

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Influencia del esviaje en la respuesta estructural de
tableros de vigas de hormigón

Autor: Jesús Pruna Vega

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Influencia del esviaje en la respuesta estructural de tableros de vigas de hormigón

Autor:
Jesús Pruna Vega

Tutor:
Antonio Martínez de la Concha
Profesor titular

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Influencia del esviaje en la respuesta estructural de tableros de vigas de hormigón

Autor: Jesús Pruna Vega

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, 2020

El Secretario del Tribunal

A mis padres Jesús y Bienve

A mi Herma

Agradecimientos

Agradecido a mis padres, Jesús y Bienve, por su educación y dedicación, por brindarme la oportunidad de realizar una carrera universitaria, por mostrarme su apoyo y por aguantarme en las épocas de agobio.

Agradecido a mi Hermo por las risas y buenos ratos.

A mi tía Ana, por los ánimos y por no dejar que me faltara ni un apunte para estudiar.

A mis profesores, por cada clase impartida y por los conocimientos que sé a día de hoy sobre la Ingeniería. En especial a mi tutor Antonio Martínez de la Concha por su implicación, trato y enseñanzas.

El objeto de este trabajo consiste en examinar cómo influye la oblicuidad del contorno en el comportamiento resistente de los tableros de puente. Para ello, se analizan los diferentes parámetros que intervienen en la respuesta resistente del tablero ante la acción de una solicitación tales como flecha, momento flector, momento torsor y tensiones desarrolladas.

En primer lugar, se debe definir un modelo que refleje, en la mayor medida de lo posible, el comportamiento de puentes de vigas con tablero oblicuo. Este modelo se concibe a partir del estudio realizado en el capítulo VII “El tablero oblicuo” del libro “Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I” de Javier Manterola Ármisen. Para la realización del estudio se ha empleado el software Midas Civil.

Una vez corroborado la validez del modelo, se realizan los puentes oblicuos de 0° , 15° , 30° , 45° y 60° y se procede a la obtención de resultados para cada modelo. Estos serán analizados y presentados en una serie de gráficas y tablas para facilitar su comprensión. Por último se realiza una recopilación de las conclusiones establecidas en base a los diferentes análisis realizados

Si bien, la influencia del esviaje se traduce, principalmente, en una torsión impuesta al tablero en la zona de los apoyos, se pretende examinar cómo afecta este acoplamiento entre la flexión y la torsión al resto de variables que intervienen en el comportamiento resistente del mismo.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xx
Notación	xxv
1 Introducción	1
2 Definición del modelo	3
2.1. <i>Modelo de Javier Manterola</i>	3
2.2. <i>Modelo de Midas Civil</i>	4
2.2.1 Tipología Estructural	4
2.2.2 Materiales	7
2.2.3 Propiedades de la sección	7
2.2.4 Condiciones de contorno	9
2.2.5 Cargas	11
2.2.6 Resultados	11
3 Influencia del esviaje en la respuesta estructural	19
3.1 <i>Corrimientos verticales</i>	20
3.1.1 Carga Puntual 1	21
3.1.2 Carga Puntual 3	22
3.1.3 Carga Puntual 4	23
3.1.4 Conclusiones	24
3.1.5 Análisis comparativo de la flecha de las vigas cargadas: Carga puntual	24
3.1.6 Carga Distribuida	25
3.1.7 Análisis comparativo de la flecha de las vigas cargadas: Carga distribuida	26
3.2 <i>Corrimientos verticales máximos</i>	27
3.2.1 Carga Puntual 1	28
3.2.2 Carga Puntual 3	29
3.2.3 Carga Puntual 4	30
3.2.4 Conclusiones	31
3.2.5 Carga Distribuida	31
3.3 <i>Corrimientos horizontales</i>	33
3.3.1 Carga Puntual 1	33
3.3.2 Carga Puntual 3	34
3.3.3 Carga Puntual 4	35
3.3.4 Carga Distribuida	36
3.3.5 Conclusiones	37
3.4 <i>Análisis del momento flector longitudinal</i>	37
3.4.1 Carga Puntual 1	37
3.4.2 Carga Puntual 3	38
3.4.3 Carga Puntual 4	40

3.4.4	Carga Distribuida	41
3.4.5	Conclusiones	42
3.5	<i>Momento flector longitudinal</i>	43
3.5.1	Carga Puntual 1	43
3.5.2	Carga Puntual 3	44
3.5.3	Carga Puntual 4	45
3.5.4	Conclusiones	46
3.5.5	Análisis comparativo de los momentos flectores longitudinales de las vigas cargadas	46
3.5.6	Carga Distribuida	47
3.5.7	Análisis comparativo de los momentos flectores longitudinales de las vigas cargadas. Carga distribuida	48
3.6	<i>Momento flector longitudinal máximo</i>	49
3.6.1	Carga Puntual 1	49
3.6.2	Carga Puntual 3	50
3.6.3	Carga Puntual 4	51
3.6.4	Conclusiones	52
3.6.5	Carga Distribuida	52
3.6.6	Conclusiones	53
3.7	<i>Tensiones</i>	54
3.7.1	Carga Puntual 1	54
3.7.2	Carga Puntual 3	56
3.7.3	Carga Puntual 4	58
3.7.4	Conclusiones	59
3.7.5	Carga Distribuida	60
3.8	<i>Momento flector transversal (sección central)</i>	62
3.8.1	Carga Puntual 1	62
3.8.2	Carga Puntual 3	63
3.8.3	Carga Puntual 4	64
3.8.4	Carga Distribuida	65
3.8.5	Conclusion	65
3.9	<i>Momento flector transversal (sección de apoyos)</i>	66
3.9.1	Carga Puntual 1	66
3.9.2	Carga Puntual 3	67
3.9.3	Carga Puntual 4	68
3.9.4	Conclusiones	68
3.9.5	Carga Distribuida	69
3.10	<i>Momento torsor transversal. (Sección central)</i>	70
3.10.1	Carga Puntual 1	70
3.10.2	Carga Puntual 3	71
3.10.3	Carga Puntual 4	72
3.10.4	Carga Distribuida	73
3.11	<i>Momento torsor transversal (sección en apoyos)</i>	74
3.11.1	Carga Puntual 1	74
3.11.2	Carga Puntual 3	75
3.11.3	Carga Puntual 4	76
3.11.4	Carga Distribuida	77
3.12	<i>Momento torsor longitudinal</i>	78
3.12.1	Carga Puntual 1	78
3.12.2	Carga Puntual 3	80
3.12.3	Carga Puntual 4	82
3.12.4	Conclusiones	83
3.12.5	Carga Distribuida	84
4	Conclusiones	87

5 Análisis Futuros

88

Referencias

89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Comparación entre el modelo 2D y 3D según el estudio realizado por G.A. Rombach.	6
Tabla 2.2: Propiedades del hormigón HP-40.	7
Tabla 2.3: Comparación de corrimientos verticales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	15
Tabla 2.4: Comparación de los momentos flectores máximos longitudinales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	15
Tabla 2.5: Comparación de corrimientos de la sección 1-1 entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	15
Tabla 2.6: Comparación de la ley de momentos transversales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	16
Tabla 2.7: Comparación de reacciones entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	16
Tabla 2.8: Comparación de corrimientos verticales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	16
Tabla 2.9: Comparación de los momentos flectores máximos longitudinales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	17
Tabla 2.10: Comparación de corrimientos de la sección 1-1 entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	17
Tabla 2.11: Comparación de la ley de momentos transversales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	17
Tabla 2.12: Comparación de reacciones entre los modelos Manterola, 2D y 3D.	17
Tabla 3.1: Desplazamiento vertical de cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP1.	21
Tabla 3.2: Relación de desplazamientos verticales para la viga cargada y su contigua. CP1.	21
Tabla 3.3: Desplazamiento vertical de cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP3.	22
Tabla 3.4: Relación de desplazamientos verticales para la viga cargada y sus contiguas. CP3.	22
Tabla 3.5: Desplazamiento vertical de cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP4.	23
Tabla 3.6: Relación de desplazamientos verticales para la viga cargada y su contigua. CP4.	23
Tabla 3.7: Relación entre el desplazamiento de la viga cargada según el esviaje respecto al puente sin esviaje. CP.	24
Tabla 3.8: Desplazamiento vertical de cada viga en la sección central ortogonal al eje longitudinal. CD.	25
Tabla 3.9: Relación de desplazamientos verticales para la viga cargada y su contigua. CD.	25
Tabla 3.10: Relación entre el desplazamiento de la viga cargada según el esviaje respecto al puente sin esviaje. CD.	26
Tabla 3.11: Desplazamiento vertical máximo de cada viga. CP1.	28
Tabla 3.12: Relación de desplazamientos verticales máximos para la viga cargada y su contigua. CP1.	28
Tabla 3.13: Desplazamiento vertical máximo de cada viga. CP3.	29
Tabla 3.14: Relación de desplazamientos verticales máximos para la viga cargada y sus contiguas. CP3.	29
Tabla 3.15: Desplazamiento vertical máximo de cada viga. CP4.	30
Tabla 3.16: Relación de desplazamientos verticales máximos para la viga cargada y su contigua. CP4.	30
Tabla 3.17: Desplazamiento vertical máximo de cada viga. CD.	32
Tabla 3.18: Relación de desplazamientos verticales máximos para la viga cargada y su contigua. CD.	32
Tabla 3.19: Desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP1.	33
Tabla 3.20: Desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP3.	34
Tabla 3.21: Desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP4.	35
Tabla 3.22: Desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de cada viga en la sección ortogonal al eje longitudinal situada en mitad del vano. CD.	36

Tabla 3.23: Momento flector longitudinal de cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP1.	43
Tabla 3.24: Relación de los momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua. CP1.	43
Tabla 3.25: Momento flector longitudinal de cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP3.	44
Tabla 3.26: Relación de los momentos flectores longitudinales para la viga cargada y sus contiguas. CP3.	44
Tabla 3.27: Momento flector longitudinal de cada viga en la sección donde se aplica de la carga. CP4.	45
Tabla 3.28: Relación de los momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua. CP4.	45
Tabla 3.29: Relación entre los momentos flectores longitudinales de la viga cargada según el esviaje respecto al puente sin esviaje. CP.	46
Tabla 3.30: Momento flector longitudinal de cada viga en la sección central ortogonal al eje longitudinal. CD.	47
Tabla 3.31: Relación de los momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua. CD.	47
Tabla 3.32: Relación entre los momentos flectores longitudinales de la viga cargada según el esviaje respecto al puente sin esviaje. CD.	48
Tabla 3.33: Momento flector longitudinal máximo. CP1.	49
Tabla 3.34: Relación de momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua. CP1.	49
Tabla 3.35: Momento flector longitudinal máximo. CP3.	50
Tabla 3.36: Relación de momentos flectores longitudinales para la viga cargada y sus contiguas. CP3.	50
Tabla 3.37: Momento flector longitudinal máximo. CP4.	51
Tabla 3.38: Relación de momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua. CP4.	51
Tabla 3.39: Momento flector longitudinal máximo. CD.	52
Tabla 3.40: Relación de momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua. CD.	53
Tabla 3.41: Tensión asociada a la sección donde se aplica la carga. CP1.	55
Tabla 3.42: Tensión asociada a la sección donde se aplica la carga. CP3.	57
Tabla 3.43: Tensión asociada a la sección donde se aplica la carga. CP4.	59
Tabla 3.44: Tensión asociada a la sección central ortogonal al eje longitudinal. CD.	61
Tabla 3.45: Momento flector transversal para el caso de carga puntual 1.	62
Tabla 3.46: Momento flector transversal para el caso de carga puntual 3.	63
Tabla 3.47: Momento flector transversal para el caso de carga puntual 4.	64
Tabla 3.48: Momento flector transversal para el caso de carga distribuida.	65
Tabla 3.49: Momento flector transversal asociado a la zona del apoyo. CP1.	66
Tabla 3.50: Momento flector transversal asociado a la zona del apoyo. CP3.	67
Tabla 3.51: Momento flector transversal asociado a la zona del apoyo. CP4.	68
Tabla 3.52: Momento flector transversal asociado a la zona del apoyo. CD.	69
Tabla 3.53: Momento torsor transversal para el caso de carga puntual 1.	70
Tabla 3.54: Momento torsor transversal para el caso de carga puntual 3.	71
Tabla 3.55: Momento torsor transversal para el caso de carga puntual 4.	72
Tabla 3.56: Momento torsor transversal para el caso de carga distribuida.	73
Tabla 3.57: Momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo para el caso de carga puntual 1.	74
Tabla 3.58: Incremento del momento torsor transversal respecto al puente sin esviaje. CP1.	74
Tabla 3.59: Momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo para el caso de carga puntual 3.	75
Tabla 3.60: Incremento del momento torsor transversal respecto al puente sin esviaje. CP3.	75
Tabla 3.61: Momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo para el caso de carga puntual 4.	76
Tabla 3.62: Incremento del momento torsor transversal respecto al puente sin esviaje. CP4.	76

Tabla 3.63: Momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo para el caso de carga distribuida.	77
Tabla 3.64: Incremento del momento torsor transversal respecto al puente sin esviaje.CD.	77
Tabla 3.65: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo. CP1.	78
Tabla 3.66: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho. CP1.	79
Tabla 3.67: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo. CP3.	80
Tabla 3.68: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho. CP3.	81
Tabla 3.69: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo. CP4.	82
Tabla 3.70: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho. CP4.	83
Tabla 3.71: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo. CD.	84
Tabla 3.72: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho. CD.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: La vía impone la necesidad del empleo de un tablero oblicuo. Puente Oblicuo de Madrid Río sobre el cauce del Manzanares.	1
Figura 2.1: Geometría transversal del modelo seleccionado por J.Manterola para la realización de su análisis.	3
Figura 2.2: Geometría longitudinal del modelo seleccionado por J.Manterola para la realización de su análisis.	3
Figura 2.3: Posible localización de las vigas transversales según el estudio realizado por G.A. Rombach.	4
Figura 2.4: Casos de carga según el estudio realizado por G.A. Rombach.	5
Figura 2.5: Resultados del modelo 2D según el estudio realizado por G.A. Rombach.	5
Figura 2.6: Resultados del modelo 3D según el estudio realizado por G.A. Rombach.	6
Figura 2.7: Tipología estructural emparrillado.	7
Figura 2.8: Detalle sobre las diferentes secciones transversales.	8
Figura 2.9: Distribución de tensiones en un perfil de pared delgada.	8
Figura 2.10: Geometría transversal del modelo Midas Civil.	9
Figura 2.11: Geometría en planta del modelo Midas Civil.	9
Figura 2.12: Vista isométrica del modelo Midas Civil.	9
Figura 2.13: Condiciones de contorno en los apoyos.	9
Figura 2.14: Beam end offset en vigas transversales según el estudio realizado por G.A. Rombach .	10
Figura 2.15: Beam end offset en vigas transversales.	10
Figura 2.16: Rigid link en diagonales.	10
Figura 2.17: Sobrecarga distribuida a lo largo de las vigas longitudinales.	11
Figura 2.18: Corrimientos verticales obtenidos por Manterola.	11
Figura 2.19: Corrimientos verticales del modelo 2D obtenidos por Midas Civil.	12
Figura 2.20: Corrimientos verticales del modelo 3D obtenidos por Midas Civil.	12
Figura 2.21: Leyes de momentos flectores longitudinales obtenidas por Manterola.	12
Figura 2.22: Leyes de momentos flectores longitudinales del modelo 2D obtenidas por Midas Civil.	12
Figura 2.23: Leyes de momentos flectores longitudinales del modelo 3D obtenidas por Midas Civil.	13
Figura 2.24: Corrimientos sección 1-1 obtenidos por Manterola.	13
Figura 2.25: Corrimientos sección del modelo 2D obtenidos por Midas Civil.	13
Figura 2.26: Corrimientos sección del modelo 3D obtenidos por Midas Civil.	13
Figura 2.27: Leyes de momentos flectores transversales obtenidas por Manterola.	14
Figura 2.28: Leyes de momentos flectores transversales del modelo 2D obtenidas por Midas Civil.	14
Figura 2.29: Leyes de momentos flectores transversales del modelo 3D obtenidas por Midas Civil.	14
Figura 2.30: Reacciones en apoyos obtenidas por Manterola.	14
Figura 2.31: Reacciones en apoyos del modelo 2D obtenidas por Midas Civil.	15
Figura 2.32: Reacciones en apoyos del modelo 3D obtenidas por Midas Civil.	15
Figura 2.33: Diferencia de número de elementos entre el modelo de Manterola y el modelo de Midas Civil.	18
Figura 3.1: Distribución de los diferentes tipos de carga puntual.	19
Figura 3.2: Solicitación de sobrecarga distribuida.	19
Figura 3.3: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical en la sección donde se aplica de la carga. CP1.	21
Figura 3.4: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical en la sección donde se aplica de la carga. CP3.	22

Figura 3.5: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical en la sección donde se aplica de la carga. CP4.	23
Figura 3.6: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical para cada viga cargada. CP.	24
Figura 3.7: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical en la sección central ortogonal al eje longitudinal. CD.	25
Figura 3.8: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical para cada viga cargada. CD.	26
Figura 3.9: Desplazamiento vertical máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 30°.	27
Figura 3.10: Desplazamiento vertical máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 60°.	27
Figura 3.11: Desplazamiento vertical máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 30°.	27
Figura 3.12: Desplazamiento vertical máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 60°.	27
Figura 3.13: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical máximo. CP1.	28
Figura 3.14: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical máximo cada viga. CP3.	29
Figura 3.15: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical máximo cada viga. CP4.	30
Figura 3.16: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical máximo cada viga. CD.	31
Figura 3.17: Influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.	33
Figura 3.18: Influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.	34
Figura 3.19: Influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.	35
Figura 3.20: Influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de cada viga en la sección ortogonal al eje longitudinal situada en mitad del vano.	36
Figura 3.21: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente sin esviaje.	37
Figura 3.22: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente de esviaje 15°.	37
Figura 3.23: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente de esviaje 30°.	38
Figura 3.24: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente de esviaje 45°.	38
Figura 3.25: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente de esviaje 60°.	38
Figura 3.26: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente sin esviaje.	39
Figura 3.27: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 15°.	39
Figura 3.28: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 30°.	39
Figura 3.29: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 45°.	39
Figura 3.30: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 60°.	39
Figura 3.31: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente sin esviaje.	40
Figura 3.32: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente de esviaje 15°.	40
Figura 3.33: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente de esviaje 30°.	40
Figura 3.34: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente de esviaje 45°.	40
Figura 3.35: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente de esviaje 60°.	41
Figura 3.36: My máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente sin esviaje.	41
Figura 3.37: My máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 15°.	41
Figura 3.38: My máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 30°.	41
Figura 3.39: My máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 45°.	42
Figura 3.40: My máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 60°.	42

Figura 3.41: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal en la sección donde se aplica de la carga. CP1.	43
Figura 3.42: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal en la sección donde se aplica de la carga. CP3.	44
Figura 3.43: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal en la sección donde se aplica de la carga. CP4.	45
Figura 3.44: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal para cada viga cargada. Carga puntual	46
Figura 3.45: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal en la sección central ortogonal al eje longitudinal. CD.	47
Figura 3.46: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal para cada viga cargada: Carga distribuida.	48
Figura 3.47: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal máximo. CP1.	49
Figura 3.48: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal máximo. CP3.	50
Figura 3.49: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal máximo. CP4.	51
Figura 3.50: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal máximo. CD.	52
Figura 3.51: Tensión máxima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga. CP1.	54
Figura 3.52: Tensión mínima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga. CP1.	55
Figura 3.53: Tensión máxima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga. CP3.	56
Figura 3.54: Tensión mínima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga. CP3.	56
Figura 3.55: Tensión máxima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga. CP4.	58
Figura 3.56: Tensión mínima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga. CP4.	58
Figura 3.57: Tensión máximo asociada a la sección transversal en la sección central ortogonal al eje longitudinal. CD.	60
Figura 3.58: Tensión mínimo asociada a la sección transversal en la sección central ortogonal al eje longitudinal. CD.	60
Figura 3.59: Influencia del esviaje en el momento flector transversal de la sección donde se aplica la carga. CP1.	62
Figura 3.60: Influencia del esviaje en el momento flector transversal de la sección donde se aplica la carga. CP3.	63
Figura 3.61: Influencia del esviaje en el momento flector transversal de la sección donde se aplica la carga. CP4.	64
Figura 3.62: Influencia del esviaje en el momento flector transversal de la sección donde se aplica la carga. CD.	65
Figura 3.63: Influencia del esviaje en el momento flector transversal asociado a la zona del apoyo. CP1.	66
Figura 3.64: Influencia del esviaje en el momento flector transversal asociado a la zona del apoyo. CP3.	67
Figura 3.65: Influencia del esviaje en el momento flector transversal asociado a la zona del apoyo. CP4.	68
Figura 3.66: Influencia del esviaje en el momento flector transversal asociado a la zona del apoyo. CD.	69
Figura 3.67: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal donde se aplica la carga. CP1.	70
Figura 3.68: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal donde se aplica la carga. CP3.	71
Figura 3.69: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal donde se aplica la carga. CP4.	72
Figura 3.70: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal donde se aplica la carga. CD.	73
Figura 3.71: Influencia del esviaje en el momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo. CP1.	74
Figura 3.72: Influencia del esviaje en el momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo. CP3.	75
Figura 3.73: Influencia del esviaje en el momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo. CP4.	76
Figura 3.74: Influencia del esviaje en el momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo. CD.	77
Figura 3.75: Sección longitudinal seleccionada para el análisis del momento torsor longitudinal.	78
Figura 3.76: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo. CP1.	78
Figura 3.77: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho. CP1.	79
Figura 3.78: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo. CP3.	80

Figura 3.79: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho. CP3.	81
Figura 3.80: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo. CP4.	82
Figura 3.81: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho. CP4.	83
Figura 3.82: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo. CD.	84
Figura 3.83: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho. CD.	85

Notación

CP	Carga puntual
CD	Carga distribuida
Dy	Desplazamiento horizontal
Dz	Desplazamiento vertical
I	Inercia
kg	Kilogramo
Mpa	MegaPascal
Mx	Momento torsor
My	Momento flector
m	Metro
mm	Milimetro
Ton	Tonelada
°	Grado
σ	Tensión

1 INTRODUCCIÓN

«Los puentes simbolizan ideales y aspiraciones de la humanidad. Salvan las barreras que nos separan y juntan pueblos, comunidades y naciones en unidades más íntimas. Acortan distancias, aceleran el transporte y facilitan el comercio. Soportan sus cargas para aligerar las tareas de los hombres »

- David B. Steinman^[1] -

El objeto último de la ingeniería civil radica en la concepción y construcción de elementos que se insertan en el territorio y cuyo fin es solventar una necesidad de la sociedad^[2]. Es así como el concepto “puente” se atribuye a una construcción que permite salvar un accidente geográfico como un río, un valle, una carretera o cualquier otro obstáculo físico.

Cada puente se diseña según la función, peso, vientos dominantes y naturaleza del terreno donde se cimenta, en consecuencia existen numerosas tipologías estructurales en función de las solicitaciones que afectan al mismo: puente viga, puente en ménsula, puente en arco, puente atirantado, puente colgado.

A su vez, la morfología y dimensionamiento del puente se analizan con objeto de optimizar el comportamiento resistente en base a reducir los costes del mismo. De nuevo encontramos una amplia posibilidad de resolución: puentes de vigas, puentes losa, empleo de secciones cajón, tableros mixtos, tableros curvos u oblicuos, etc.

Habida cuenta de que la vía impone sus condiciones, tales como anchura, altura, peraltes, trazado en planta; en el presente se realiza el análisis del comportamiento de los puentes de vigas de tablero oblicuo de hormigón armado de carreteras. La oblicuidad del contorno determina un modo específico de comportamiento resistente de los tableros de puente.



Figura 1.1: La vía impone la necesidad del empleo de un tablero oblicuo. Puente Oblicuo de Madrid Río sobre el cauce del Manzanares.

Se pretende analizar la influencia del esviaje en el comportamiento estructural en base al estudio de:

- Corrimientos verticales referidos a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Corrimientos verticales máximos para cada viga.
- Corrimientos transversales referidos a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Reparto de la flexión longitudinal referida a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Momento flector longitudinal máximo para cada viga.
- Tensiones máximas y mínimas referidas a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Distribución de la flexión transversal referida a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Distribución de la flexión transversal referida a la zona del apoyo.
- Distribución del momento torsor longitudinal referido a la zona del apoyo.
- Distribución del momento torsor referida a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Distribución del momento torsor transversal referido a la zona del apoyo.

Si bien el fin último del presente es analizar como varían cada uno de estos parámetros, el primer problema a resolver es la necesidad de la definición de un modelo que refleje, en la mayor medida de lo posible, el comportamiento de puentes de vigas con tablero oblicuo. En el apartado 2 “Definición del modelo” se intentará resolver esta cuestión explicando, detalladamente, la concepción del modelo y el porqué de las hipótesis establecidas. Posteriormente, en el apartado 3 “Influencia del esviaje en la respuesta estructural” se presentan los resultados obtenidos. Éstos serán analizados y se presentan mediante gráficas y tablas para facilitar su comprensión por parte del lector. El apartado 4 “Conclusiones” se centra en la recopilación de las conclusiones establecidas en base a los análisis realizados y el apartado 5 “Análisis Futuros” abre la puerta a una posible futura ampliación de este trabajo de fin de grado. Por último, el apartado 6 “Referencias” recoge los libros que han servido de refuerzo para ampliar información, establecer hipótesis o aquel software utilizado en la elaboración de este trabajo.

2 DEFINICIÓN DEL MODELO

Para poder llevar a cabo los diferentes análisis, el primer problema a resolver es la necesidad de la definición de un modelo que refleje, en la mayor medida posible, el comportamiento de puentes de vigas con tablero oblicuo.

