influencia de la posición de la carga. En todas ellas se produce un balance entre la rigidez a torsión y la flexibilidad de las barras, dependiendo de si estos parámetros aumentan o disminuyen, la distorsión variará de una forma u otra. Cuando la carga está sobre las almas, la distorsión se ve más afectada por la flexibilidad de las barras y, como al aumentar el ancho,

esta aumenta, la distorsión aumenta. Cuando está en el extremo, la distorsión se debe en mayor medida a la torsión producida y, por tanto, cuando aumenta el ancho, aumenta la rigidez a torsión y la distorsión del cajón disminuye. Para los dos casos restantes, se produce un equilibrio entre la disminución que provoca el aumento de la rigidez a torsión y el aumento debido al aumento de la flexibilidad de las barras y, por tanto, permanecen prácticamente constantes.

Para cada caso de carga, se observan comportamientos diferentes en el momento M_y . Para los dos primeros (P1 y P2) cuando el ancho de los cajones es pequeño, los momentos son negativos, mientras que cuando esta medida aumenta, los momentos pasan a ser positivos. Para el tercer caso de carga, todos los momentos son negativos y van aumentando su valor a medida que aumenta el ancho de los cajones. Esto se debe a que, al aumentar el ancho, el punto de aplicación de la carga se aleja cada vez más de las almas, que le sirven de apoyo y, por tanto, los momentos aumentan. En el cuarto caso de carga ocurre al revés que en los primeros, cuando el ancho de los cajones es pequeño, los momentos flectores son positivos y cuando el ancho es más grande, los momentos son negativos. Para el último caso de carga (P5) de nuevo se aprecia el efecto local de la carga, al estudiar la misma sección en la que se ha aplicado esta carga.

El cortante Q_y en todos los modelos se alcanza su máximo en la sección central, siendo menor cuanto menor es el ancho de los cajones, a excepción del caso de carga P3. Para este caso, se puede apreciar el efecto local de la carga que provoca una disminución de los esfuerzos en la parte central. Este efecto influye más cuanto mayor es el ancho de los cajones. Por otro lado, cuando la carga está más alejada del centro de la sección, el cortante N_{xy} va aumentando con el ancho del cajón hasta alcanzar su valor máximo, que se da para un ancho de 5 metros. A partir de ese punto, el cortante comienza a disminuir si se sigue incrementando el ancho. Sin embargo, cuando la carga está más centrada, los esfuerzos aumentan progresivamente a medida que aumenta el ancho del cajón.

Las tensiones normales van disminuyendo con el aumento del ancho del cajón. Sin embargo, en el caso de carga P2, el mínimo se da para el modelo de 6.5 m de ancho, por lo que las tensiones disminuyen con el ancho hasta llegar a los 6.5 m, a partir de los cuales, las tensiones comienzan a aumentar de nuevo.

En el último caso se estudia la influencia de la separación entre los cajones. Se deduce que la flecha va aumentando lentamente conforme va aumentando esta distancia. Sin embargo, al igual que ocurría en el caso anterior con P3, la flecha máxima cuando la carga está situada en el centro aumenta más rápido ya que las almas se separan cada vez más del punto de aplicación de la carga.

En el análisis de la distorsión se aprecia que mientras que para el caso de carga P4 la distorsión aumenta, para los demás casos disminuye.

Además, se aprecia como a medida que aumenta la separación entre cajones, los esfuerzos M_y y Q_y disminuyen. Para el esfuerzo axial, que para una separación de 2 metros es positivo, cuando aumenta la separación de los cajones disminuye, hasta llegar al punto en el que los esfuerzos pasan a ser negativos y van aumentando al incrementar la separación.

Cuando la separación entre cajones es pequeña, a medida que el punto de aplicación de la carga se va acercando a la sección longitudinal central, los esfuerzos N_{xy} máximos se van acercando al centro, de modo que para las cargas más alejadas del centro el valor máximo se da en los extremos y para las cargas más cercanas al centro, el valor máximo se da aproximadamente a tres octavos de los extremos. Sin embargo, cuando la separación entre cajones es mayor, los valores máximos de los esfuerzos axiales se dan en los extremos para todas las posiciones de carga, a excepción de la carga P4, que tiene su máximo a un tercio del extremo.

Para este último caso, las tensiones normales se ven afectadas por el cambio de la separación de los cajones en la medida de que cuando esta distancia aumenta, las tensiones normales también lo hacen. Además, se aprecia que, cuando la carga está más alejada del centro, los valores máximos se dan en el centro del puente, mientras que cuando la carga está más centrada, los máximos se dan en la sección $x=15m$ aproximadamente. También cabe destacar que, cuando la carga está totalmente centrada, las tensiones en

los extremos del puente son mayores cuando la separación es menor. Sin embargo, a partir de la sección $x=15\text{m}$ esto cambia y las tensiones comienzan a aumentar con la separación.

Una vez analizado el comportamiento del puente frente a los distintos cambios realizados se da por concluido el trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción – Javier Manterola (2006)
- [2] Trabajo de Fin de Grado – Carmen Marín Rodríguez
- [3] Midas Civil
- [4] AutoCad
- [5] Microsoft Excel