Este modelo se concibe a partir del estudio realizado en el capítulo VII “El tablero oblicuo” del libro “Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I” de Javier Manterola Ármisen^[3].

Para la realización del estudio se ha empleado el programa Midas Civil^[4]. Este primer modelo tiene la finalidad de comparar los resultados obtenidos con los de Javier Manterola, corroborando así la validez del modelo de Midas según nuestros diversos planteamientos, hipótesis y decisiones. Una vez validado se realiza del mismo modo los puentes oblicuos de esviaje 0°, 15°, 30°, 45° y 60°.

Por último, señalar que los croquis que aparecen a lo largo del presente trabajo han sido realizados con el programa AutoCAD^[5].

2.1. Modelo de Javier Manterola

Para analizar la respuesta del tablero, J.Manterola opta por un modelo de puente de vigas con tablero curvo de 30 metros de luz y 10 metros de anchura, formado por 5 vigas longitudinales separadas entre sí 2 metros y solicitado por una sobrecarga uniformemente repartida a lo largo de las vigas longitudinales de una 1 ton/m².

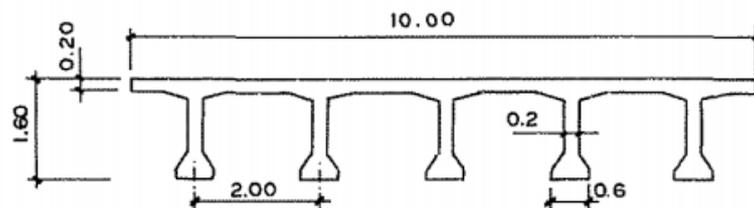


Figura 2.1: Geometría transversal del modelo seleccionado por J.Manterola para la realización de su análisis.

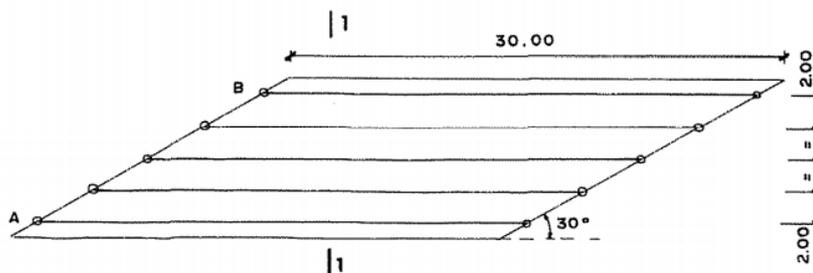


Figura 2.2: Geometría longitudinal del modelo seleccionado por J.Manterola para la realización de su análisis.

2.2. Modelo de Midas Civil

2.2.1 Tipología Estructural

En base a reproducir un modelo que represente fielmente la realidad se procede a consultar el estudio realizado por G.A. Rombach: "Finite-element Design of Concrete Structures: Practical problems and their solutions"^[6]. En él, Rombach discute sobre el correcto procedimiento de análisis para un puente de vigas T.

En lo que respecta a las vigas longitudinales, éstas se representan por elementos de viga recta cuyo eje está ubicado en el centro de gravedad de la sección transversal en T.

Si bien la discretización de las vigas longitudinales no crea dificultades, se requieren investigaciones detalladas para el modelado correcto y realista del comportamiento de carga transversal del puente. Esto incluye la ubicación vertical de las vigas transversales "ficticias" equivalentes, su conexión con las vigas principales longitudinales y su rigidez a la flexión.

Las vigas transversales se pueden disponer en el centro de gravedad (modelo A) o a la altura de la plataforma (modelo B). La principal diferencia entre estas alternativas es que el modelo B requiere un modelo 3D. En caso de torsión, se deduce que una carga en las bridas da como resultado fuerzas de tracción en el modelo A y fuerzas de compresión en el modelo B en las vigas transversales. Sin embargo, dado que la rigidez torsional y, por lo tanto, la restricción contra la rotación de una viga en T son pequeñas, la diferencia entre los dos modelos generalmente puede despreciarse. Cabe señalar que, en el caso del modelo B, las fuerzas finales de las vigas transversales se introducen en la viga en T de forma excéntrica, lo que da como resultado momentos de torsión en la viga longitudinal.

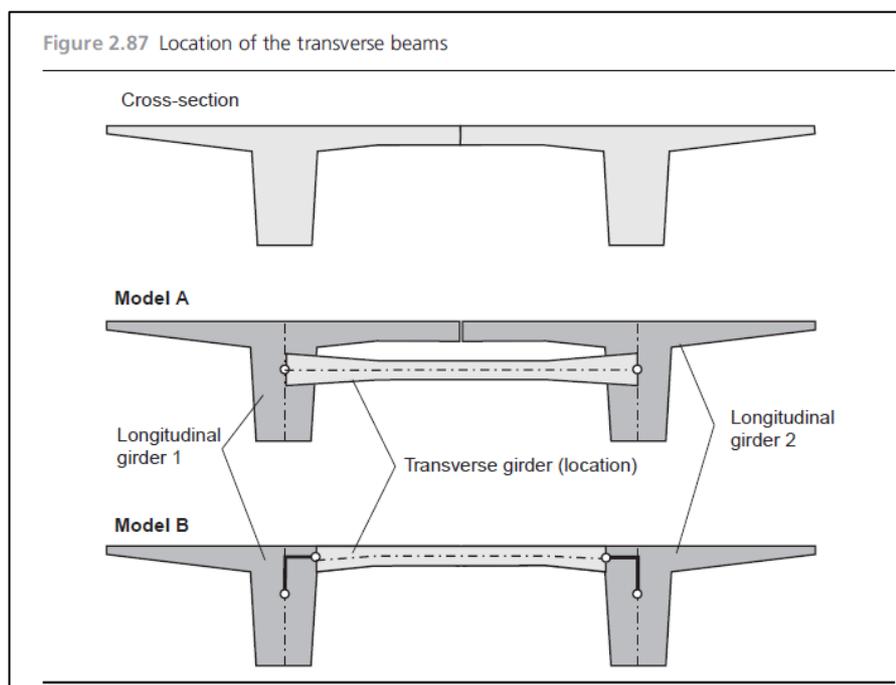


Figura 2.3: Posible localización de las vigas transversales según el estudio realizado por G.A. Rombach.

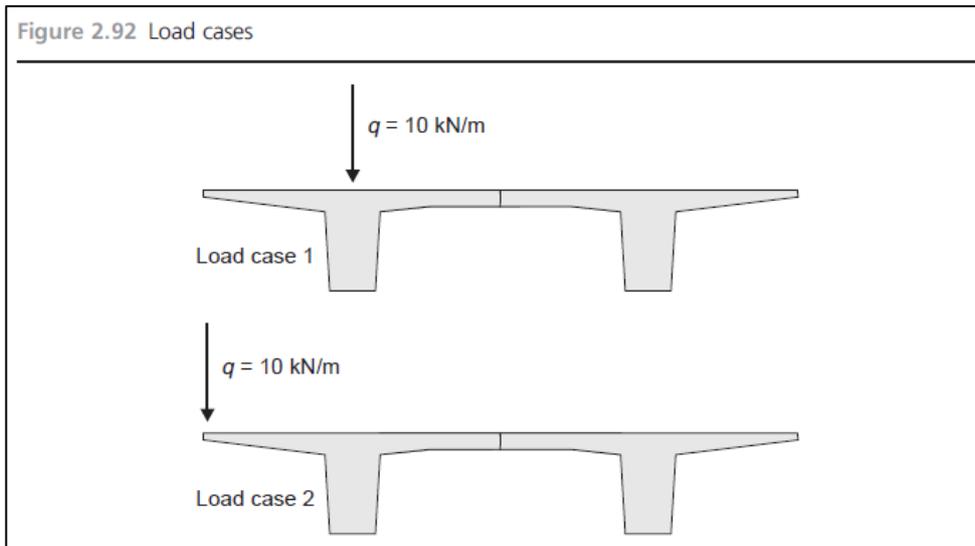


Figura 2.4: Casos de carga según el estudio realizado por G.A. Rombach.

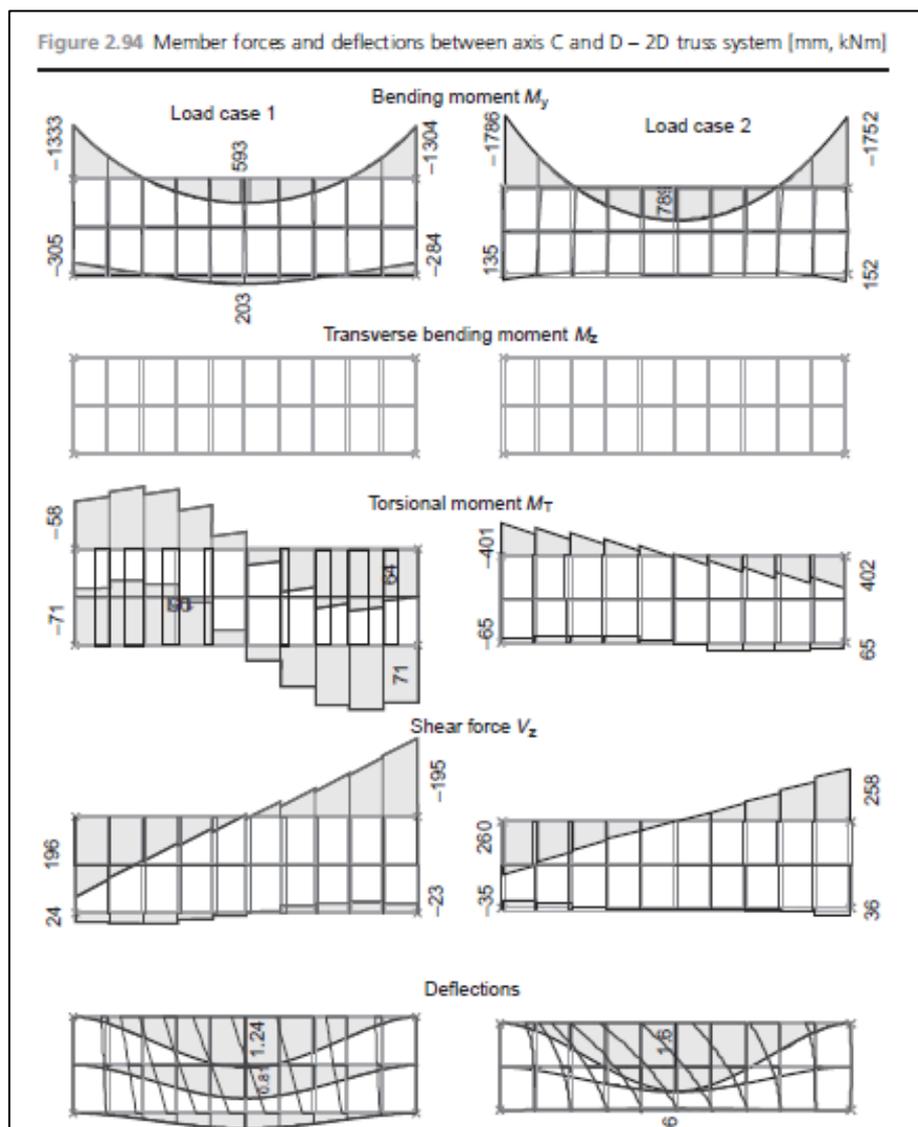


Figura 2.5: Resultados del modelo 2D según el estudio realizado por G.A. Rombach.

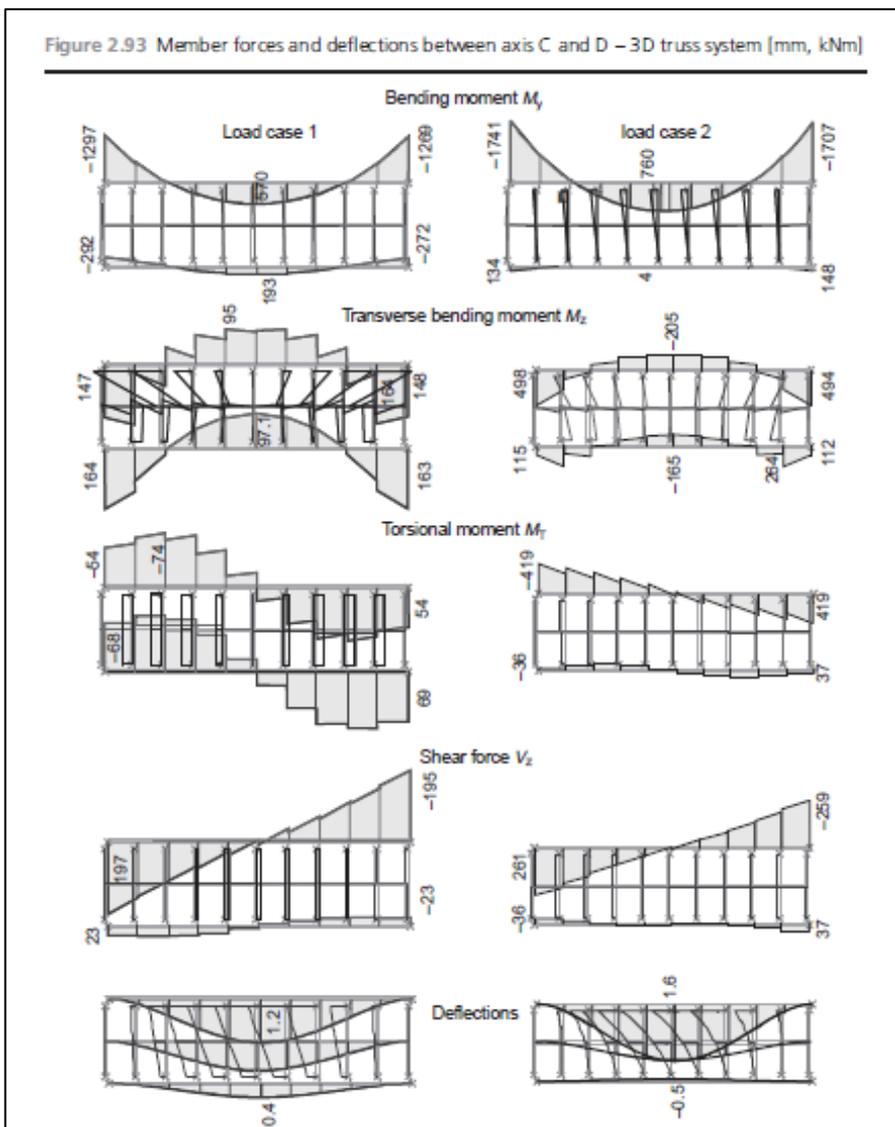


Figura 2.6: Resultados del modelo 3D según el estudio realizado por G.A. Rombach.

Table 2.9 Forces in members and displacements of the relevant sections [mm, kNm]

		Load case 1		Load case 2	
		Plane system	3D	Plane system	3D
Support axis	Bending moment (M_y)	-1333/-305	-1297/-292	-1786/135	-1741/134
	Bending moment (M_z)	0/0	147/164	0/0	498/115
	Torsional moment (M_T)	-58/-71	-54/-68	-401/-65	-419/-36
	Shear force (V_z)	196/24	197/23	260/-35	261/-36
Mid-span	Bending moment (M_y)	593/203	570/193	789/0	760/4
	Bending moment (M_z)	0/0	95/97	0/0	-205/-165
	Torsional moment (M_T)	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
	Shear force (V_z)	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
	Displacements	1.2/0.38	1.2/0.4	1.6/-0.6	1.6/-0.5

Tabla 2.1: Comparación entre el modelo 2D y 3D según el estudio realizado por G.A. Rombach.

De la Tabla 2.1, se puede ver que los resultados de ambos modelos son bastante similares, excepto el momento de flexión transversal M_z , que es, desde su definición, igual a cero en el caso de un sistema de emparrillado plano.

Se puede plantear que para mejorar la transferencia de carga en la dirección longitudinal, puede ser útil agregar vigas adicionales (ficticias) en la dirección longitudinal. Rombach también realizó este estudio del que se extraen las siguientes conclusiones: Un aumento adicional en el número de haces transversales reduciría aún más los momentos torsionales calculados. En consecuencia, los momentos torsionales calculados son sólo el resultado de una imprecisión del modelo numérico. La considerable influencia de la distancia entre las vigas transversales generalmente se remonta al hecho de que la estructura soporta principalmente la carga sobre la losa en voladizo mediante la flexión transversal de la losa y no por la torsión de las vigas longitudinales.

Cabe señalar aquí que el diseño del puente no sólo tiene que considerar su condición final sino también sus etapas de construcción. Es por tanto que para la etapa de construcción si conviene calcular estos esfuerzos pues la rigidez la aporta la viga transversal.

En nuestro análisis, discutiremos las diferencias entre el modelo estructural de emparrillado plano y emparrillado tridimensional. En el modelo de Midas, para realizar el decalado del plano de la losa a su posición real se utiliza la función "change offset".

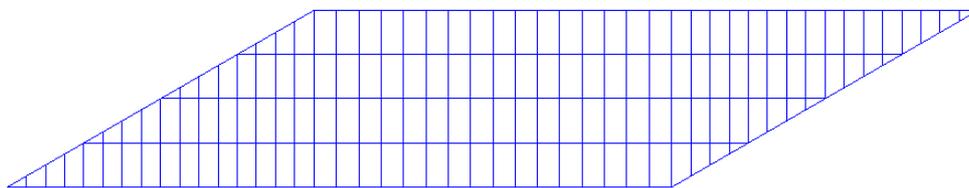


Figura 2.7: Tipología estructural emparrillado.

2.2.2 Materiales

J. Manterola no especifica las características del hormigón utilizado en su estudio y tampoco hace referencia acerca de la presencia de armaduras o tendones, se ha decidido utilizar un hormigón cuyo módulo elástico es de 30891MPa, su módulo de Poisson es 0,2 y su densidad es 25 kg/m³.

Características del hormigón HP-40	
Resistencia característica (f_{ck})	40 MPa
Módulo de elasticidad (E_c)	30891 MPa
Peso específico (γ_c)	25 kg/m ³
Coefficiente de Poisson (ν)	0.2

Tabla 2.2: Propiedades del hormigón HP-40.

2.2.3 Propiedades de la sección

Nótese el empleo de tres secciones diferentes:

-La correspondiente a las vigas longitudinales: cuyo material es HP-40 y se extiende a lo largo de los 30 metros de luz.

-La correspondiente a las vigas transversales, dentro de las cuales se distinguen cuatro tipos análogos pero con diferente ancho: la correspondiente a la zona recta del vano; la correspondiente a la zona influenciada por el ángulo y la sección que une las dos anteriores y que presenta diferente offset según el lado izquierdo o derecho.

Cabe destacar que las vigas transversales tienen asignados un material de idénticas características que el citado anteriormente pero que carece de peso específico. Esto se debe a que el programa necesita unir transversalmente los nodos para calcular la rigidez de la estructura, sin embargo si incluimos el peso, el programa lo contaría dos veces, puesto que éste ya se ha añadido en las vigas longitudinales.

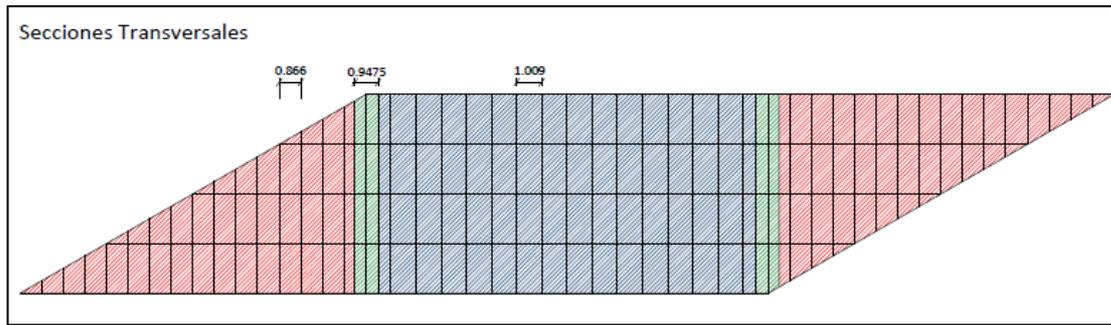


Figura 2.8: Detalle sobre las diferentes secciones transversales.

-Para la diagonal se opta por generar una sección rectangular equivalente cuyo canto será igual al canto de la losa y cuyo ancho será la distancia media de la longitud de la diagonal al centro del triángulo:

$$b = \frac{AreaTriang/2}{longitud\ diagonal}$$

Es importante destacar que se debe modificar el parámetro I_{xx} para tener en cuenta la verdadera rigidez a torsión del tablero: esto se debe a que Midas Civil analiza las secciones transversales como un único elemento, sin entender que forma parte de un conjunto.

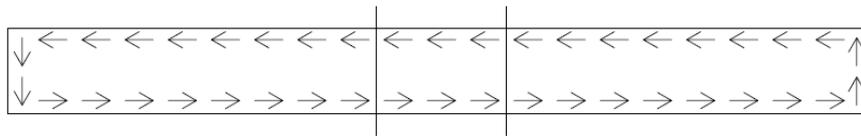


Figura 2.9: Distribución de tensiones en un perfil de pared delgada.

Si se tiene en cuenta que la losa constituye un perfil de pared delgada abierto se puede concluir que la rigidez a torsión del mismo es la integral de las tensiones alrededor del eje. De tal manera que el torsor se construye con dos términos: las tensiones en el borde longitudinal cuya componente es mayor y cuyo brazo es pequeño y las tensiones en el borde tangencial de menor valor pero con un mayor brazo. De tal manera que el aporte a la rigidez de ambas tensiones es $J = \frac{1}{6}be^3$. Y por tanto, la rigidez a torsión total es igual a $J_{total} = \frac{1}{3}be^3$. Es por tanto que la rigidez a torsión de un elemento de la losa será la mitad de la rigidez a torsión de un elemento completo dado que no se cierran las tensiones en los laterales que contactan con los elementos adjuntos.

Para corregir esto en el modelo de Midas Civil, generamos una sección transversal generalizada cuyos parámetros son los ya obtenidos a excepción de la corrección de la rigidez a torsión igual a $I_{xx}/2$.

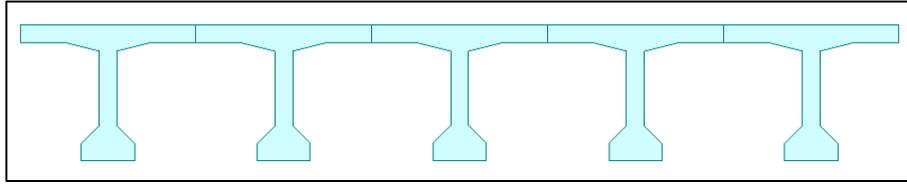


Figura 2.10: Geometría transversal del modelo Midas Civil.

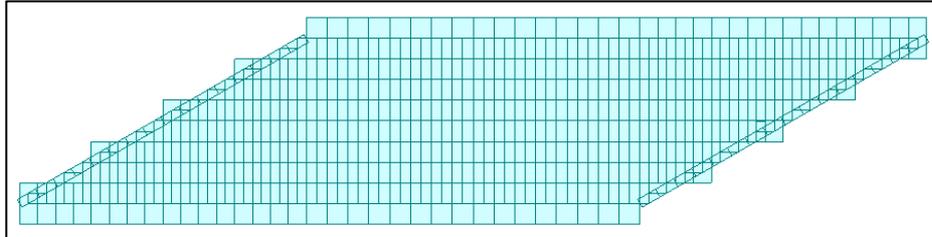


Figura 2.11: Geometría en planta del modelo Midas Civil.

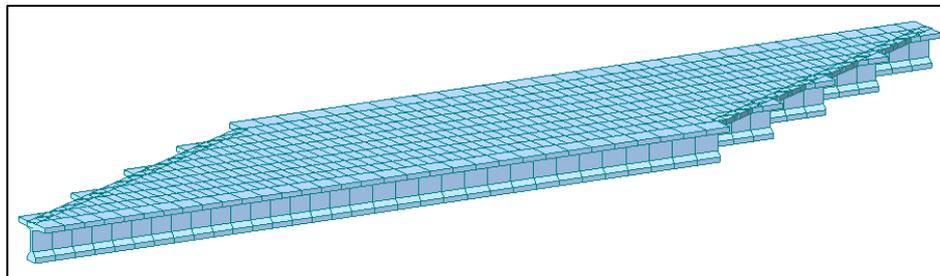


Figura 2.12: Vista isométrica del modelo Midas Civil.

2.2.4 Condiciones de contorno

-Apoyos: la condición real consiste en que las vigas se apoyan en unos neoprenos, esto se traduce en que se debe impedir el desplazamiento vertical de los apoyos de las vigas. El problema es que si sólo se aplica esa condición de contorno no se restringe el desplazamiento como sólido rígido en el plano. Luego, adicionalmente, se impide el desplazamiento horizontal en "x" e "y" del nudo 1 y el desplazamiento horizontal en "y" del nudo 6. El resto de los apoyos sólo tienen impedidos el desplazamiento vertical.

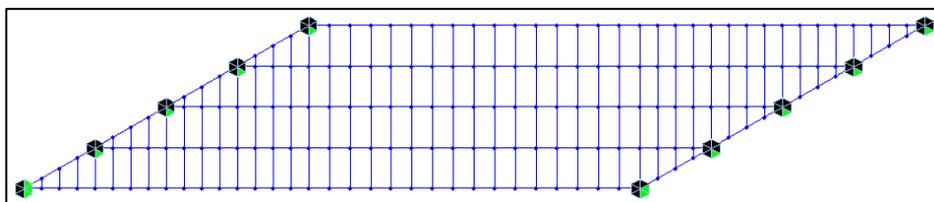


Figura 2.13: Condiciones de contorno en los apoyos.

-Beam end offset: Se hace referencia de nuevo al estudio realizado por G.A. Rombach: tal y como están definidas las vigas transversales en el modelo son menos rígidas que en la realidad porque están definidas con una longitud de eje de viga a eje de viga, pero en la zona en la que la losa coincide con la viga principal es bastante más rígida que la zona donde sólo existe tablero.

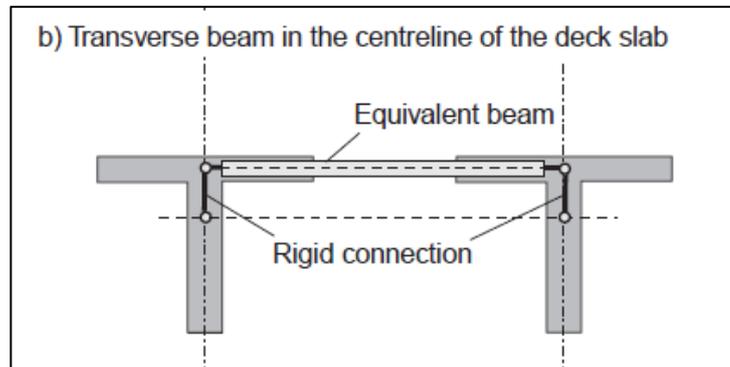


Figura 2.14: Beam end offset en vigas transversales según el estudio realizado por G.A. Rombach .

Para implementar este cambio en la rigidez, definimos un offset en el extremo de las vigas de 0.5m.

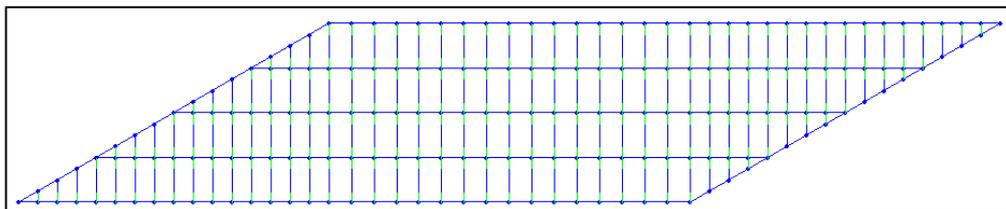


Figura 2.15: Beam end offset en vigas transversales.

-Para el caso de las diagonales, al calcular la distancia del offset coincide con la distancia de las vigas que concurren en los nudos. Esto imposibilita la formulación de la función beam end offset por lo que se resuelve mediante la función "rigid link".

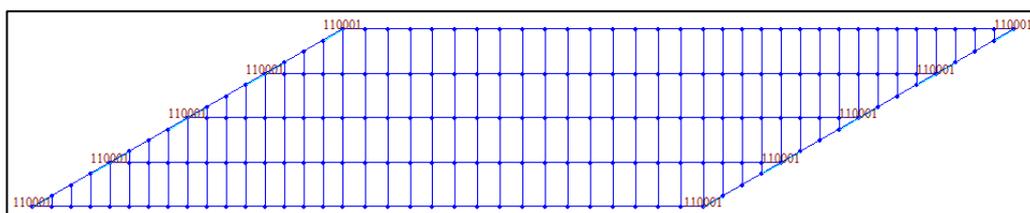


Figura 2.16: Rigid link en diagonales.

2.2.5 Cargas

Una vez definida la geometría, aplicamos la carga de una 1 ton/m^2 , o lo que es igual 2 ton/ml a lo largo de las cinco vigas longitudinales.

Adicionalmente, se añaden las cargas de peso propio.

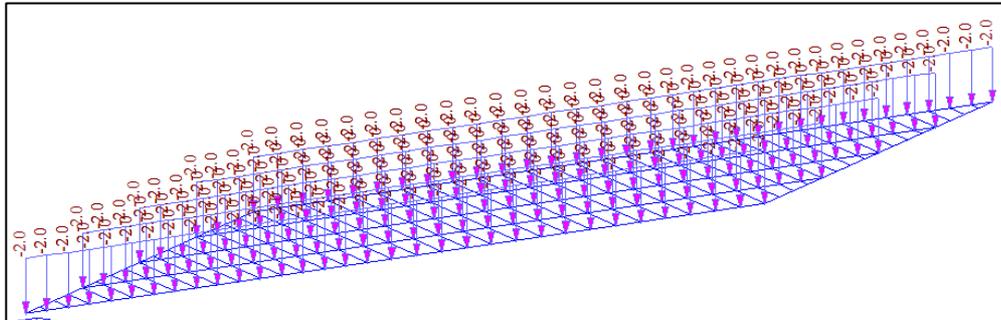


Figura 2.17: Sobrecarga distribuida a lo largo de las vigas longitudinales.

2.2.6 Resultados

En base a validar las hipótesis planteadas para la realización del modelo en Midas Civil, se procede a comparar los resultados obtenidos por nuestro modelo con los resultados obtenidos por J.Manterola.

Manterola extrae cinco resultados de la respuesta del tablero sobre vigas T que son los siguientes:

- Corrimientos verticales.
- Leyes de momentos flectores longitudinales.
- Corrimientos de la sección 1-1.
- Ley de momentos flectores transversales.
- Reacciones en apoyos.

2.2.6.1 Corrimientos Verticales

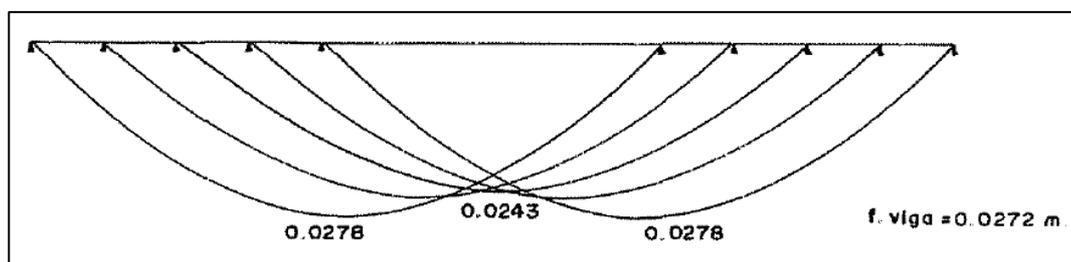


Figura 2.18: Corrimientos verticales obtenidos por Manterola.

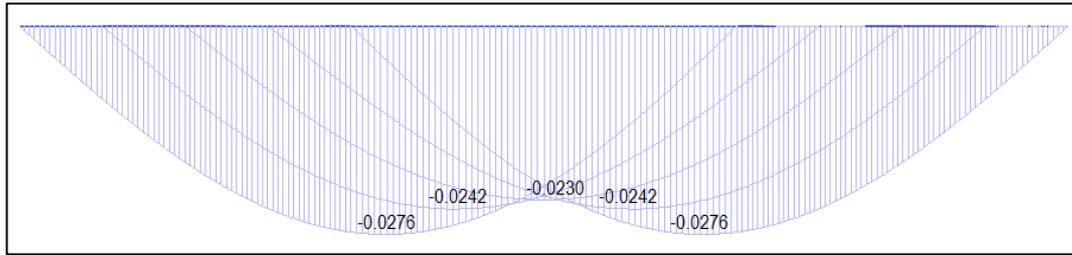


Figura 2.19: Corrimientos verticales del modelo 2D obtenidos por Midas Civil.

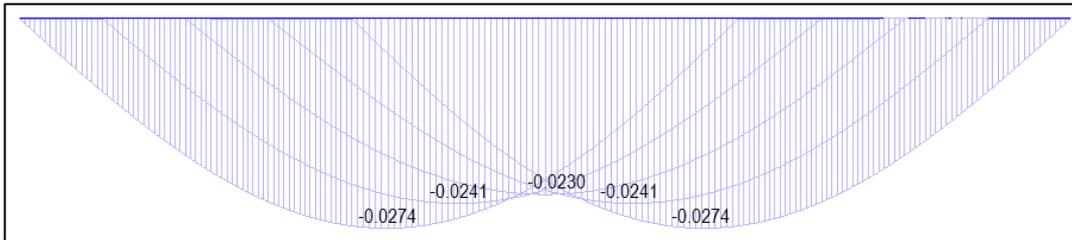


Figura 2.20: Corrimientos verticales del modelo 3D obtenidos por Midas Civil.

2.2.6.2 Leyes de momentos flectores longitudinales

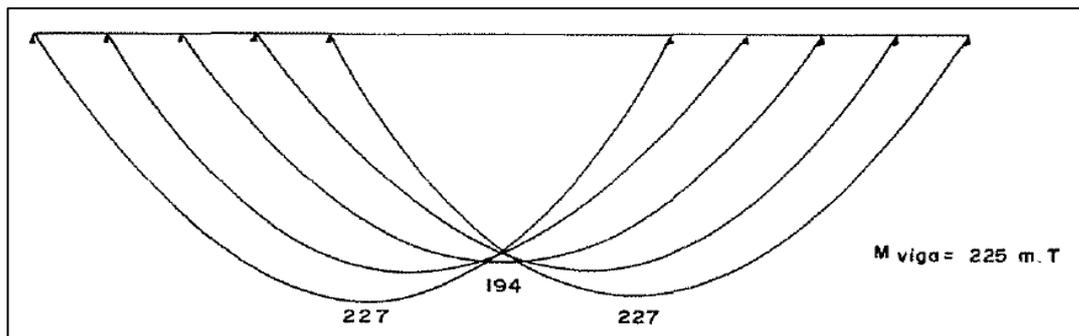


Figura 2.21: Leyes de momentos flectores longitudinales obtenidas por Manterola.

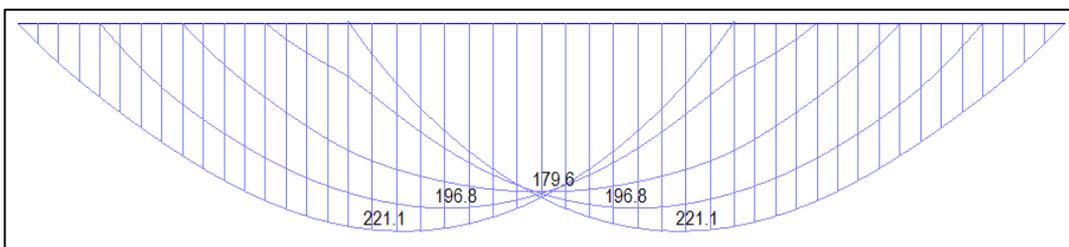


Figura 2.22: Leyes de momentos flectores longitudinales del modelo 2D obtenidas por Midas Civil.

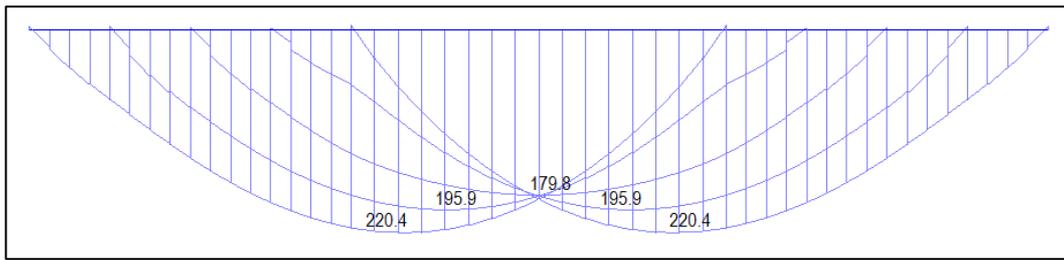


Figura 2.23: Leyes de momentos flectores longitudinales del modelo 3D obtenidas por Midas Civil.

2.2.6.3 Corrimientos de la sección 1-1

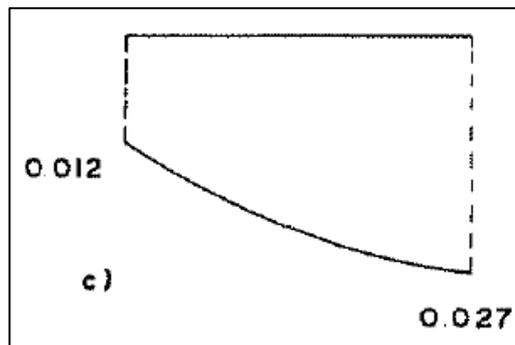


Figura 2.24: Corrimientos sección 1-1 obtenidos por Manterola.

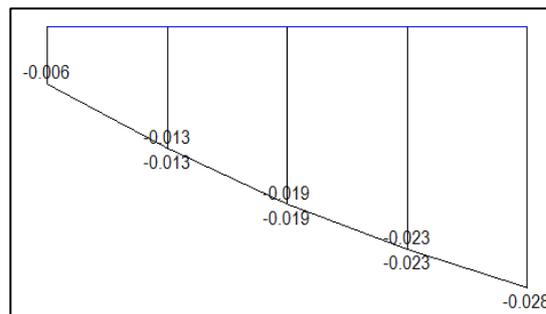


Figura 2.25: Corrimientos sección del modelo 2D obtenidos por Midas Civil.

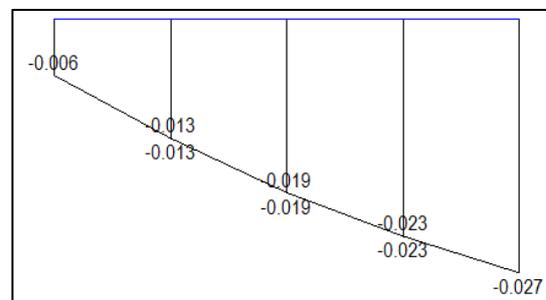


Figura 2.26: Corrimientos sección del modelo 3D obtenidos por Midas Civil.

2.2.6.4 Ley de momentos flectores transversales

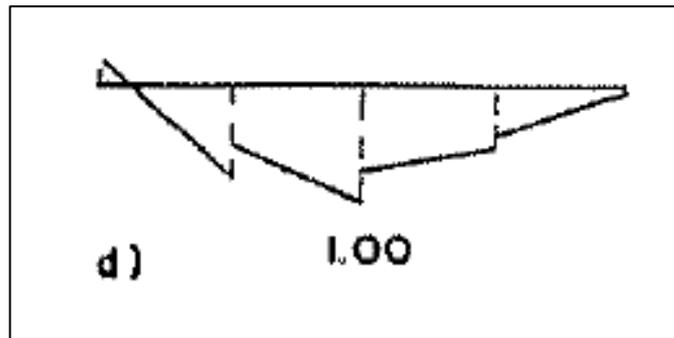


Figura 2.27: Leyes de momentos flectores transversales obtenidas por Manterola.

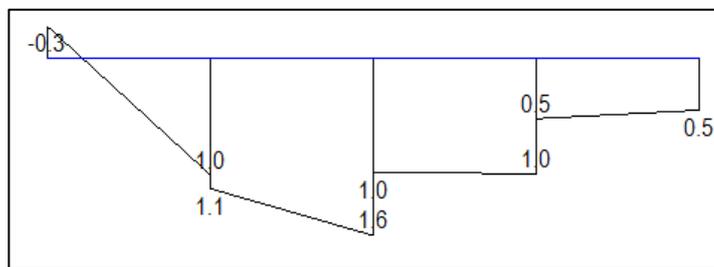


Figura 2.28: Leyes de momentos flectores transversales del modelo 2D obtenidas por Midas Civil.

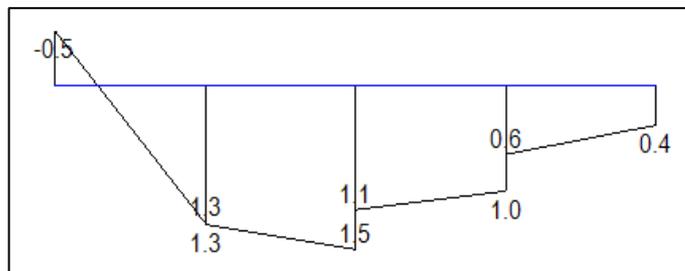


Figura 2.29: Leyes de momentos flectores transversales del modelo 3D obtenidas por Midas Civil.

2.2.6.5 Reacciones en apoyos

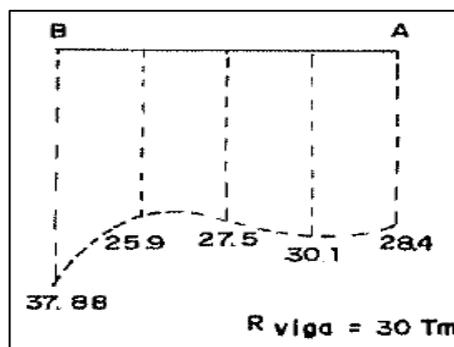


Figura 2.30: Reacciones en apoyos obtenidas por Manterola.

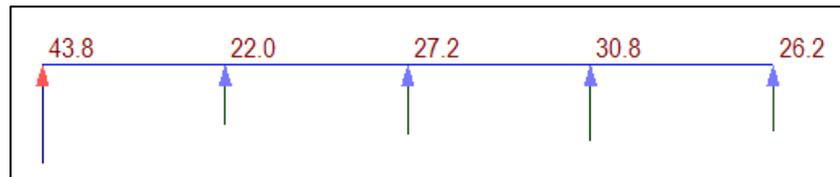


Figura 2.31: Reacciones en apoyos del modelo 2D obtenidas por Midas Civil.

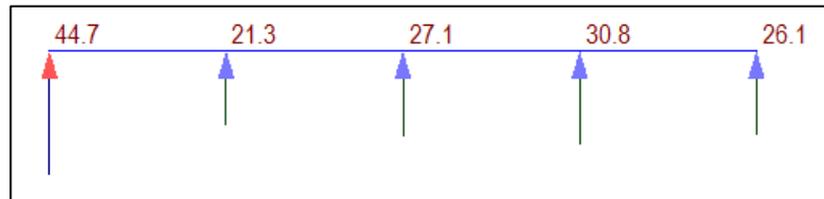


Figura 2.32: Reacciones en apoyos del modelo 3D obtenidas por Midas Civil.

2.2.6.6 Comparación de resultados.

Corrimientos Verticales					
	Manterola	Emparrillado Plano	Error	Emparrillado Tridimensional	Error
A	0.0278	0.0276	0.7%	0.0274	1.4%
B	-	0.0242	-	0.0241	-
C	0.0243	0.0230	5.3%	0.0230	5.3%
D	-	0.0242	-	0.0241	-
E	0.0278	0.0276	0.7%	0.0274	1.4%

Tabla 2.3: Comparación de corrimientos verticales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

Momento Flector Máximo Longitudinal					
	Manterola	Emparrillado Plano	Error	Emparrillado Tridimensional	Error
A	227	221.1	2.6%	220.4	2.9%
B	-	196.8	-	195.9	-
C	194	179.6	7.4%	179.8	7.3%
D	-	196.8	-	195.9	-
E	227	221.1	2.6%	220.4	2.9%

Tabla 2.4: Comparación de los momentos flectores máximos longitudinales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

Corrimiento sección 1-1					
	Manterola	Emparrillado Plano	Error	Emparrillado Tridimensional	Error
A	0.012	0.006	50.0%	0.006	50.0%
B	-	0.013	-	0.013	-
C	-	0.019	-	0.019	-
D	-	0.023	-	0.023	-
E	0.027	0.028	-3.7%	0.027	0.0%

Tabla 2.5: Comparación de corrimientos de la sección 1-1 entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

Ley de Momentos Transversales sección 1-1					
	Manterola	Emparrillado Plano	Error	Emparrillado Tridimensional	Error
A	-	-0.3	-	-0.5	-
B	-	1.1	-	1.3	-
C	-	1.6	-	1.5	-
D	-	1.0	-	1.0	-
E	-	0.5	-	0.4	-

Tabla 2.6: Comparación de la ley de momentos transversales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

*Nota: Se ha de tener en cuenta que J.Manterola no especifica donde selecciona la sección 1-1, por lo que resulta difícil establecer esta comparativa. A su vez, tanto la ley de momentos transversales como el corrimiento de la sección apenas presentan uno y dos valores respectivamente. Se excluye por tanto esta comparativa por falta de un criterio riguroso.

Reacciones en apoyos					
	Manterola	Emparrillado Plano	Error	Emparrillado Tridimensional	Error
A	37.9	43.8	-15.6%	44.7	-17.9%
B	25.9	22.0	15.1%	21.3	17.8%
C	27.5	27.2	1.1%	27.1	1.5%
D	30.1	30.8	-2.3%	30.8	-2.3%
E	28.4	26.2	7.7%	26.1	8.1%

Tabla 2.7: Comparación de reacciones entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

2.2.6.7 Comparación de resultados según la tipología estructural

Se realiza ahora la comparación entre el empleo de un emparrillado plano o un emparrillado tridimensional.

Corrimientos Verticales			
	Emparrillado Plano	Emparrillado Tridimensional	Error
A	0.0276	0.0274	-0.7%
B	0.0242	0.0241	-0.4%
C	0.0230	0.0230	0.0%
D	0.0242	0.0241	-0.4%
E	0.0276	0.0274	-0.7%

Tabla 2.8: Comparación de corrimientos verticales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

Momento Flector Máximo Longitudinal			
	Emparrillado Plano	Emparrillado Tridimensional	Error
A	221.1	220.4	-0.3%
B	196.8	195.9	-0.5%
C	179.6	179.8	0.1%
D	196.8	195.9	-0.5%
E	221.1	220.4	-0.3%

Tabla 2.9: Comparación de los momentos flectores máximos longitudinales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

Corrimiento sección 1-1			
	Emparrillado Plano	Emparrillado Tridimensional	Error
A	0.006	0.006	0.0%
B	0.013	0.013	0.0%
C	0.019	0.019	0.0%
D	0.023	0.023	0.0%
E	0.028	0.027	-3.7%

Tabla 2.10: Comparación de corrimientos de la sección 1-1 entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

Ley de Momentos Transversales sección 1-1			
	Emparrillado Plano	Emparrillado Tridimensional	Error
A	-0.3	-0.5	40.0%
B	1.1	1.3	15.4%
C	1.6	1.5	-6.7%
D	1.0	1.0	0.0%
E	0.5	0.4	-25.0%

Tabla 2.11: Comparación de la ley de momentos transversales entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

Reacciones en apoyos			
	Emparrillado Plano	Emparrillado Tridimensional	Error
A	43.8	44.7	2.0%
B	22.0	21.3	-3.3%
C	27.2	27.1	-0.4%
D	30.8	30.8	0.0%
E	26.2	26.1	-0.4%

Tabla 2.12: Comparación de reacciones entre los modelos Manterola, 2D y 3D.

En base a los resultados extraídos de los diferentes análisis, se puede observar una gran similitud entre los resultados obtenidos y los obtenidos por J.Manterola con un porcentaje de error máximo establecido en 7.4% en la ley de momentos longitudinales máximos.

Se ha de tener en cuenta que durante el periodo de análisis y redacción de su libro, J.Manterola no disponía de la ventaja matemática y coste computacional que existen hoy día. Es por ello que el modelo llevado a cabo por J.Manterola cuenta con un menor número de elementos y eso puede explicar la pequeña diferencia que se puede observar en determinados valores.

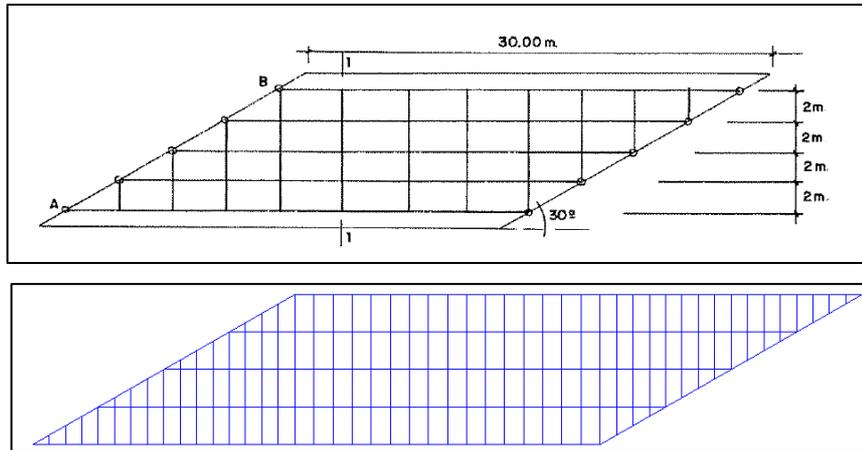


Figura 2.33: Diferencia de número de elementos entre el modelo de Manterola y el modelo de Midas Civil.

Por otra parte, de la comparativa establecida entre el modelo tridimensional y el modelo plano se aprecia que existe una diferencia de error máximo del 3% por lo que se opta por utilizar el modelo tridimensional.

Por tanto, se concluye que se puede validar el modelo desarrollado en Midas Civil y que será la base para los posteriores análisis.

3 INFLUENCIA DEL ESVAIAJE EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Una vez establecido el modelo, se procede a examinar la influencia del ángulo de esviaje en la respuesta estructural de tableros de vigas de hormigón. La oblicuidad del contorno determina un modo específico de comportamiento resistente que se pretende examinar en base al estudio de:

- Corrimientos verticales referidos a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Corrimientos verticales máximos para cada viga.
- Corrimientos transversales referidos a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Reparto de la flexión longitudinal referida a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Momento flector longitudinal máximo para cada viga.
- Tensiones máximas y mínimas referidas a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Distribución de la flexión transversal referida a la sección transversal donde está aplicada la carga.
- Distribución de la flexión transversal referida a la zona del apoyo.
- Distribución del momento torsor longitudinal referido a la zona del apoyo.
- Distribución del momento torsor referida a la sección trasnversal donde esta aplicada la carga.
- Distribución del momento torsor transversal referido a la zona del apoyo.

Para ello, se consideran dos tipos de carga: carga puntual y carga repartida. Ambas son verticales. En cuanto a la carga puntual adopta un valor de 100 Tn y se desplaza de la viga extrema a la viga central. La carga uniformemente distribuida actúa a lo largo de la luz pero ocupando únicamente la mitad izquierda del tablero. Ésta toma un valor de 0.4 Tn/m².

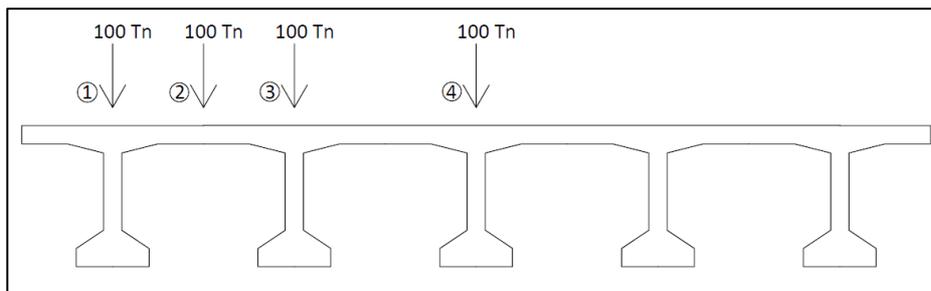


Figura 3.1: Distribución de los diferentes tipos de carga puntual.

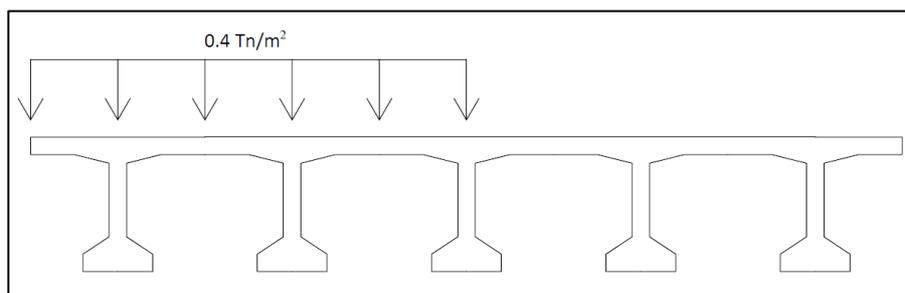


Figura 3.2: Solicitación de sobrecarga distribuida.

En base a los resultados obtenidos de los diferentes análisis, se opta por no realizar el análisis de la carga puntual 2 debido a que, cuando la carga puntual se aplica en la sección entre vigas, el modelo de emparrillado no recoge adecuadamente el comportamiento en las dos direcciones de la losa. En los análisis se reflejan resultados muy dispares respecto de los obtenidos en las cargas puntuales 1, 3 y 4; por lo que finalmente se decide no incorporar los resultados a este estudio.

3.1 Corrimientos verticales

En primer lugar se pretende analizar como varía el desplazamiento vertical en la sección transversal de la aplicación de la carga, para los casos de carga puntuales; y en la sección ortogonal situada en la mitad del vano, para el caso de carga distribuida, con objeto de examinar la influencia del esviaje en el reparto de ésta.

3.1.1 Carga Puntual 1

Se presenta la variación del desplazamiento vertical, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga del extremo:

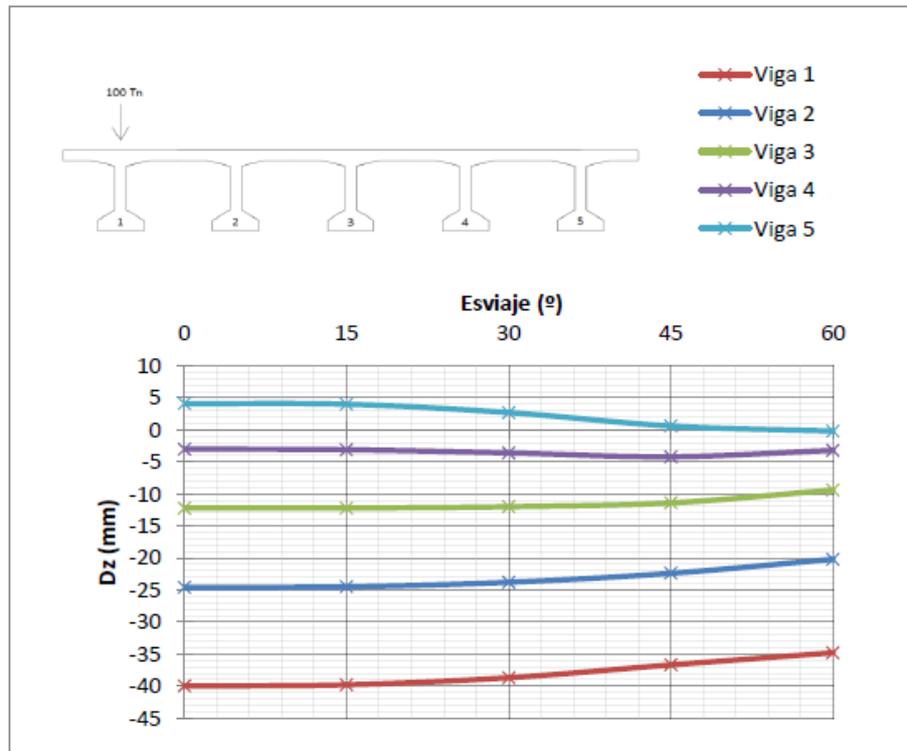


Figura 3.3: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical en la sección donde se aplica de la carga.

Dz Carga Puntual 1	0º	15º	30º	45º	60º
Viga 1	-40.0	-39.8	-38.7	-36.7	-34.8
Viga 2	-24.6	-24.5	-23.8	-22.4	-20.2
Viga 3	-12.2	-12.2	-12.0	-11.4	-9.4
Viga 4	-3.0	-3.1	-3.6	-4.2	-3.2
Viga 5	4.1	4.0	2.7	0.6	-0.2

Tabla 3.1: Desplazamiento vertical de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Esviaje	0º	15º	30º	45º	60º
Dz viga cargada	-40.0	-39.8	-38.7	-36.7	-34.8
Dz viga contigua	-24.6	-24.5	-23.8	-22.4	-20.2
Relación	61.50%	61.56%	61.50%	61.04%	58.05%

Tabla 3.2: Relación de desplazamientos verticales para la viga cargada y su contigua.

Se observa como un aumento en el esviaje produce un aumento de rigidez longitudinal. De manera que para la viga cargada, 1, y sus contiguas, 2 y 3, disminuye el valor del desplazamiento vertical (de carácter negativo). Para el caso de la viga 4 prácticamente se mantiene, señalando aquí que entre las vigas 4 y 5 se produce el punto de inflexión entre el desplazamiento vertical positivo y negativo. Se aprecia, para la viga 5, una disminución en el desplazamiento vertical esta vez caracterizado como positivo.

Es decir, la flecha disminuye en todas las vigas de forma generalizada, lo que nos lleva a afirmar que la rigidez longitudinal aumenta cuando lo hace el esviaje.

3.1.2 Carga Puntual 3

Se presenta la variación del desplazamiento vertical, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga intermedia:

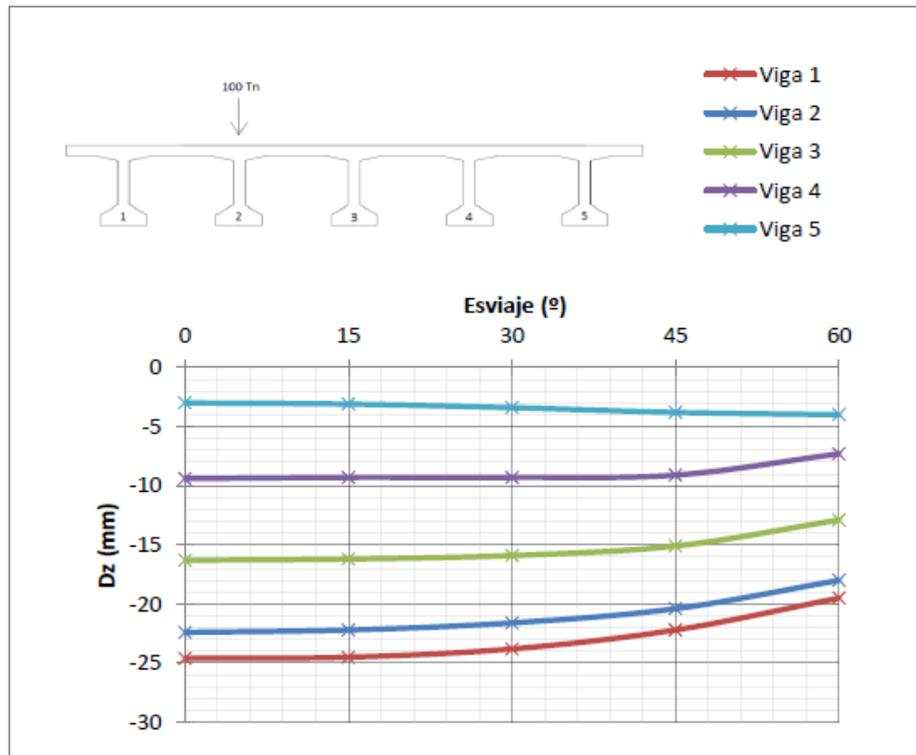


Figura 3.4: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical en la sección donde se aplica de la carga.

Dz Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-24.6	-24.5	-23.8	-22.2	-19.5
Viga 2	-22.4	-22.2	-21.6	-20.4	-18.0
Viga 3	-16.3	-16.2	-15.9	-15.1	-12.9
Viga 4	-9.4	-9.3	-9.3	-9.1	-7.3
Viga 5	-3.0	-3.1	-3.4	-3.8	-4.0

Tabla 3.3: Desplazamiento vertical de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Dz viga externa	-24.6	-24.5	-23.8	-22.2	-19.5
Dz viga cargada	-22.4	-22.2	-21.6	-20.4	-18.0
Dz viga central	-16.3	-16.2	-15.9	-15.1	-12.9
Relación externa-cargada	91.06%	90.61%	90.76%	91.89%	92.31%
Relación cargada-central	72.77%	72.97%	73.61%	74.02%	71.67%

Tabla 3.4: Relación de desplazamientos verticales para la viga cargada y sus contiguas.

Se reflejan unos resultados análogos al caso anterior. El desplazamiento vertical se mantiene prácticamente para el esviaje de 15°. A partir de ahí para la viga cargada, 2, y sus contiguas, 1, 3 y 4, disminuye el valor del desplazamiento vertical tanto menor cuanto mayor es el esviaje. Para el caso de la viga más alejada a la carga, se observa la misma tendencia de rigidez. En conclusión se observa la misma tendencia que en el caso anterior pero incluso de forma más marcada.

3.1.3 Carga Puntual 4

Se presenta la variación del desplazamiento vertical, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga central:

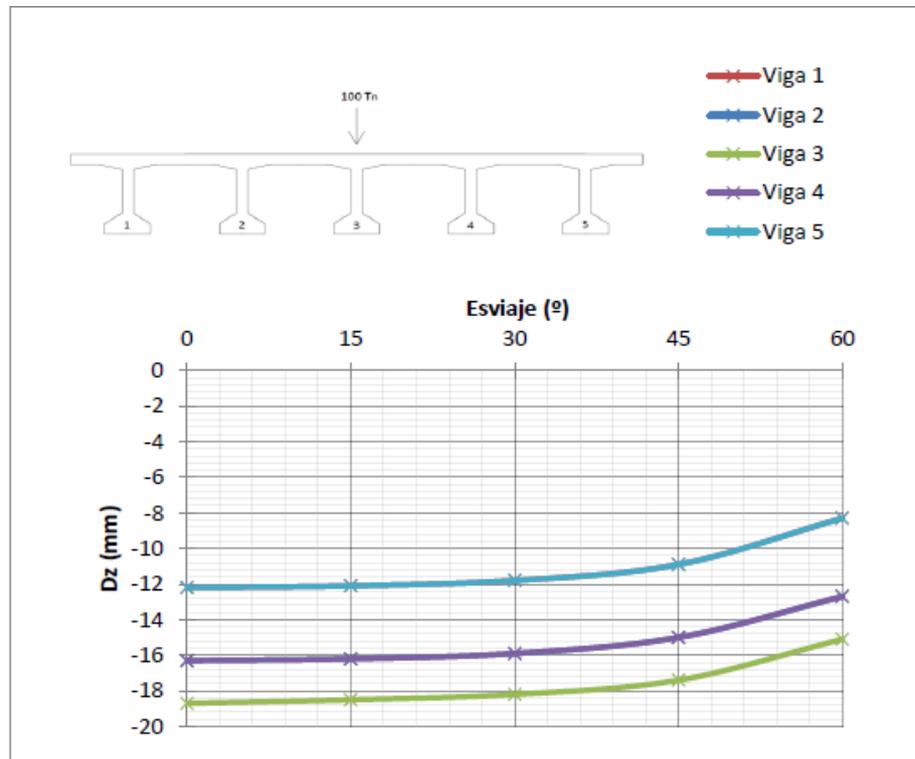


Figura 3.5: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical en la sección donde se aplica de la carga.

Dz Carga Puntual 4	0º	15º	30º	45º	60º
Viga 1	-12.2	-12.1	-11.8	-10.9	-8.3
Viga 2	-16.3	-16.2	-15.9	-15.0	-12.7
Viga 3	-18.7	-18.5	-18.2	-17.4	-15.1
Viga 4	-16.3	-16.2	-15.9	-15.0	-12.7
Viga 5	-12.2	-12.1	-11.8	-10.9	-8.3

Tabla 3.5: Desplazamiento vertical de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Esviaje	0º	15º	30º	45º	60º
Dz viga cargada	-18.7	-18.5	-18.2	-17.4	-15.1
Dz viga contigua	-16.3	-16.2	-15.9	-15.0	-12.7
Relación	87.17%	87.57%	87.36%	86.21%	84.11%

Tabla 3.6: Relación de desplazamientos verticales para la viga cargada y su contigua.

Se aprecia la misma tendencia: como un aumento en el esviaje produce un aumento de rigidez longitudinal. Esta vez, se produce una situación simétrica para las vigas 1 y 5; y 2 y 4.

3.1.4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, podemos observar que la flecha disminuye en todas las vigas de forma generalizada lo que nos lleva a afirmar que la rigidez longitudinal aumenta cuando lo hace el esviaje.

Este aumento de la rigidez longitudinal no parece afectar mucho al reparto de la flexión transversal, ya que las proporciones entre las flechas de las vigas contiguas respecto de las vigas cargadas no cambian significativamente, salvo para el esviaje de 60° en el que dicho porcentaje disminuye, en consonancia con el aumento de la rigidez longitudinal.

El porcentaje de la flecha de la viga contigua respecto de la flecha de la viga cargada se mantiene relativamente constante hasta 45° y disminuye para 60°, lo que indica un peor reparto de la flexión longitudinal, ocasionado por una menor rigidez transversal en relación a la rigidez longitudinal. O lo que es lo mismo, el aumento de rigidez longitudinal no perjudica al reparto transversal, salvo para ángulos de 60° donde sí se apreciaba un peor reparto.

3.1.5 Análisis comparativo de la flecha de las vigas cargadas: Carga puntual

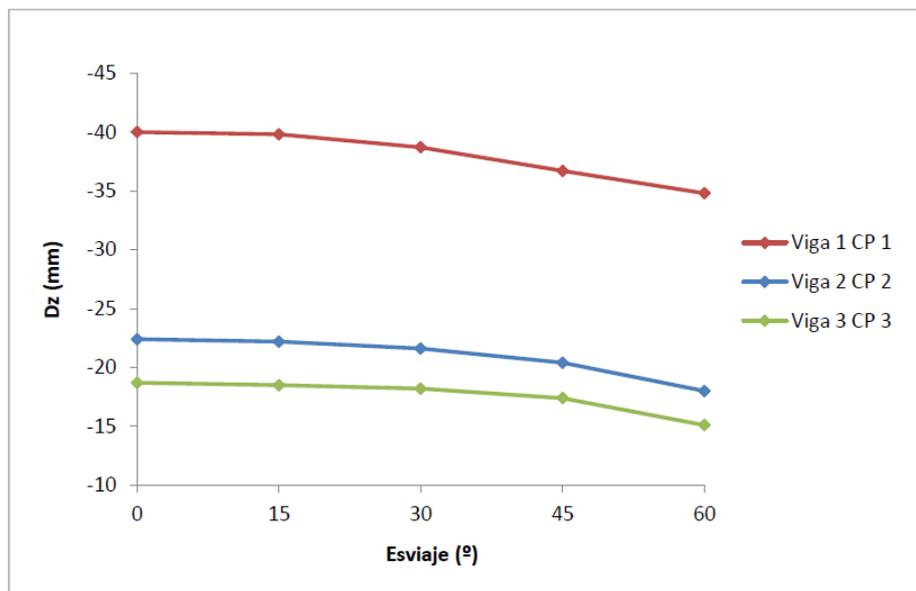


Figura 3.6: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical para cada viga cargada.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1 CP 1	100.00%	99.50%	96.75%	91.75%	87.00%
Viga 2 CP 2	100.00%	99.11%	96.43%	91.07%	80.36%
Viga 3 CP 3	100.00%	98.93%	97.33%	93.05%	80.75%

Tabla 3.7: Relación entre el desplazamiento de la viga cargada según el esviaje respecto al puente sin esviaje.

En esta comparativa se puede apreciar como la pendiente de las curvas correspondientes a las cargas centradas son mayores que para la carga más excéntrica. Es decir, esta tendencia se muestra de forma más marcada cuando la carga está más centrada.

3.1.6 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en el desplazamiento vertical, en los puntos de la sección central ortogonal al eje longitudinal para cada una de las vigas, para el estado de carga distribuida:

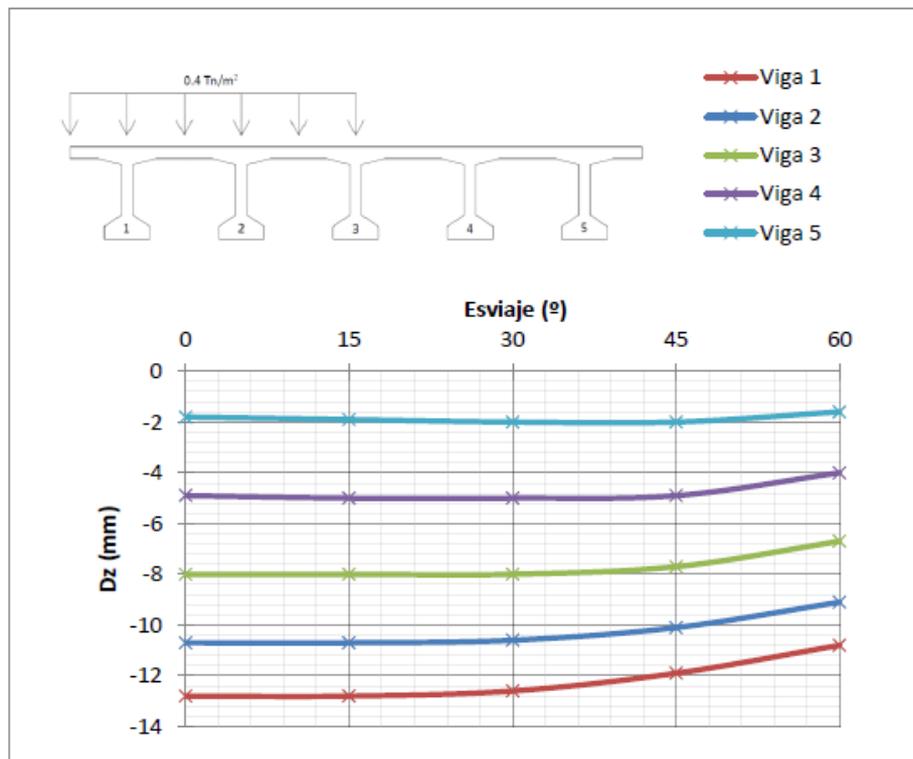


Figura 3.7: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical en la sección central ortogonal al eje longitudinal.

Dz Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-12.8	-12.8	-12.6	-11.9	-10.8
Viga 2	-10.7	-10.7	-10.6	-10.1	-9.1
Viga 3	-8.0	-8.0	-8.0	-7.7	-6.7
Viga 4	-4.9	-5.0	-5.0	-4.9	-4.0
Viga 5	-1.8	-1.9	-2.0	-2.0	-1.6

Tabla 3.8: Desplazamiento vertical de cada viga en la sección central ortogonal al eje longitudinal.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Dz viga cargada (3)	-8.0	-8.0	-8.0	-7.7	-6.7
Dz viga contigua (4)	-4.9	-5.0	-5.0	-4.9	-4.0
Relación	61.25%	62.50%	62.50%	63.64%	59.70%

Tabla 3.9: Relación de desplazamientos verticales para la viga cargada y su contigua.

Para este estado de carga, observamos que para los esviajes de 15° y 30° la variación se puede considerar nula. Siendo para los casos de 45 y 60° donde se refleja la disminución de desplazamiento vertical más pronunciado en las vigas cargadas, 1, 2 y 3. Se observa, por tanto la misma tendencia que para la carga puntual, pero en este caso se manifiesta de forma menos marcada.

3.1.7 Análisis comparativo de la flecha de las vigas cargadas: Carga distribuida

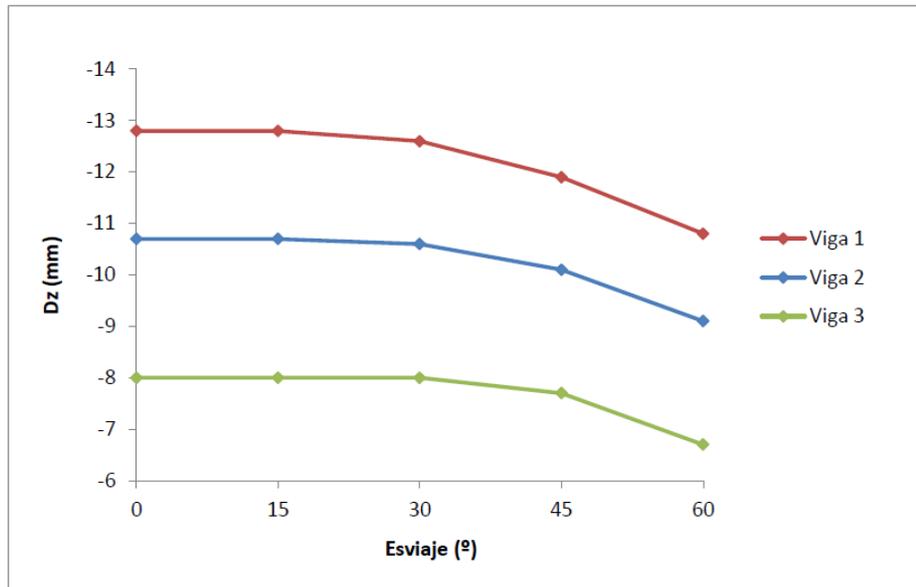


Figura 3.8: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical para cada viga cargada.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	100.00%	100.00%	98.44%	92.97%	84.38%
Viga 2	100.00%	100.00%	99.07%	94.39%	85.05%
Viga 3	100.00%	100.00%	100.00%	96.25%	83.75%

Tabla 3.10: Relación entre el desplazamiento de la viga cargada según el esviaje respecto al puente sin esviaje.

En esta comparativa se puede apreciar como la pendiente de las curvas correspondientes al esviaje de 15° y 30° es prácticamente nula. A partir de dicho esviaje, la pendiente aumenta en consonancia con el aumento de rigidez longitudinal. Por tanto, la influencia del esviaje es menos marcada que para el caso puntual, pero se observa la misma tendencia.

3.2 Corrimientos verticales máximos

En lo que respecta al desplazamiento vertical máximo de cada viga se aprecia que éste no se produce en la sección de aplicación de la carga sino que se localiza en el centro del vano de cada viga. Para facilitar la comprensión de este hecho se aportan las siguientes figuras (30, 31, 32, 33) para el caso de carga puntual 3 y carga distribuida de los modelos de 30° y 60°.

Se puede deducir que el esviaje desplaza el punto de máximo desplazamiento vertical siguiendo la tendencia del ángulo de esviaje, o lo que es lo mismo, cada viga tiende a manifestar su deformación máxima en el centro de su luz particular.

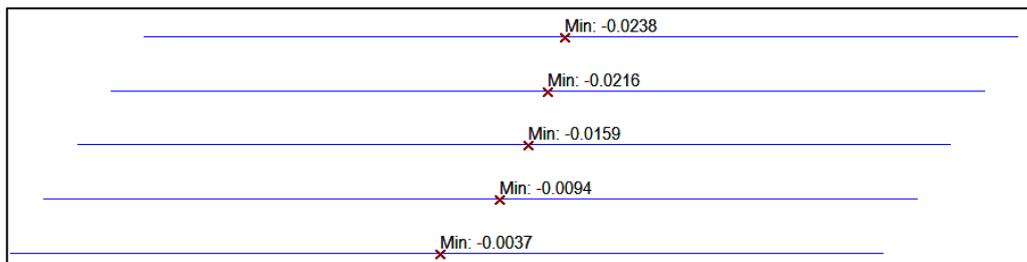


Figura 3.9: Desplazamiento vertical máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 30°.

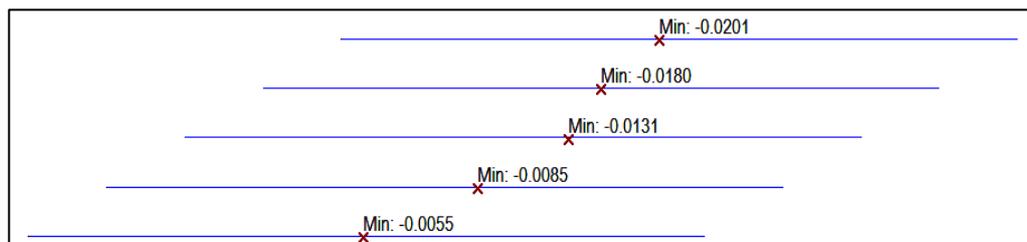


Figura 3.10: Desplazamiento vertical máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 60°.

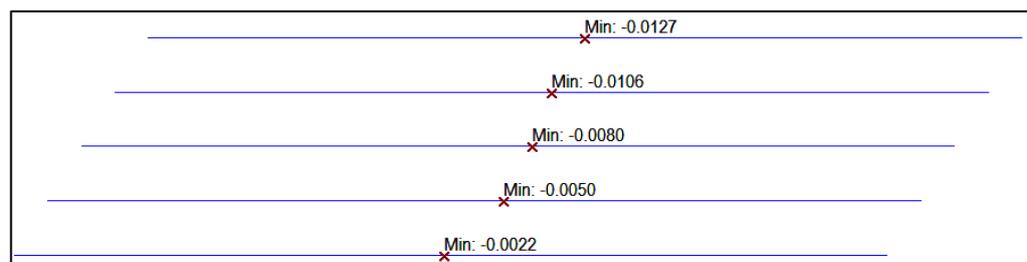


Figura 3.11: Desplazamiento vertical máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 30°.

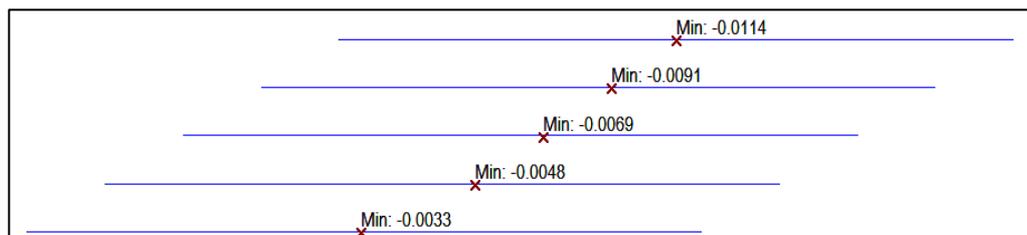


Figura 3.12: Desplazamiento vertical máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 60°.

3.2.1 Carga Puntual 1

Se presenta la variación del desplazamiento vertical máximo, para cada una de las vigas. Como ya se ha mencionado anteriormente, el punto donde se produce el máximo variará siguiendo la tendencia del esviaje, coincidiendo con el centro del vano de cada viga. En este primer estudio analizamos el estado de carga puntual situado en el centro del vano de la viga del extremo:

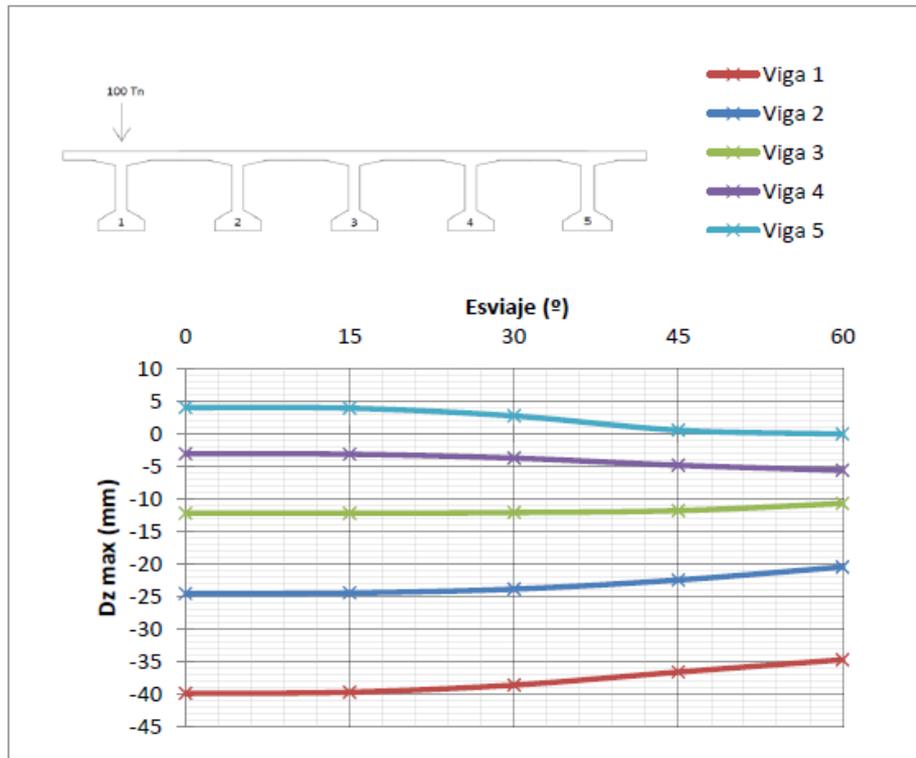


Figura 3.13: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical máximo.

Dz Carga Puntual 1	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-40.0	-39.8	-38.7	-36.7	-34.8
Viga 2	-24.6	-24.5	-23.9	-22.5	-20.5
Viga 3	-12.2	-12.2	-12.1	-11.8	-10.7
Viga 4	-3.0	-3.1	-3.7	-4.8	-5.6
Viga 5	4.1	4.0	2.8	0.6	0.0

Tabla 3.11: Desplazamiento vertical máximo de cada viga.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Dz Max. Viga cargada	-40.0	-39.8	-38.7	-36.7	-34.8
Dz Max. Viga contigua	-24.6	-24.5	-23.9	-22.5	-20.5
Relación	61.50%	61.56%	61.76%	61.31%	58.91%

Tabla 3.12: Relación de desplazamientos verticales máximos para la viga cargada y su contigua.

Como se puede apreciar el aporte de rigidez se refleja en un menor desplazamiento vertical máximo. Éste será tanto mayor cuanto mayor sea el ángulo de esviaje. Para el ángulo de 15° vemos como la variación es prácticamente nula. De manera que para la viga cargada, 1, y sus contiguas, 2 y 3, disminuye el valor del desplazamiento vertical (de carácter negativo). Para el caso de la viga 4 prácticamente se mantiene. Por último, para la viga 5, se produce una disminución en el desplazamiento vertical esta vez caracterizado como positivo.

3.2.2 Carga Puntual 3

Se presenta la variación del desplazamiento vertical máximo, para cada una de las vigas, en la sección central del vano cuando se aplica el estado de carga puntual situado en el centro del vano de la viga intermedia:

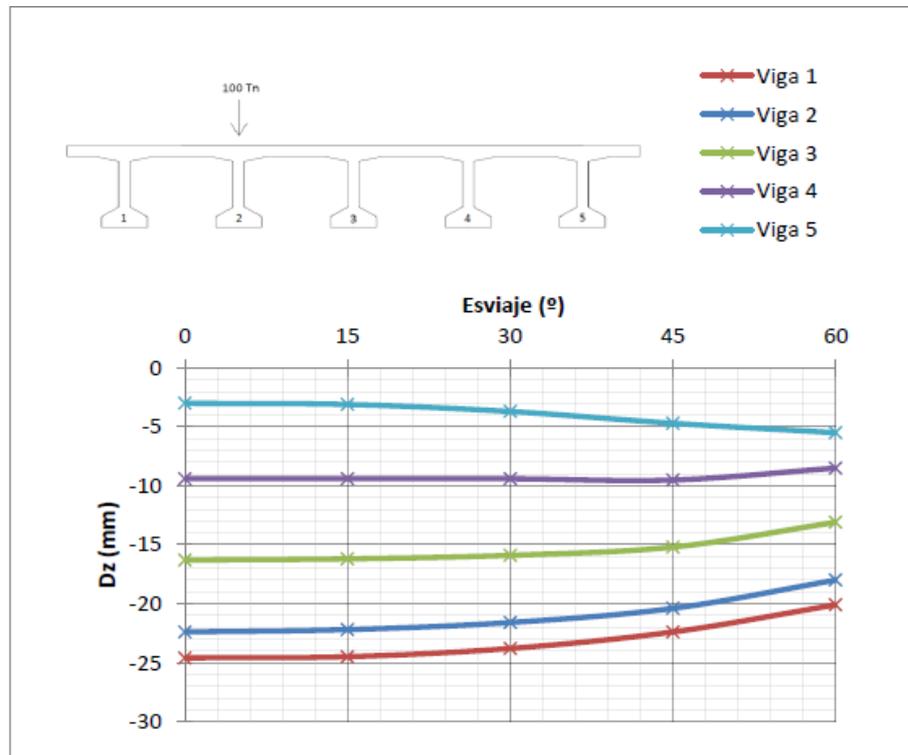


Figura 3.14: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical máximo.

Dz Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-24.6	-24.5	-23.8	-22.4	-20.1
Viga 2	-22.4	-22.2	-21.6	-20.4	-18.0
Viga 3	-16.3	-16.2	-15.9	-15.2	-13.1
Viga 4	-9.4	-9.4	-9.4	-9.5	-8.5
Viga 5	-3.0	-3.1	-3.7	-4.7	-5.5

Tabla 3.13: Desplazamiento vertical máximo de cada viga.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Dz Max. Viga externa	-24.6	-24.5	-23.8	-22.4	-20.1
Dz Max. Viga cargada	-22.4	-22.2	-21.6	-20.4	-18.0
Dz Max. Viga central	-16.3	-16.2	-15.9	-15.2	-13.1
Relación externa-central	91.06%	90.61%	90.76%	91.07%	89.55%
Relación cargada-central	72.77%	72.97%	73.61%	74.51%	72.78%

Tabla 3.14: Relación de desplazamientos verticales máximos para la viga cargada y sus contiguas.

Se reflejan unos resultados análogos al caso anterior. El desplazamiento vertical se mantiene prácticamente para el esviaje de 15°. A partir de ahí para la viga cargada, 2, y sus contiguas, 1,3 y 4, disminuye el valor del desplazamiento vertical tanto menor cuanto mayor es el esviaje. Para el caso de la viga más alejada a la carga, aumenta su desplazamiento en 2.5 mm.

3.2.3 Carga Puntual 4

Se presenta la variación del desplazamiento vertical máximo, para cada una de las vigas, en la sección central del vano cuando se aplica el estado de carga puntual situado en el centro del vano de la viga central:

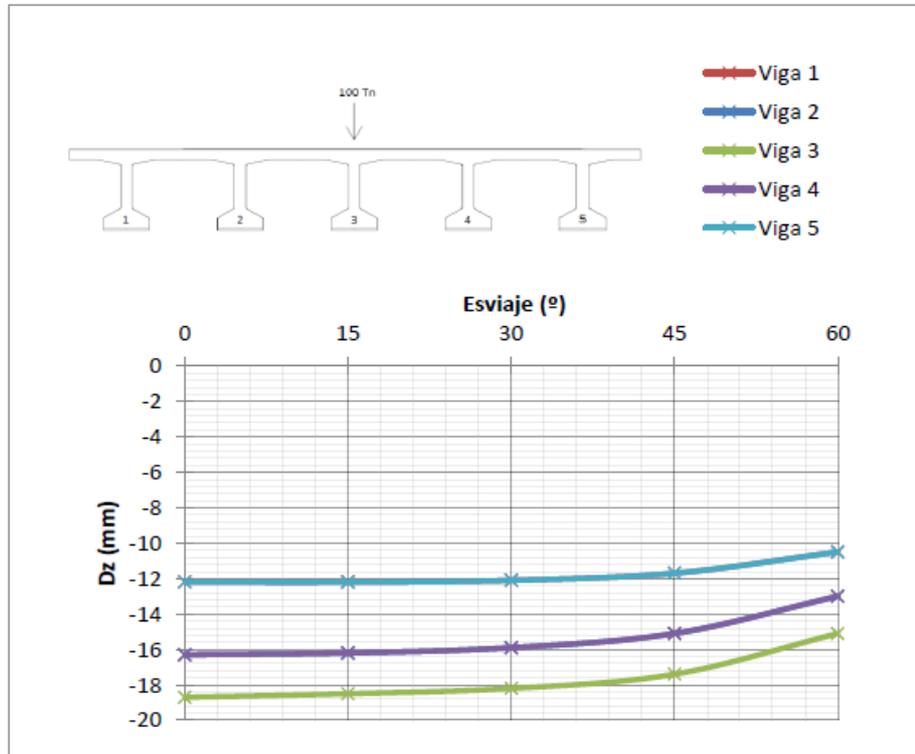


Figura 3.15: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical máximo.

Dz Carga Puntual 4	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-12.2	-12.2	-12.1	-11.7	-10.5
Viga 2	-16.3	-16.2	-15.9	-15.1	-13.0
Viga 3	-18.7	-18.5	-18.2	-17.4	-15.1
Viga 4	-16.3	-16.2	-15.9	-15.1	-13.0
Viga 5	-12.2	-12.2	-12.1	-11.7	-10.5

Tabla 3.15: Desplazamiento vertical máximo de cada viga.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Dz Max. Viga cargada	-18.7	-18.5	-18.2	-17.4	-15.1
Dz Max. Viga contigua	-16.3	-16.2	-15.9	-15.1	-13.0
Relación	87.17%	87.57%	87.36%	86.78%	86.09%

Tabla 3.16: Relación de desplazamientos verticales máximos para la viga cargada y su contigua.

Se aprecia la misma tendencia: como un aumento en el esviaje produce un aumento de rigidez y, por tanto, se produce un menor desplazamiento vertical máximo tanto menor cuanto mayor es el esviaje. Esta vez se produce una situación simétrica para las vigas 1 y 5; y 2 y 4.

3.2.4 Conclusiones

Se observan unos resultados análogos al estudio del desplazamiento vertical en la sección de la aplicación de la carga (Apartado 1.1.4). Se observa que la flecha disminuye en todas las vigas de forma generalizada lo que nos lleva a afirmar que la rigidez longitudinal aumenta cuando lo hace el esviaje.

Este aumento de la rigidez longitudinal no parece afectar mucho al reparto de la flexión transversal, ya que las proporciones entre las flechas de las vigas contiguas respecto de las vigas cargadas no cambian significativamente, salvo para el esviaje de 60° en el que dicho porcentaje disminuye, en consonancia con el aumento de la rigidez longitudinal.

El porcentaje de la flecha de la viga contigua respecto de la flecha de la viga cargada se mantiene relativamente constante hasta 45° y disminuye para 60° , lo que indica un peor reparto de la flexión longitudinal, ocasionado por una menor rigidez transversal en relación a la rigidez longitudinal. O lo que es lo mismo, el aumento de rigidez longitudinal no perjudica al reparto transversal, salvo para ángulos de 60° donde sí se apreciaba un peor reparto.

3.2.5 Carga Distribuida

Se presenta la variación del desplazamiento vertical máximo, para cada una de las vigas, en los puntos de la sección central ortogonal al eje longitudinal cuando se aplica el estado de carga distribuida:

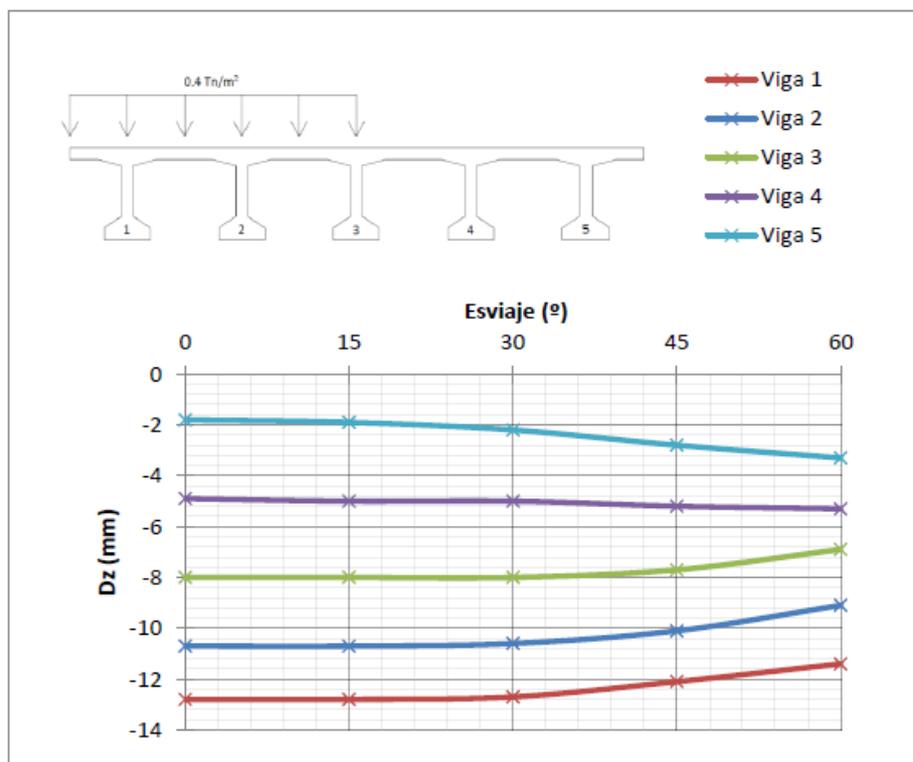


Figura 3.16: Influencia del esviaje en el desplazamiento vertical máximo.

Dz Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-12.8	-12.8	-12.7	-12.1	-11.4
Viga 2	-10.7	-10.7	-10.6	-10.1	-9.1
Viga 3	-8.0	-8.0	-8.0	-7.7	-6.9
Viga 4	-4.9	-5.0	-5.0	-5.2	-5.3
Viga 5	-1.8	-1.9	-2.2	-2.8	-3.3

Tabla 3.17: Desplazamiento vertical máximo de cada viga.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Dz Max. Viga cargada (3)	-8.0	-8.0	-8.0	-7.7	-6.9
Dz Max. Viga contigua (4)	-4.9	-5.0	-5.0	-5.2	-5.3
Relación	61.25%	62.50%	62.50%	67.53%	76.81%

Tabla 3.18: Relación de desplazamientos verticales máximos para la viga cargada y su contigua.

Para este estado de carga, observamos que para los esviajes de 15° y 30° la variación se puede considerar nula. Para los esviajes 45° y 60° se refleja la disminución de desplazamiento vertical para las vigas donde se aplica la carga mientras que las vigas no cargadas aumentan.

En este caso se aprecia una mayor redistribución de las flechas conforme aumenta el esviaje, motivada por la torsión que la carga repartida genera en las inmediaciones del apoyo. Por tanto, por el contrario que para la carga puntual, para el caso de carga distribuida se observa un aumento de rigidez transversal y, por consiguiente, un mejor reparto de la flexión longitudinal.

3.3 Corrimientos horizontales

3.3.1 Carga Puntual 1

Se presenta la variación del desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de las vigas, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga del extremo:

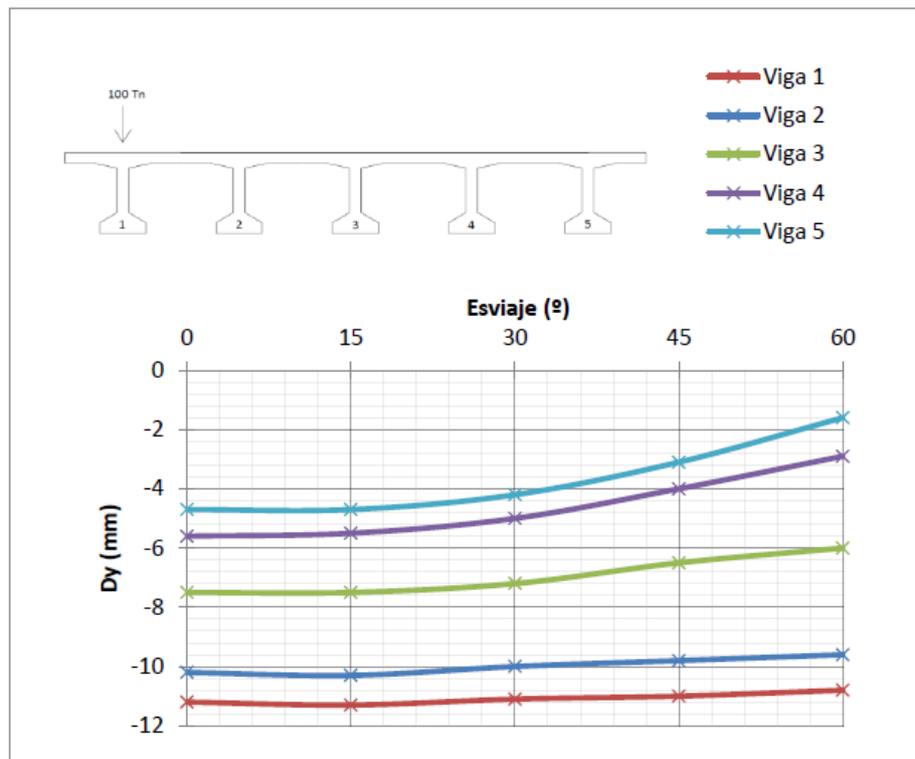


Figura 3.17: Influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Dy Carga Puntual 1	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-11.2	-11.3	-11.1	-11.0	-10.8
Viga 2	-10.2	-10.3	-10.0	-9.8	-9.6
Viga 3	-7.5	-7.5	-7.2	-6.5	-6.0
Viga 4	-5.6	-5.5	-5.0	-4.0	-2.9
Viga 5	-4.7	-4.7	-4.2	-3.1	-1.6

Tabla 3.19: Desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Se refleja como la viga cargada y su contigua experimentan incrementos en los desplazamientos casi despreciables, por el contrario las vigas no cargadas experimentan un desplazamiento menor cuanto mayor sea el esviaje. La tendencia es que, en este caso, no parece que el giro de torsión de la viga cargada se vea afectado por el esviaje.

3.3.2 Carga Puntual 3

Se presenta la variación del desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de las vigas, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga intermedia:

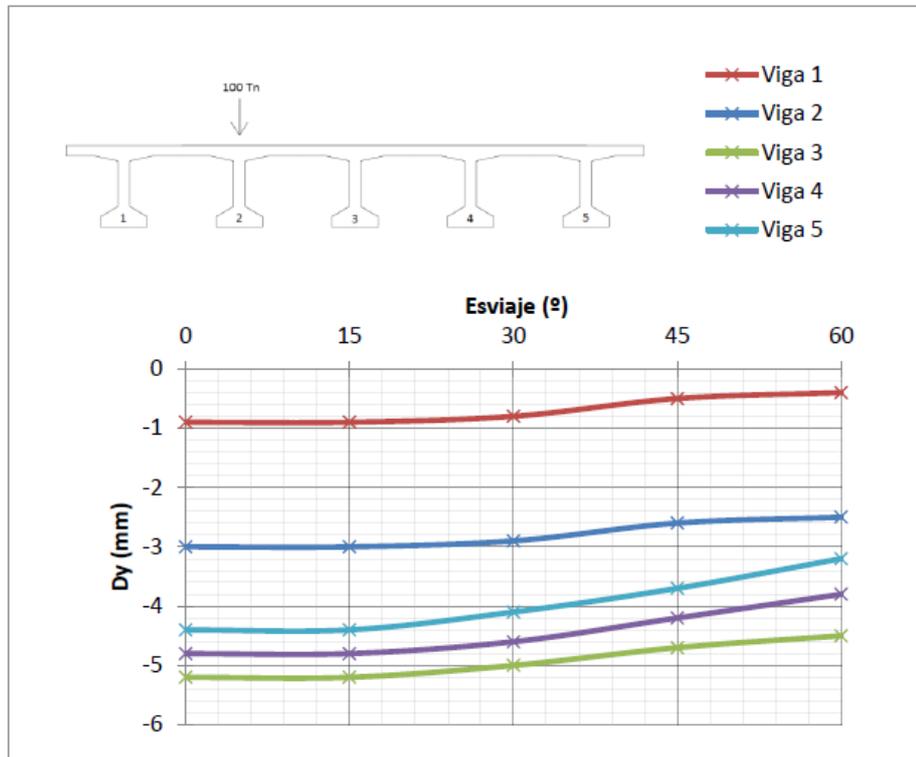


Figura 3.18: Influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Dy Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-0.9	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4
Viga 2	-3.0	-3.0	-2.9	-2.6	-2.5
Viga 3	-5.2	-5.2	-5.0	-4.7	-4.5
Viga 4	-4.8	-4.8	-4.6	-4.2	-3.8
Viga 5	-4.4	-4.4	-4.1	-3.7	-3.2

Tabla 3.20: Desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

La influencia del esviaje se ve reflejada en un descenso del desplazamiento horizontal acrecentado a medida que aumenta el esviaje. Para el esviaje 15° podemos considerarlo despreciable.

3.3.3 Carga Puntual 4

Se presenta la variación del desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de las vigas, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga central:

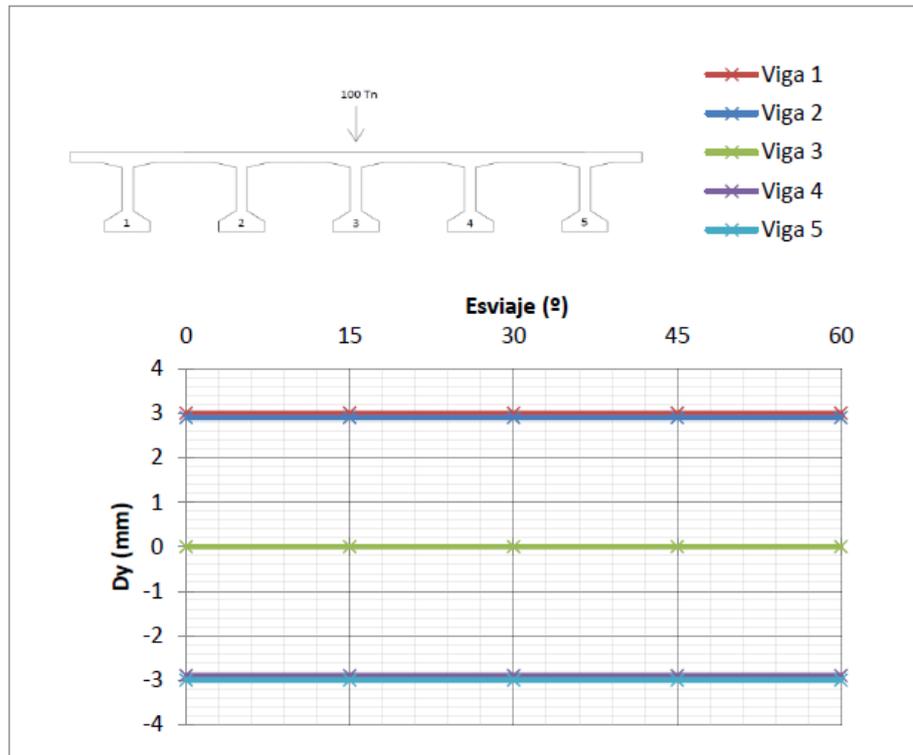


Figura 3.19: Influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Dy Carga Puntual 4	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Viga 2	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Viga 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Viga 4	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9
Viga 5	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0

Tabla 3.21: Desplazamiento horizontal de la cabeza inferior cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Para este estado de carga puntual, la respuesta del puente es simétrica. Además, el esviaje no influye en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de las vigas.

3.3.4 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de las vigas, en los puntos de la sección central ortogonal al eje longitudinal para cada una de las vigas, para el estado de carga distribuida:

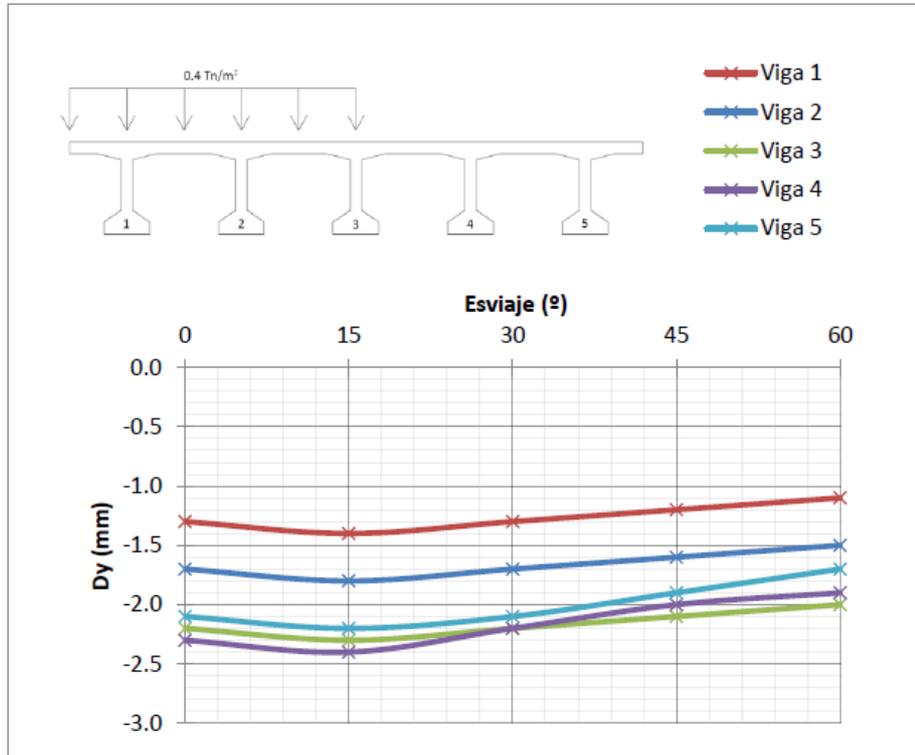


Figura 3.20: Influencia del esviaje en el desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de cada viga en la sección ortogonal al eje longitudinal situada en mitad del vano.

Dy Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-1.3	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
Viga 2	-1.7	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5
Viga 3	-2.2	-2.3	-2.2	-2.1	-2.0
Viga 4	-2.3	-2.4	-2.2	-2.0	-1.9
Viga 5	-2.1	-2.2	-2.1	-1.9	-1.7

Tabla 3.22: Desplazamiento horizontal de la cabeza inferior de cada viga en la sección ortogonal al eje longitudinal situada en mitad del vano.

Para el estado de carga distribuida, la influencia del esviaje se refleja como un aumento del valor del desplazamiento para el esviaje de 15° . Mientras que se produce una disminución para el resto de esviajes. La tendencia es muy suave y el menor desplazamiento horizontal para mayores esviajes está relacionado con una menor diferencia en la flexión de las distintas vigas, consecuentemente un menor giro de torsión.

3.3.5 Conclusiones

Se observan desplazamientos tanto mayores cuanto más descentrada está la carga (véase la tabla 22, 23 y 24). La tendencia para la carga puntual es que no parece que el giro de torsión se vea afectado por el esviaje. Para el caso de carga distribuida se observa la misma tendencia, de forma muy suave, para la cual el menor desplazamiento horizontal para mayores esviajes está relacionado con una menor diferencia en la flexión de las distintas vigas, consecuentemente un menor giro de torsión.

3.4 Análisis del momento flector longitudinal

Al igual que ocurría con el desplazamiento vertical, se realiza una comparación entre el momento flector longitudinal en la sección de aplicación de la carga con respecto al flector máximo en términos de su valor y ubicación. En primer lugar, se realizará la comparativa entre ambos, posteriormente se muestran los resultados obtenidos para estos dos parámetros.

3.4.1 Carga Puntual 1

Para el caso de carga puntual en la viga del extremo se observa que el flector máximo de las vigas 1, 2 se mantienen en la sección transversal en la cual está aplicada la carga. Los correspondientes a las vigas 3 y 4 se desplazan de manera creciente hacia al derecha. Con respecto a la viga 5 se aprecia que su momento, negativo, se reduce hasta tal punto que, para el caso de 60°, se alcanza el valor nulo en el apoyo de la derecha y se produce un máximo positivo.

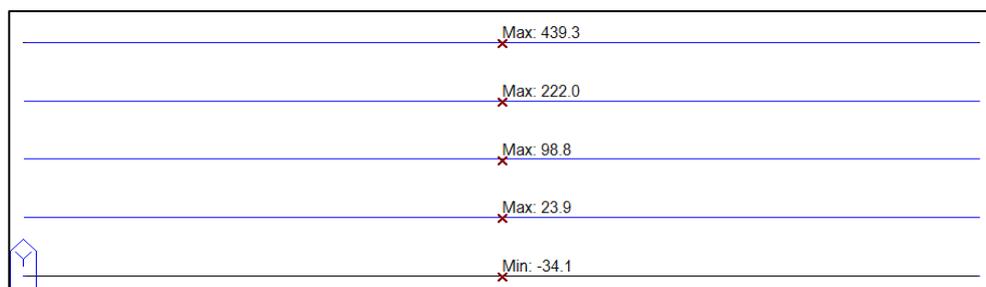


Figura 3.21: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente sin esviaje.

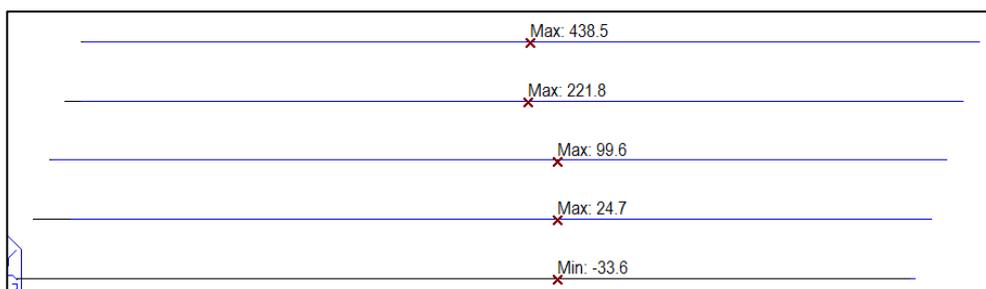


Figura 3.22: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente de esviaje 15°.

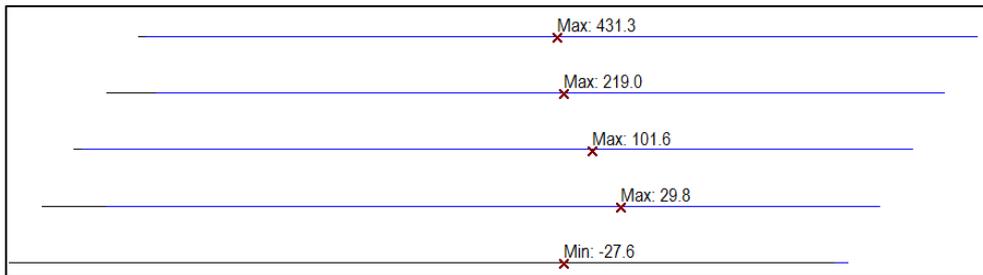


Figura 3.23: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente de esviaje 30°.

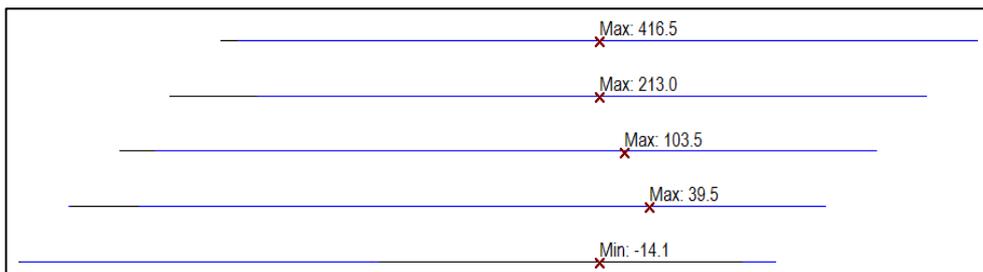


Figura 3.24: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente de esviaje 45°.



Figura 3.25: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 1. Puente de esviaje 60°.

3.4.2 Carga Puntual 3

Para el caso de carga puntual en la viga intermedia se observa que el flector máximo de las vigas 1, 2, 3 y 4 se mantienen, aproximadamente, en la sección transversal en la cual está aplicada la carga y su valor disminuye con el aumento del ángulo de esviaje. Caso contrario ocurre en la viga 5, cuyo valor es creciente y se ubica en torno al centro del vano de la viga 5.

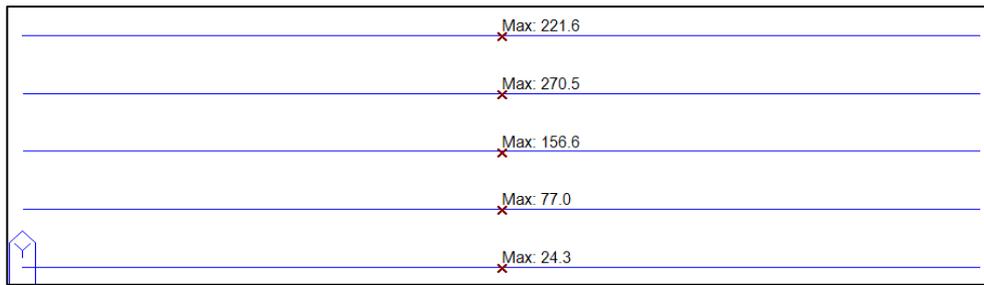


Figura 3.26: M_y máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente sin esviaje.

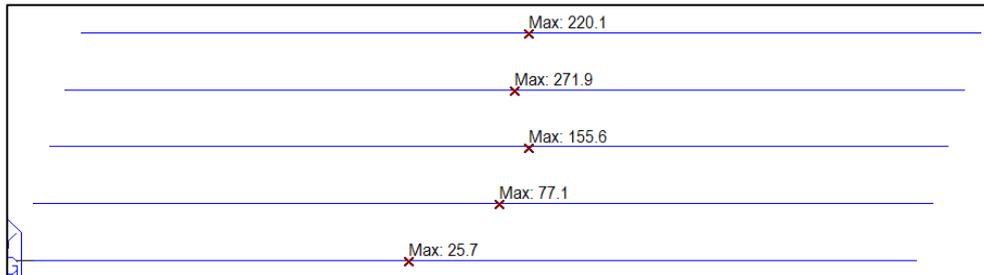


Figura 3.27: M_y máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 15°.

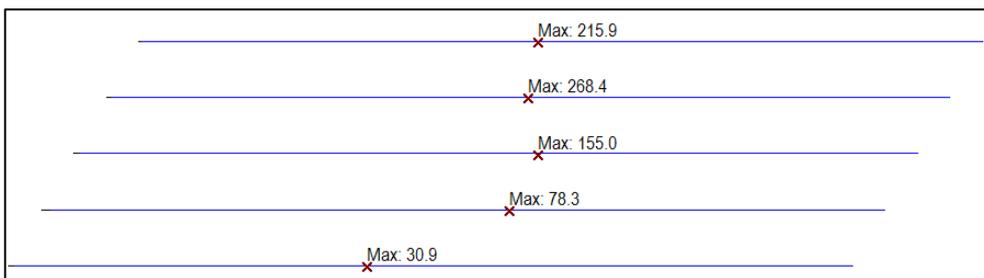


Figura 3.28: M_y máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 30°.

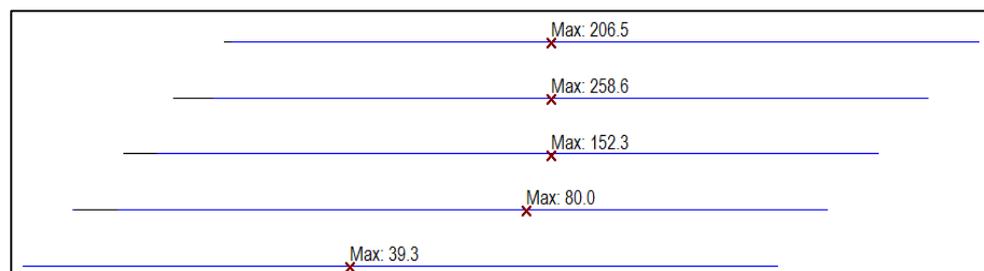


Figura 3.29: M_y máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 45°.

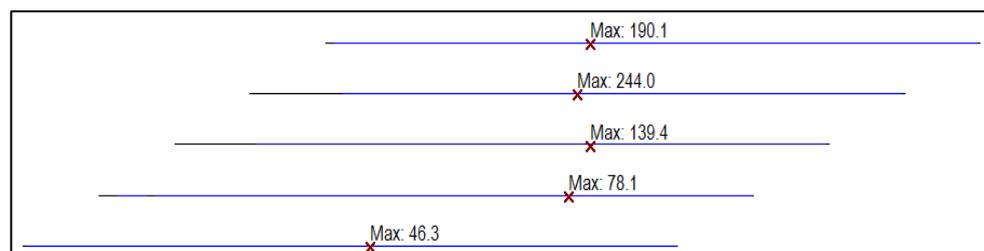


Figura 3.30: M_y máximo de cada viga para el caso de carga puntual 3. Puente de esviaje 60°.

3.4.3 Carga Puntual 4

Para el caso de carga puntual en la viga central se observa que el flector máximo de las vigas 2, 3 y 4 se mantienen en la sección transversal y su valor disminuye con el aumento del ángulo de esviaje. Para el caso de las vigas 1 y 5, éste se desplaza ligeramente a derecha e izquierda respectivamente. Su valor también disminuye con el aumento del esviaje.

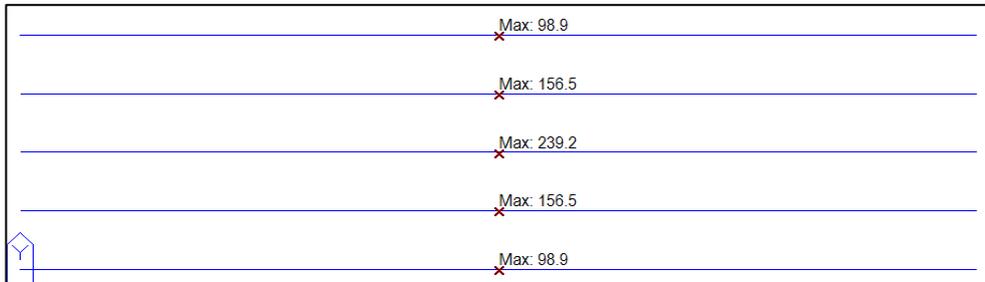


Figura 3.31: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente sin esviaje.

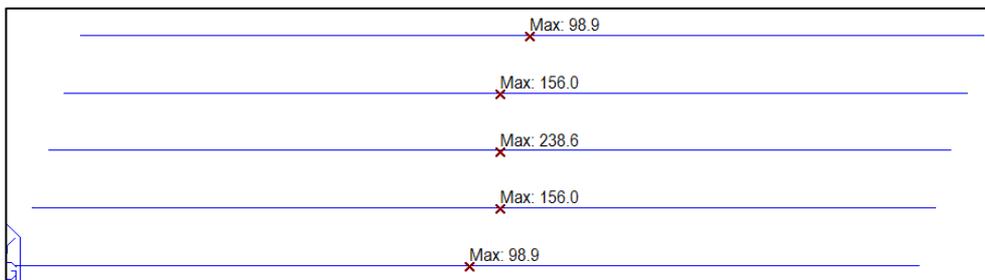


Figura 3.32: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente de esviaje 15°.

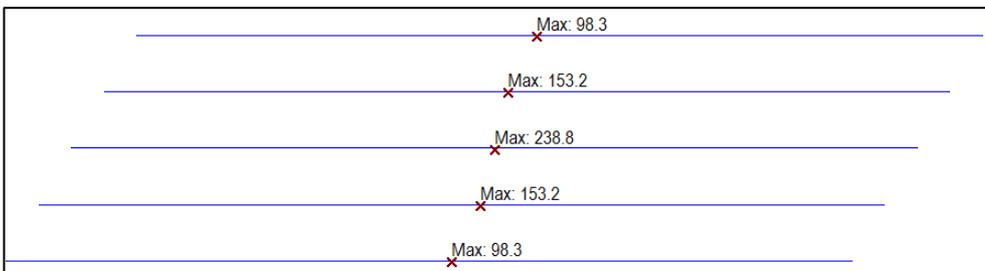


Figura 3.33: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente de esviaje 30°.

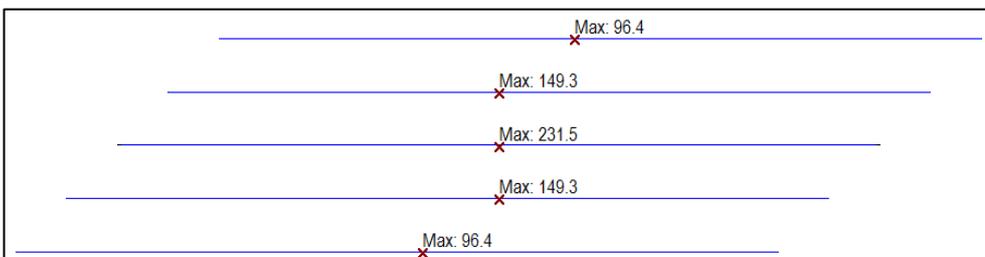


Figura 3.34: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente de esviaje 45°.

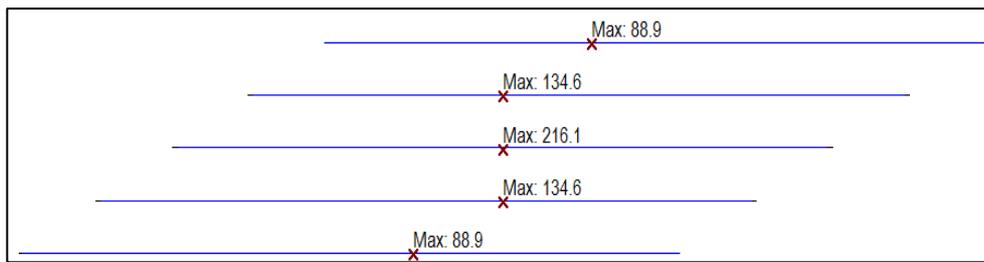


Figura 3.35: My máximo de cada viga para el caso de carga puntual 4. Puente de esviaje 60°.

3.4.4 Carga Distribuida

Para el caso de carga distribuida se observa que el flector máximo de las vigas 1, 2, 3 se producen, aproximadamente, en la sección ortogonal al eje longitudinal que se encuentra centrada en la viga 2. En el caso de la viga 4 se desplaza ligeramente a la izquierda mientras que para la viga 5 se puede considerar que se produce en el centro de su vano particular. Se comprueba a su vez que su valor disminuye con el aumento del esviaje, a excepción de la viga 5.

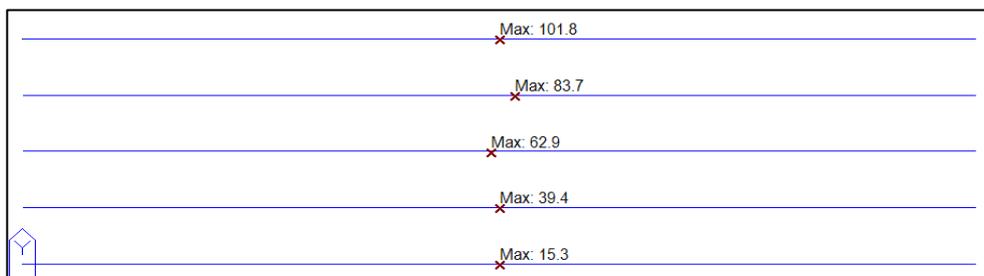


Figura 3.36: My máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente sin esviaje.

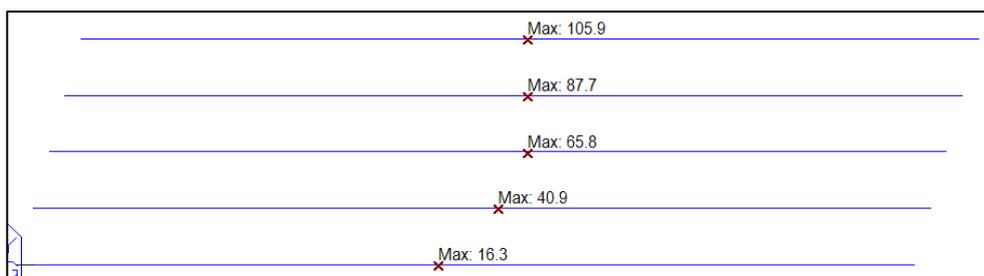


Figura 3.37: My máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 15°.

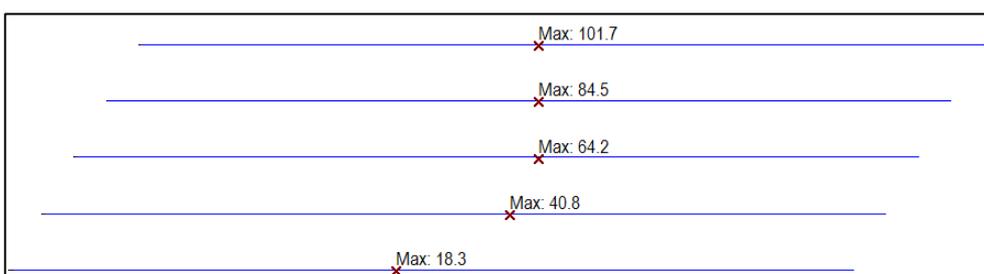


Figura 3.38: My máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 30°.

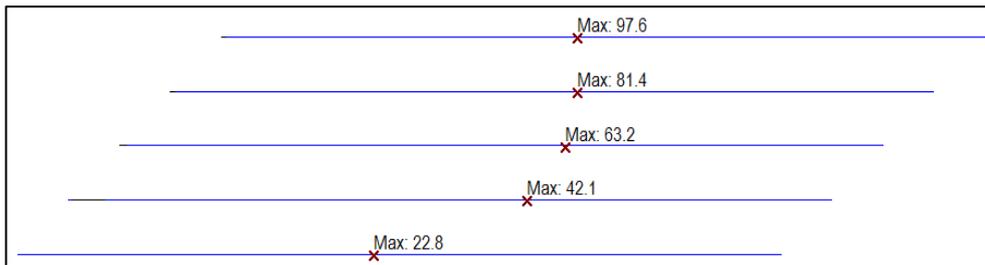


Figura 3.39: M_y máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 45° .

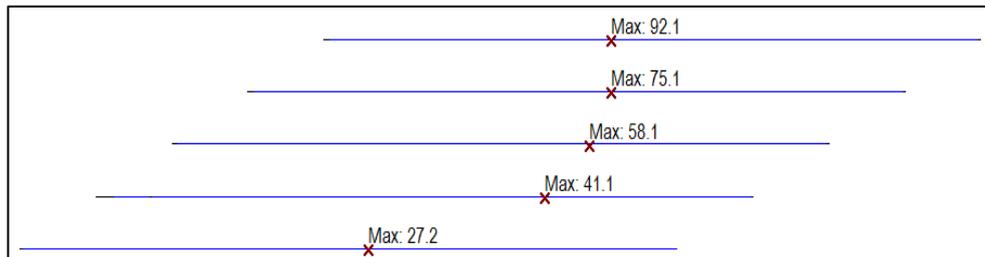


Figura 3.40: M_y máximo de cada viga para el caso de carga distribuida. Puente de esviaje 60° .

3.4.5 Conclusiones

En base a los resultados analizados se observa una clara tendencia a que las vigas manifiestan su momento flector máximo en la sección de aplicación de la carga mientras que su flecha máxima se desplazaba a la zona del centro de su luz en cada viga.

3.5 Momento flector longitudinal

3.5.1 Carga Puntual 1

Se presenta la variación del momento flector longitudinal, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga del extremo:

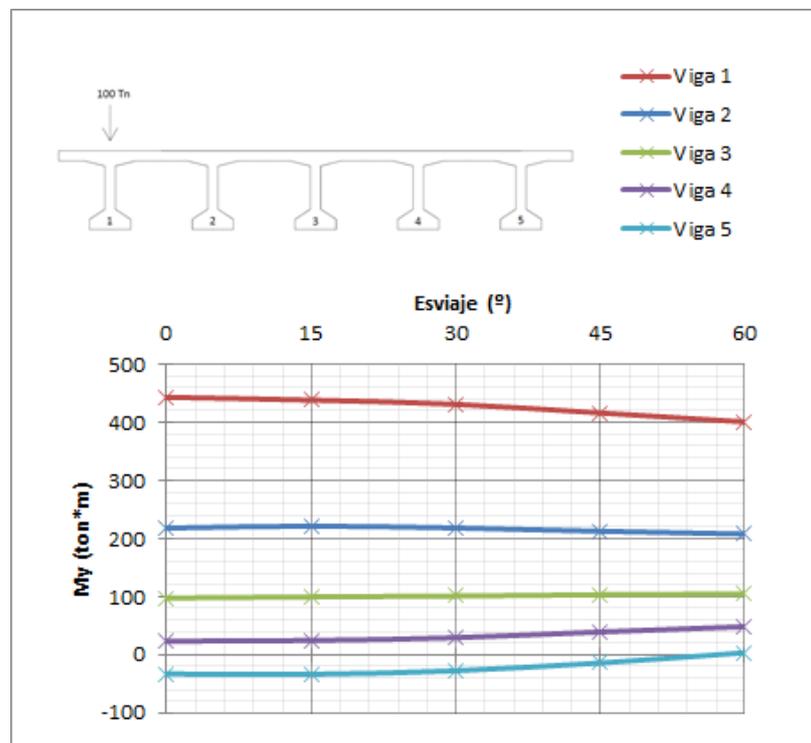


Figura 3.41: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal en la sección donde se aplica de la carga.

My Long. Carga Puntual 1	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	443.4	438.5	431.3	416.5	401.1
Viga 2	218.2	221.6	218.4	212.7	208.0
Viga 3	97.8	99.6	101.1	103.5	104.8
Viga 4	23.6	24.7	29.5	39.4	48.4
Viga 5	-32.9	-33.5	-27.5	-13.9	3.7

Tabla 3.23: Momento flector longitudinal de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
My viga cargada	443.4	438.5	431.3	416.5	401.1
My viga contigua	218.2	221.6	218.4	212.7	208.0
Relación	49.21%	50.54%	50.64%	51.07%	51.86%

Tabla 3.24: Relación de los momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua.

Se observa como un aumento en el esviaje genera un aumento de rigidez transversal, de modo que la viga cargada experimenta un momento flector cada vez menor, mientras que las vigas no cargadas 4 y 5 ven incrementado su valor. Para el caso de la viga contigua y central el valor se mantiene constante.

3.5.2 Carga Puntual 3

Se presenta la variación del momento flector longitudinal, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga intermedia:

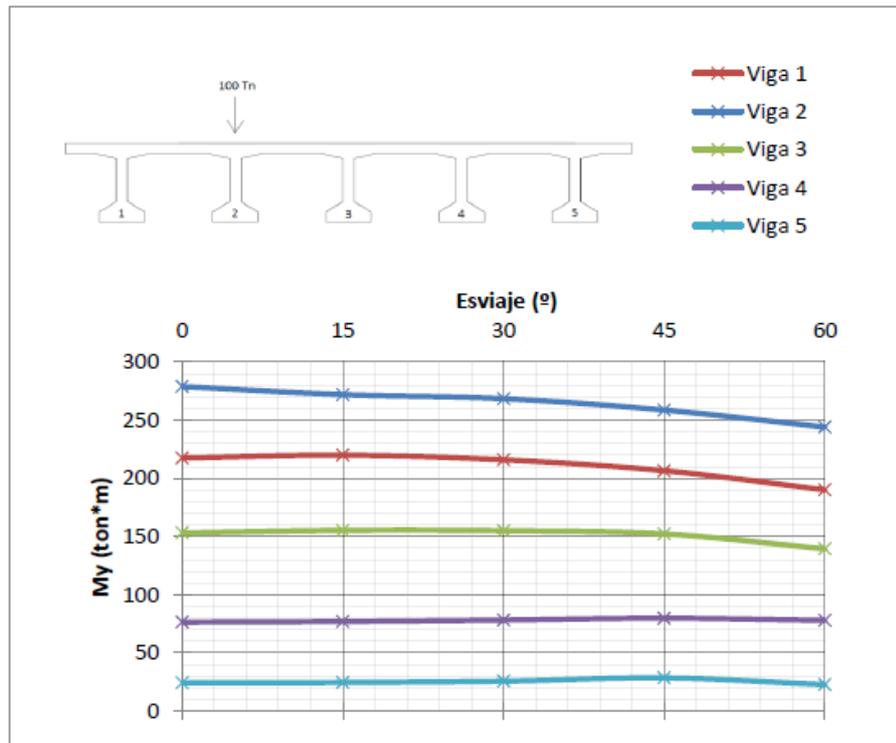


Figura 3.42: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal en la sección donde se aplica de la carga.

My Long. Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	217.5	219.9	215.9	206.5	190.1
Viga 2	278.8	271.9	268.4	258.6	244.0
Viga 3	153.1	155.3	155.0	152.2	139.4
Viga 4	76.4	77.0	78.2	79.8	77.9
Viga 5	24.2	24.6	25.7	28.5	22.8

Tabla 3.25: Momento flector longitudinal de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
My viga externa	217.5	219.9	215.9	206.5	190.1
My viga cargada	278.8	271.9	268.4	258.6	244.0
My viga central	153.1	155.3	155.0	152.2	139.4
Relación externa-cargada	78.01%	80.88%	80.44%	79.85%	77.91%
Relación central-cargada	54.91%	57.12%	57.75%	58.86%	57.13%

Tabla 3.26: Relación de los momentos flectores longitudinales para la viga cargada y sus contiguas.

Se observa como se produce un aumento de rigidez que se refleja en la reducción de los momentos flectores que se producen en la viga cargada y la viga extrema. Las vigas 3, 4 y 5 se mantienen prácticamente constantes.

Para el ángulo de 60°, se refleja una disminución en los momentos flectores de todas las vigas.

3.5.3 Carga Puntual 4

Se presenta la variación del momento flector longitudinal, para cada una de las vigas, en la sección transversal donde se aplica la carga para el estado de carga puntual situado en la viga central:

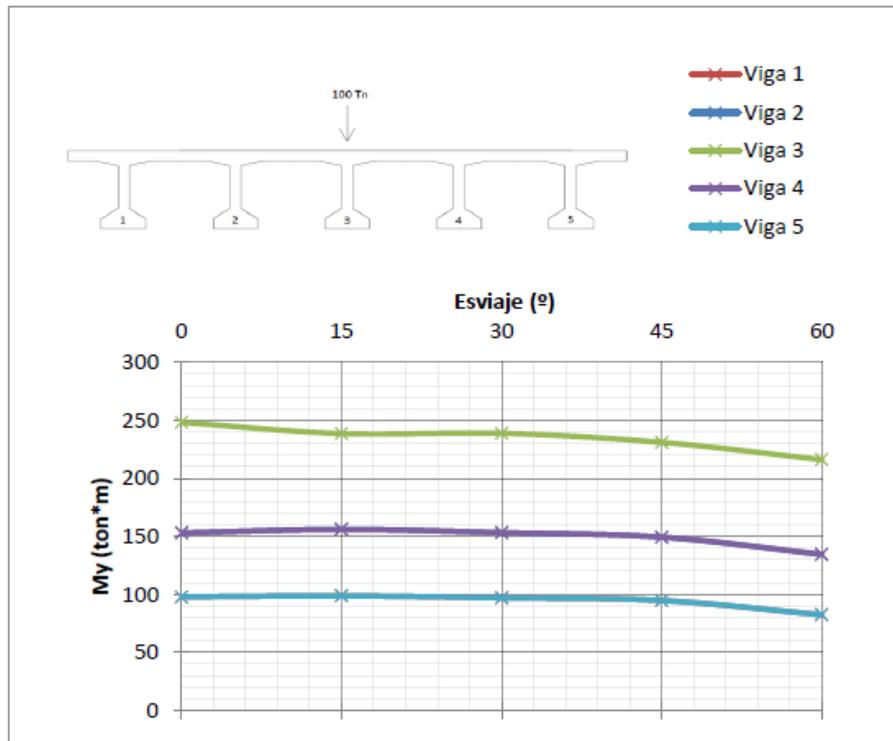


Figura 3.43: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal en la sección donde se aplica de la carga.

My Long. Carga Puntual 4	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	97.9	98.7	97.0	94.7	82.4
Viga 2	153.0	156.0	153.2	149.3	134.5
Viga 3	248.2	238.6	238.8	231.0	216.1
Viga 4	153.0	156.0	153.2	149.3	134.5
Viga 5	97.9	98.7	97.0	94.7	82.4

Tabla 3.27: Momento flector longitudinal de cada viga en la sección donde se aplica de la carga.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
My viga cargada	248.2	238.6	238.8	231.0	216.1
My viga contigua	153.0	156.0	153.2	149.3	134.5
Relación	61.64%	65.38%	64.15%	64.63%	62.24%

Tabla 3.28: Relación de los momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua.

Se observa un comportamiento análogo al caso anterior. Adicionalmente, éste es simétrico y más marcado a partir de 45°.

3.5.4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se puede apreciar que, si se compara el momento flector en la viga contigua a la cargada con el momento flector en la viga que recibe directamente la carga, se observan unos porcentajes que no varían significativamente con el esviaje y, habida cuenta de que ya habíamos constatado una rigidización longitudinal al analizar las flechas, el hecho de que el reparto transversal no se vea perjudicado permite decir que igualmente se produce una rigidización transversal del puente, aunque esa rigidización transversal no evoluciona exactamente igual que la longitudinal, como puede apreciarse en la pequeña variación en el reparto de la flexión longitudinal.

3.5.5 Análisis comparativo de los momentos flectores longitudinales de las vigas cargadas

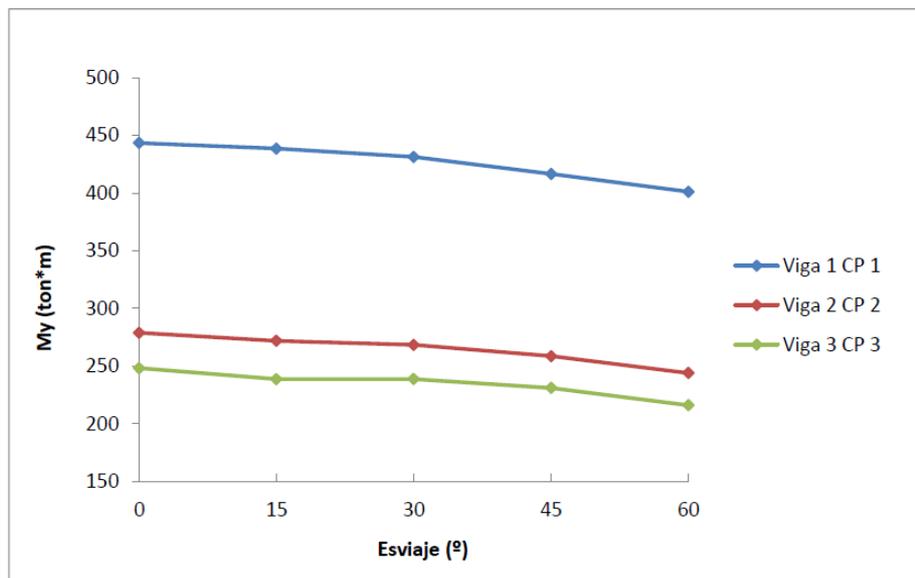


Figura 3.44: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal para cada viga cargada.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1 CP 1	100.00%	98.89%	97.27%	93.93%	90.46%
Viga 2 CP 2	100.00%	97.53%	96.27%	92.75%	87.52%
Viga 3 CP 3	100.00%	96.13%	96.21%	93.07%	87.07%

Tabla 3.29: Relación entre los momentos flectores longitudinales de la viga cargada según el esviaje respecto al puente sin esviaje.

En esta comparativa se puede apreciar como no sólo se aprecia una disminución de la flecha con el esviaje, sino también una disminución de los momentos flectores, más acusada cuando la carga está centrada.

3.5.6 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en momento flector longitudinal, en los puntos de la sección central ortogonal al eje longitudinal para cada una de las vigas, para el estado de carga distribuida:

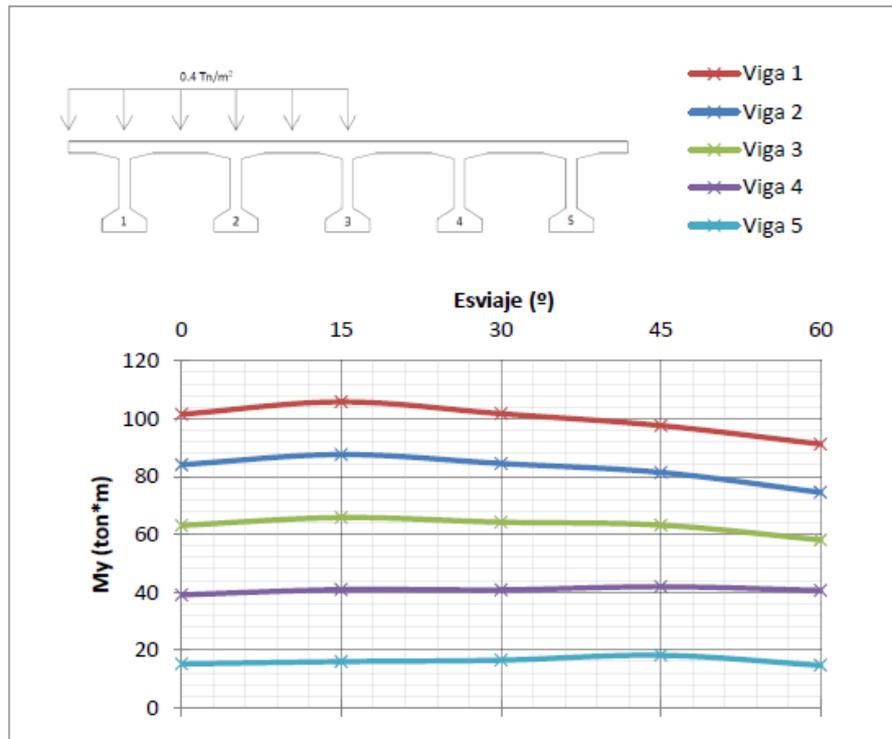


Figura 3.45: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal en la sección central ortogonal al eje longitudinal.

My Long. Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	101.5	105.8	101.7	97.6	91.2
Viga 2	84.1	87.6	84.5	81.4	74.5
Viga 3	63.1	65.8	64.2	63.2	58.1
Viga 4	39.1	40.9	40.8	41.9	40.6
Viga 5	15.2	16.0	16.5	18.2	14.7

Tabla 3.30: Momento flector longitudinal de cada viga en la sección central ortogonal al eje longitudinal.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
My viga cargada (3)	63.1	65.8	64.2	63.2	58.1
My viga contigua (4)	39.1	40.9	40.8	41.9	40.6
Relación	61.97%	62.16%	63.55%	66.30%	69.88%

Tabla 3.31: Relación de los momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua.

La redistribución del momento flector asciende con el esviaje, de forma más marcada cuando éste aumenta.

Como en el caso de las cargas puntuales podemos decir que el aumento de la rigidez longitudinal con el esviaje va acompañado de un aumento de la rigidez transversal, en este caso, incluso más marcado.

3.5.7 Análisis comparativo de los momentos flectores longitudinales de las vigas cargadas. Carga distribuida

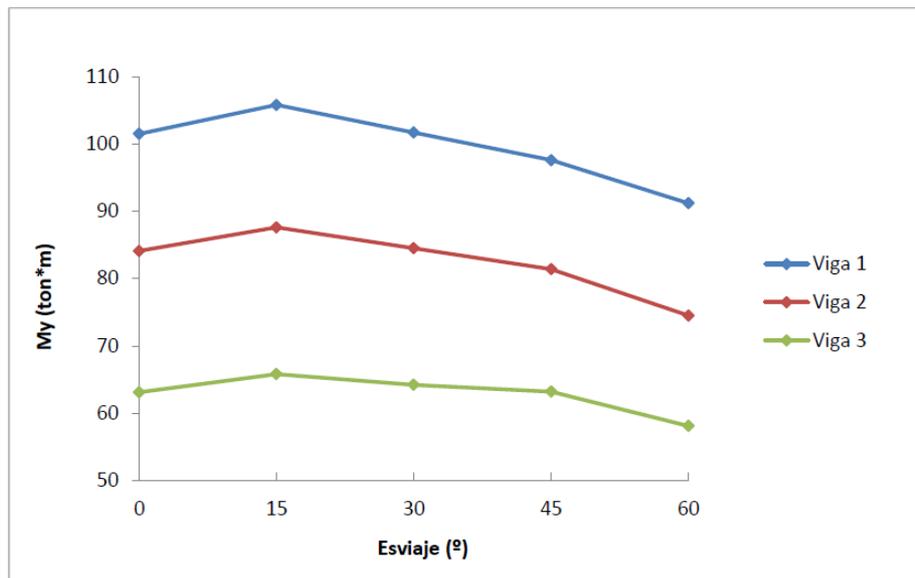


Figura 3.46: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal para cada viga cargada.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	100.00%	104.24%	100.20%	96.16%	89.85%
Viga 2	100.00%	104.16%	100.48%	96.79%	88.59%
Viga 3	100.00%	104.28%	101.74%	100.16%	92.08%

Tabla 3.32: Relación entre los momentos flectores longitudinales de la viga cargada según el esviaje respecto al puente sin esviaje.

Se produce un descenso generalizado de los momentos flectores longitudinales pero aumenta la relación de momentos entre la viga cargada y no cargada. Esta redistribución de momentos flectores conforme aumenta el esviaje viene motivada por el mejor reparto que produce el aumento de la rigidez transversal.

3.6 Momento flector longitudinal máximo

3.6.1 Carga Puntual 1

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo momento flector longitudinal para el estado de carga puntual situado en la viga del extremo. El punto donde se genera el máximo momento varía según se ha analizado en el apartado “1.4.1 Análisis del momento flector longitudinal: Carga Puntual 1.”

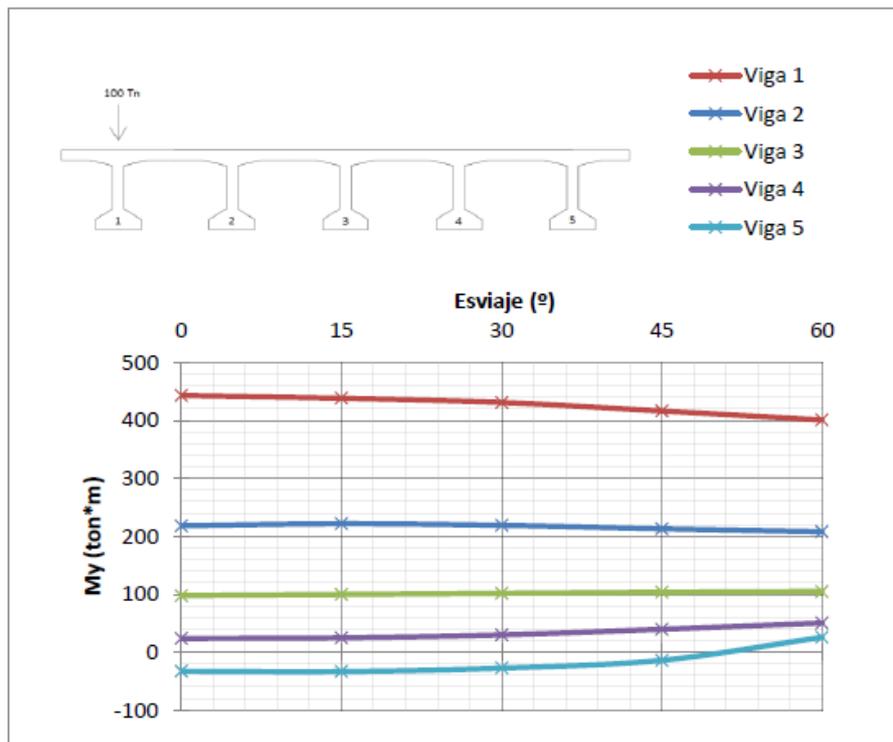


Figura 3.47: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal máximo.

My Long. Carga Puntual 1	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	443.4	438.5	431.3	416.5	401.1
Viga 2	218.2	221.8	219.0	213.0	208.0
Viga 3	97.8	99.6	101.6	103.5	104.8
Viga 4	23.6	24.7	29.8	39.5	50.3
Viga 5	-33.0	-33.6	-27.6	-14.1	25.6

Tabla 3.33: Momento flector longitudinal máximo.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
My viga cargada	443.4	438.5	431.3	416.5	401.1
My viga contigua	218.2	221.8	219.0	213.0	208.0
Relación	49.21%	50.58%	50.78%	51.14%	51.86%

Tabla 3.34: Relación de momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua.

Se observa como un aumento en el esviaje genera un aumento de rigidez transversal, de modo que la viga cargada experimenta un momento flector cada vez menor, mientras que las vigas no cargadas 4 y 5 ven incrementado su valor. Para el caso de la viga contigua y central el valor se mantiene constante.

3.6.2 Carga Puntual 3

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo momento flector longitudinal para el estado de carga puntual situado en la viga intermedia. El punto donde se genera el máximo momento varía según se ha analizado en el apartado “1.4.2 Análisis del momento flector longitudinal: Carga Puntual 3.”

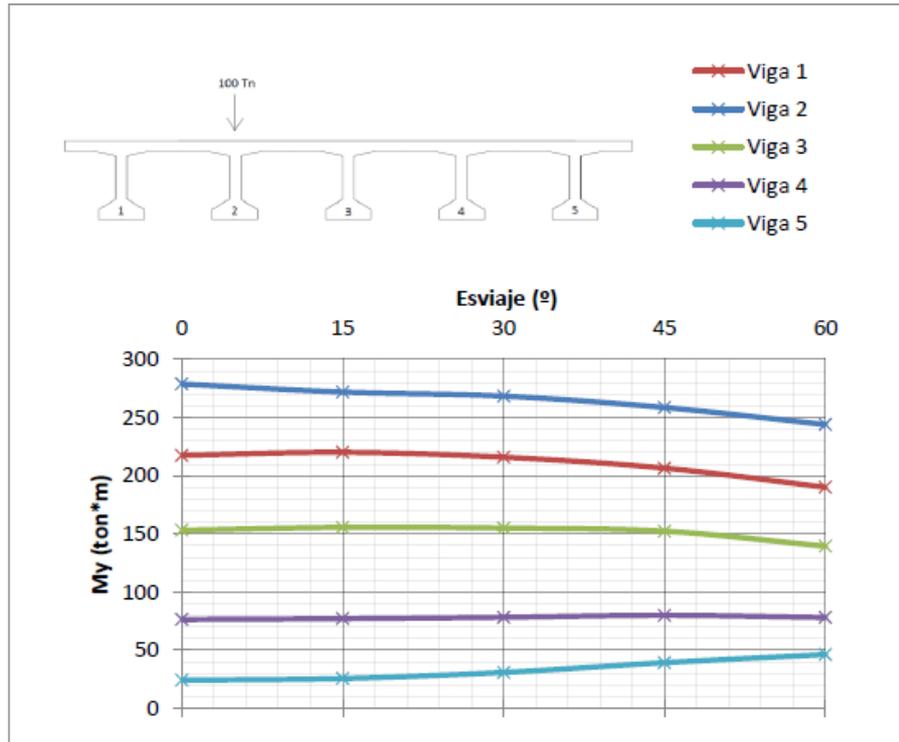


Figura 3.48: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal máximo.

My Long. Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	217.5	220.1	215.9	206.5	190.1
Viga 2	278.8	271.9	268.4	258.6	244.0
Viga 3	153.1	155.6	155.0	152.3	139.4
Viga 4	76.4	77.1	78.3	80.0	78.1
Viga 5	24.2	25.7	30.9	39.3	46.3

Tabla 3.35: Momento flector longitudinal máximo.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
My viga externa	217.5	220.1	215.9	206.5	190.1
My viga cargada	278.8	271.9	268.4	258.6	244.0
My viga central	153.1	155.6	155.0	152.3	139.4
Relación externa-cargada	78.01%	80.95%	80.44%	79.85%	77.91%
Relación central-cargada	54.91%	57.23%	57.75%	58.89%	57.13%

Tabla 3.36: Relación de momentos flectores longitudinales para la viga cargada y sus contiguas.

Análogamente al caso anterior: se observa como la viga cargada y extrema ven reducido su máximo momento flector mientras que la en la viga no cargada aumenta. Se refleja más acentuada a partir de 30°.

3.6.3 Carga Puntual 4

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo momento flector longitudinal para el estado de carga puntual situado en la viga central. El punto donde se genera el máximo momento varía según se ha analizado en el apartado “1.4.3 Análisis del momento flector longitudinal: Carga Puntual 4.”

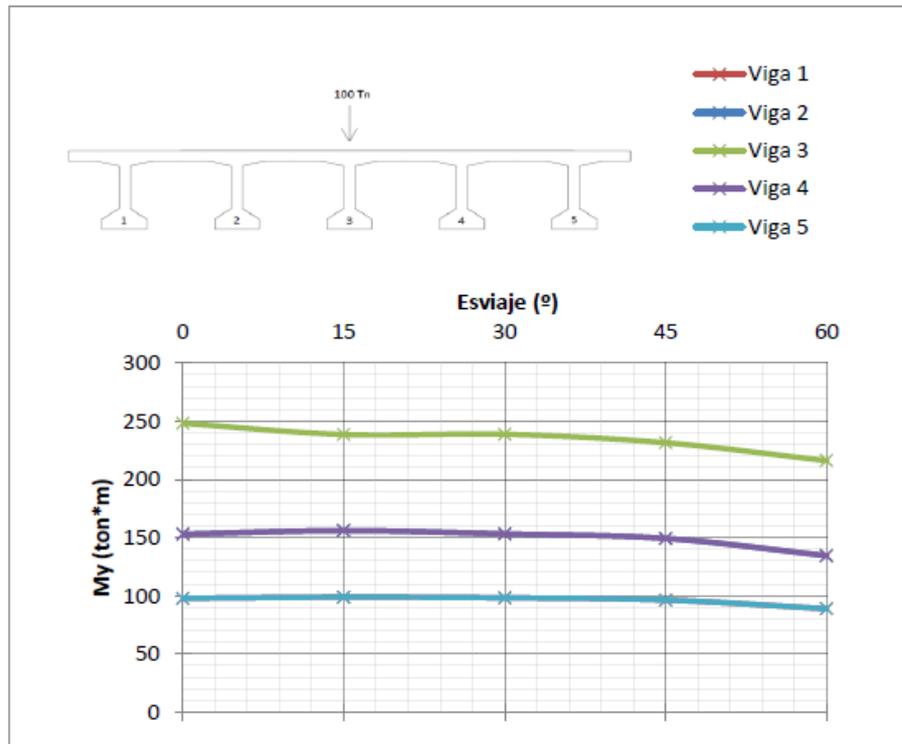


Figura 3.49: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal máximo.

My Long. Carga Puntual 4	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	97.9	98.9	98.3	96.4	88.9
Viga 2	153.0	156.0	153.2	149.3	134.5
Viga 3	248.2	238.6	238.8	231.5	216.1
Viga 4	153.0	156.0	153.2	149.3	134.5
Viga 5	97.9	98.9	98.3	96.4	88.9

Tabla 3.37: Momento flector longitudinal máximo.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
My viga cargada	248.2	238.6	238.8	231.5	216.1
My viga contigua	153.0	156.0	153.2	149.3	134.5
Relación	61.64%	65.38%	64.15%	64.49%	62.24%

Tabla 3.38: Relación de momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua.

Para el caso de la carga centrada, se refleja el aumento de rigidez longitudinal más marcado para la viga intermedia.

3.6.4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se puede apreciar que, si se compara el momento flector en la viga contigua a la cargada con el momento flector en la viga que recibe directamente la carga, se observan unos porcentajes que no varían significativamente con el esviaje y, habida cuenta de que ya habíamos constatado una rigidización longitudinal al analizar las flechas, el hecho de que el reparto transversal no se vea perjudicado permite decir que igualmente se produce una rigidización transversal del puente, aunque esa rigidización transversal no evoluciona exactamente igual que la longitudinal, como puede apreciarse en la pequeña variación en el reparto de la flexión longitudinal.

3.6.5 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo momento flector longitudinal para el estado de carga distribuida. El punto donde se genera el máximo momento varía según se ha analizado en el apartado “1.4. Analisis del momento flector longitudinal.”

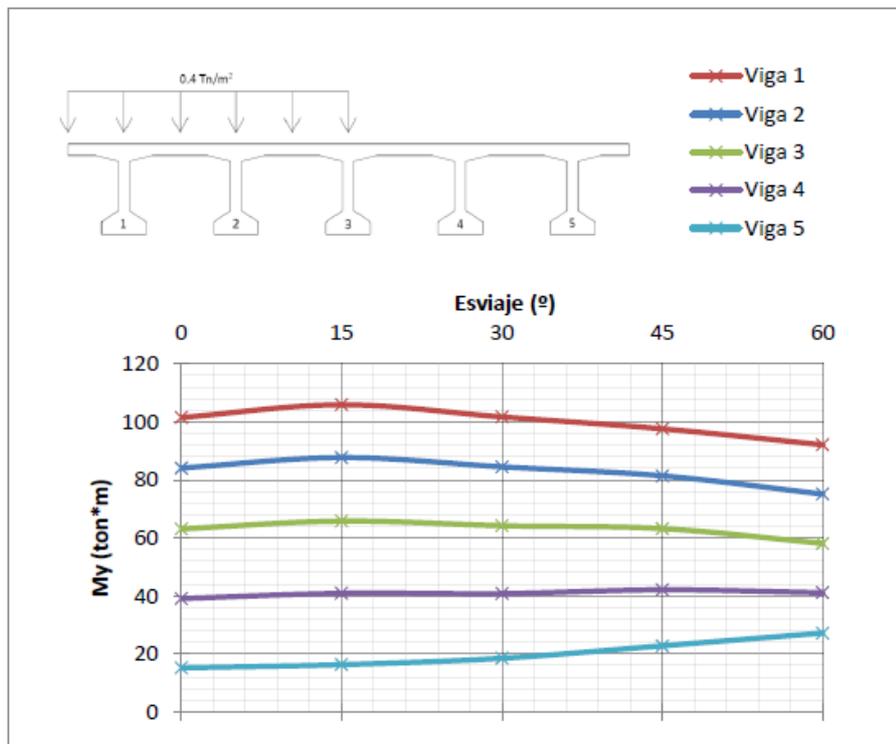


Figura 3.50: Influencia del esviaje en el momento flector longitudinal máximo.

My Long. Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	101.5	105.9	101.7	97.6	92.1
Viga 2	84.1	87.7	84.5	81.4	75.1
Viga 3	63.1	65.8	64.2	63.2	58.1
Viga 4	39.1	40.9	40.8	42.1	41.1
Viga 5	15.2	16.3	18.5	22.8	27.2

Tabla 3.39: Momento flector longitudinal máximo para la carga distribuida.

Esviaje	0°	15°	30°	45°	60°
My Max. Viga cargada (3)	101.5	105.9	101.7	97.6	92.1
My Max. Viga contigua (4)	84.1	87.7	84.5	81.4	75.1
Relación	82.86%	82.81%	83.09%	83.40%	81.54%

Tabla 3.40: Relación de momentos flectores longitudinales para la viga cargada y su contigua.

Se observa una tendencia en el aumento de la rigidez transversal, de esta manera el momento flector longitudinal de las vigas cargadas desciende mientras que aumenta para las vigas no cargadas. Observamos la misma tendencia que el momento flector analizado en la sección central ortogonal al eje longitudinal del apartado anterior con una tendencia más marcada.

3.6.6 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que en el mecanismo de flexión se ven reflejadas la acción conjunta de la rigidez en ambas direcciones. A su vez, el aumento de la rigidez longitudinal afecta de una manera más significativa, mientras que la rigidez transversal se ve modificada en menor medida como puede apreciarse en la pequeña variación en el reparto de la flexión longitudinal.

3.7 Tensiones

3.7.1 Carga Puntual 1

Se presenta la influencia del esviaje en las tensiones máximas y mínimas asociadas a la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga del extremo:

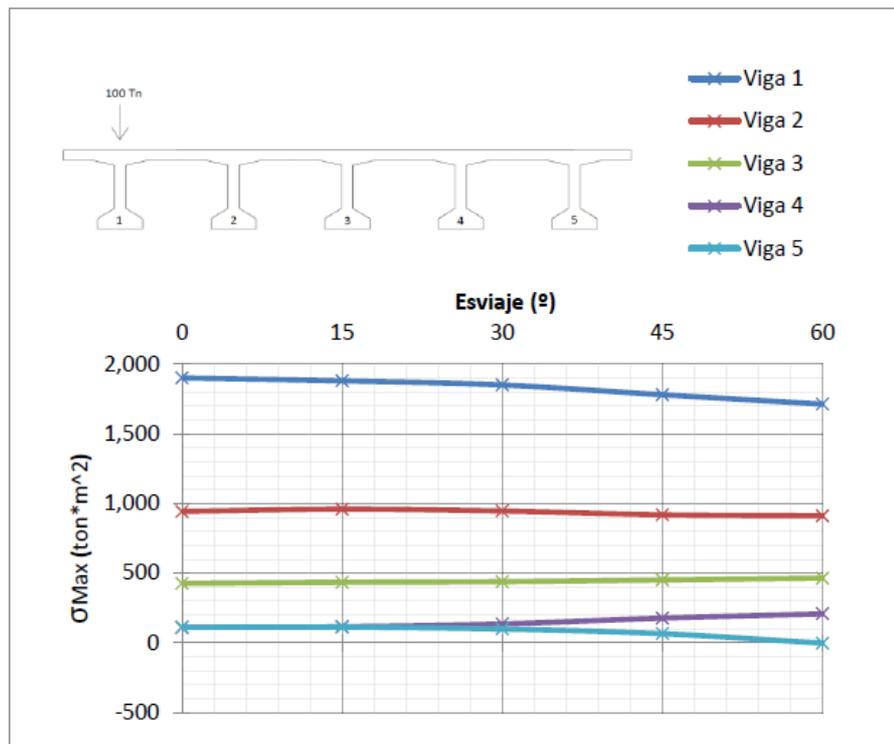


Figura 3.51: Tensión máxima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga.

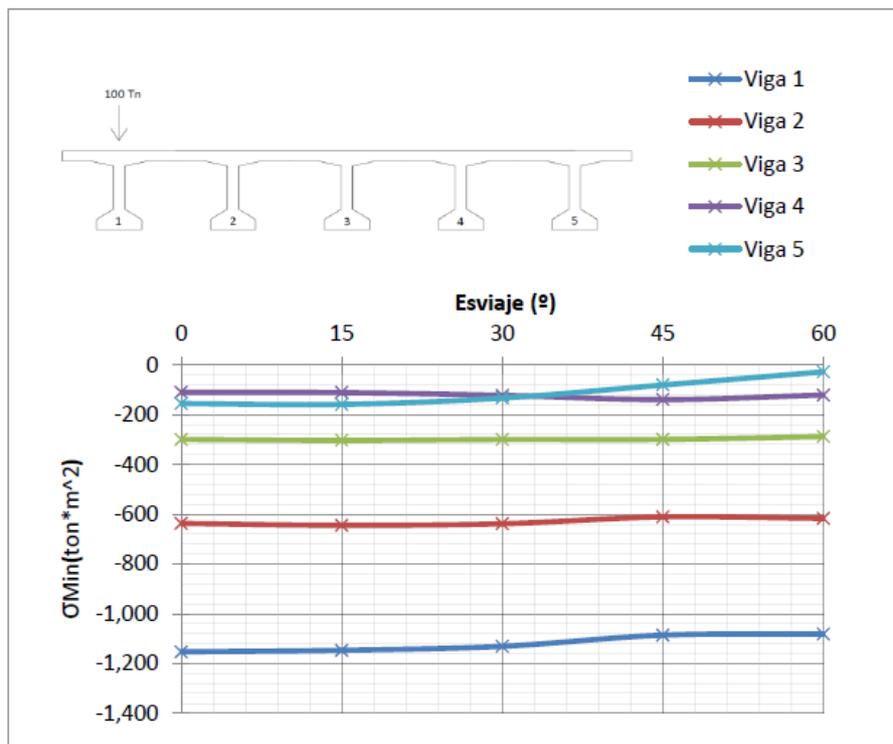


Figura 3.52: Tensión mínima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga.

Carga Puntual 1						
Tensión Máxima	0°	15°	30°	45°	60°	
Viga 1	1901.5	1880.5	1850.6	1780.6	1713.3	
Viga 2	943.0	959.6	946.0	918.6	911.6	
Viga 3	426.4	434.7	438.9	451.1	464.3	
Viga 4	111.0	115.3	135.4	177.1	207.6	
Viga 5	111.2	112.2	98.7	65.1	-2.6	
Tensión Mínima	0°	15°	30°	45°	60°	
Viga 1	-1153.0	-1146.9	-1131.0	-1086.1	-1081.3	
Viga 2	-637.2	-645.0	-638.5	-611.2	-617.2	
Viga 3	-299.9	-303.7	-300.2	-299.9	-288.4	
Viga 4	-110.3	-111.7	-122.7	-139.9	-121.4	
Viga 5	-155.7	-159.1	-133.6	-81.3	-28.3	

Tabla 3.41: Tensión asociada a la sección donde se aplica la carga.

Se observa una clara concentración de tensiones en la viga cargada, esto hace que la viga se deforme rápidamente como ya se analizó en el apartado de corrimientos verticales, pero se amortigua su efecto también muy rápidamente, así vemos como la tensión que se observa en la viga central es una cuarta parte que la viga cargada.

A su vez, se aprecia un descenso generalizado de la tensión en las vigas, de forma más marcada para la viga cargada y su contigua, debido a la rigidización, tanto longitudinal como transversal, que se produce con el aumento del esviaje.

3.7.2 Carga Puntual 3

Se presenta la influencia del esviaje en las tensiones máximas y mínimas asociadas a la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga intermedia:

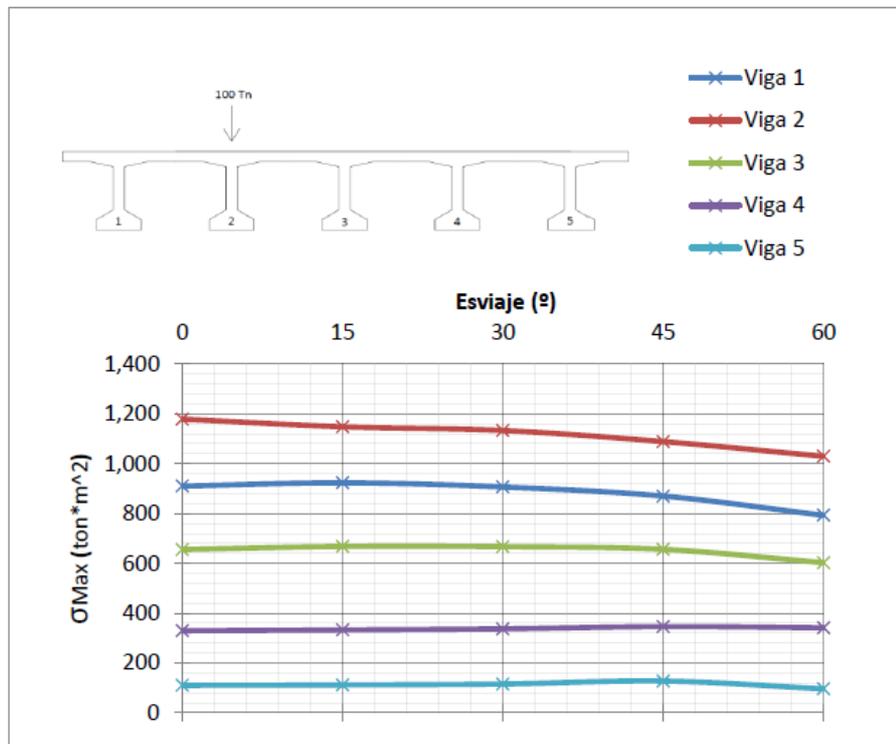


Figura 3.53: Tensión máxima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga.

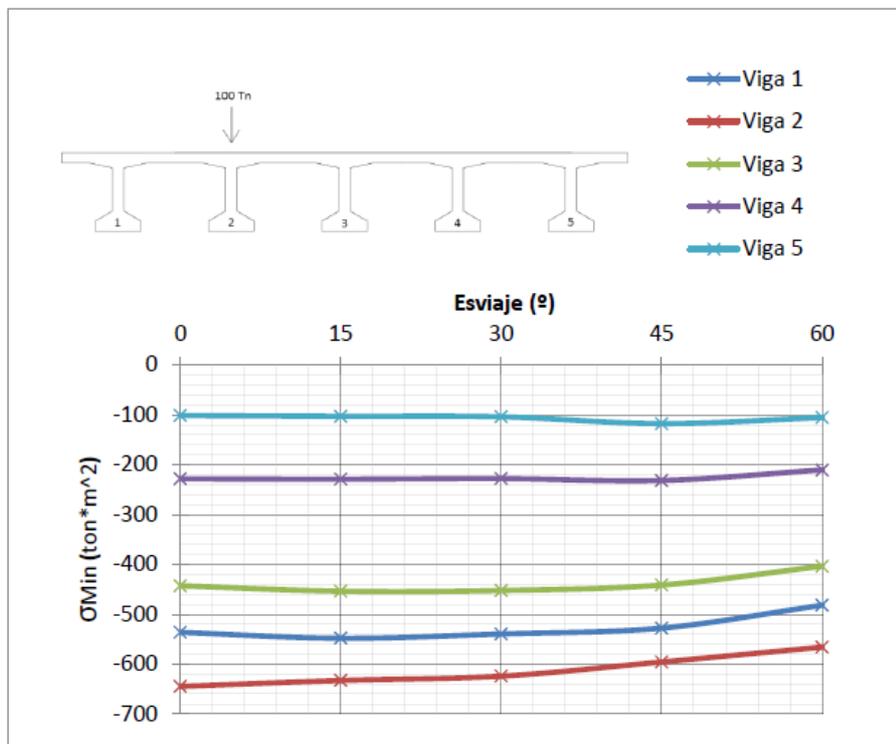


Figura 3.54: Tensión mínima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga.

Carga Puntual 3					
Tensión Máxima	0º	15º	30º	45º	60º
Viga 1	910.0	923.4	906.5	870.1	792.9
Viga 2	1178.8	1148.1	1133.1	1088.6	1029.6
Viga 3	655.7	668.1	667.2	656.2	602.8
Viga 4	329.8	333.0	337.4	346.5	341.9
Viga 5	110.7	112.2	115.9	127.9	96.6
Tensión Mínima	0º	15º	30º	45º	60º
Viga 1	-536.3	-548.2	-539.6	-527.8	-482.0
Viga 2	-644.8	-632.9	-624.2	-595.8	-566.0
Viga 3	-442.9	-453.8	-452.4	-441.4	-403.7
Viga 4	-228.4	-229.0	-227.8	-231.6	-210.5
Viga 5	-101.3	-102.8	-103.9	-117.6	-105.5

Tabla 3.42: Tensión asociada a la sección donde se aplica la carga.

Se observa un comportamiento análogo al caso anterior. La viga cargada refleja el máximo y mínimo de tensiones mientras que a las vigas contiguas también se transmite bastante tensión. Se refleja una disminución de tensiones a medida que aumenta el esviaje. Para el caso de las vigas no cargadas permanecen constantes.

3.7.3 Carga Puntual 4

Se presenta la influencia del esviaje en las tensiones máximas y mínimas asociadas a la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga central:

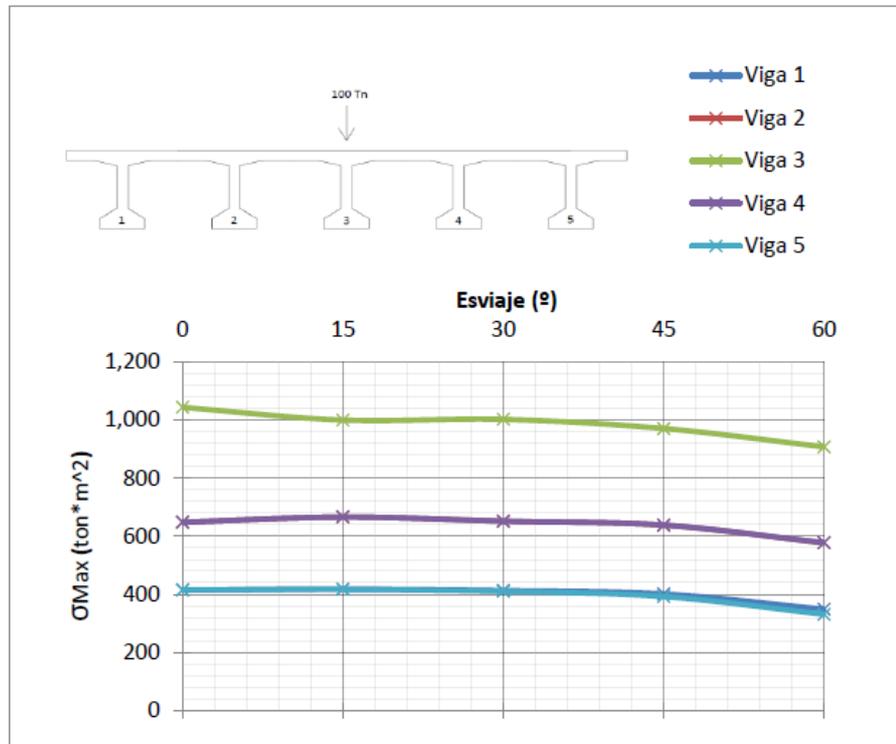


Figura 3.55: Tensión máxima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga.

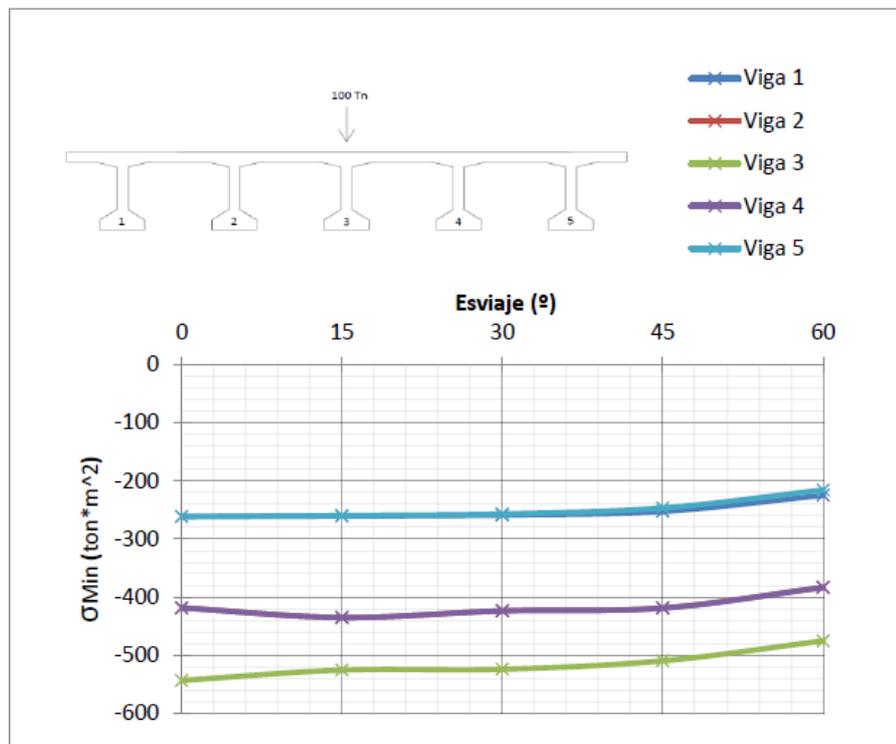


Figura 3.56: Tensión mínima asociada a la sección transversal donde se aplica la carga.

Carga Puntual 4					
Tensión Máxima	0º	15º	30º	45º	60º
Viga 1	415.2	418.2	413.3	401.4	349.1
Viga 2	648.0	665.8	652.0	638.0	577.3
Viga 3	1043.0	999.5	1001.8	970.4	907.4
Viga 4	648.0	665.8	651.5	638.2	577.5
Viga 5	415.2	417.0	410.3	392.2	331.3
Tensión Mínima	0º	15º	30º	45º	60º
Viga 1	-261.5	-260.6	-258.8	-252.6	-224.9
Viga 2	-418.4	-434.9	-423.7	-418.6	-383.1
Viga 3	-543.2	-525.4	-524.0	-509.5	-475.2
Viga 4	-418.4	-435.0	-423.5	-418.9	-383.5
Viga 5	-261.5	-259.7	-256.9	-246.6	-215.7

Tabla 3.43: Tensión asociada a la sección donde se aplica la carga.

De nuevo, la viga cargada refleja la mayor tensión que es tanto menor cuanto más centrada es la carga. A su vez, la tensión disminuye con el aumento del esviaje.

3.7.4 Conclusiones

Bajo la acción de carga puntual, se puede concluir que la tensión reflejada en las vigas será tanto mayor cuanto más descentrada sea la carga. A su vez, la máxima y mínima tensión se produce en la viga donde se aplica la carga, amortiguándose su efecto rápidamente.

La afección del esviaje se refleja en una disminución generalizada de la tensión de las vigas motivada por el aumento de rigidez tanto longitudinal como transversal.

3.7.5 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en las tensiones máximas y mínimas asociadas a la sección central ortogonal al eje longitudinal para el caso de carga distribuida:

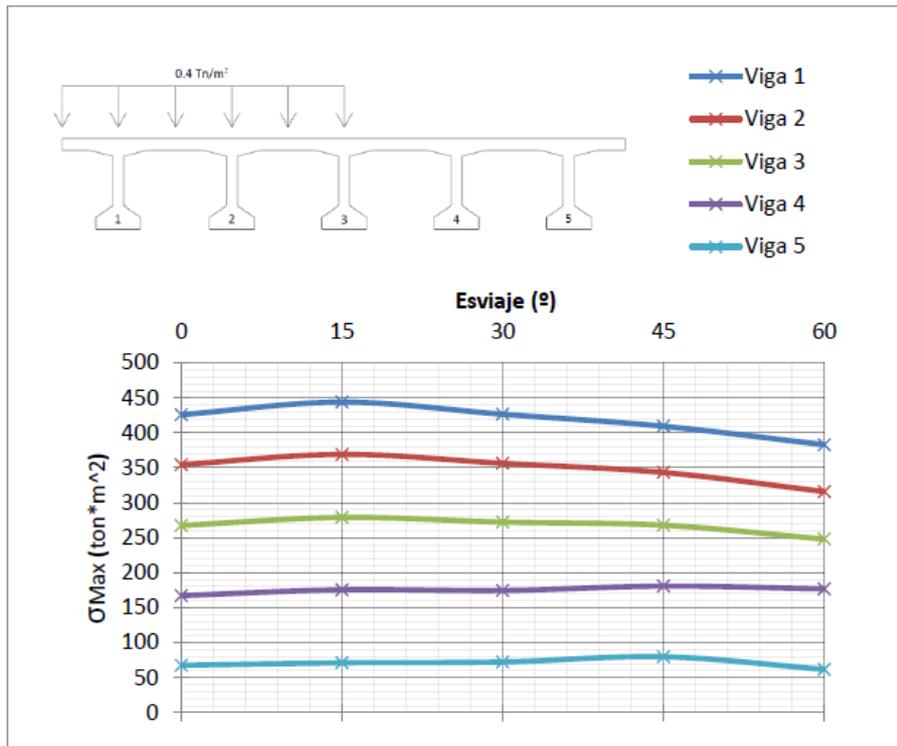


Figura 3.57: Tensión máximo asociada a la sección transversal en la sección central ortogonal al eje longitudinal.

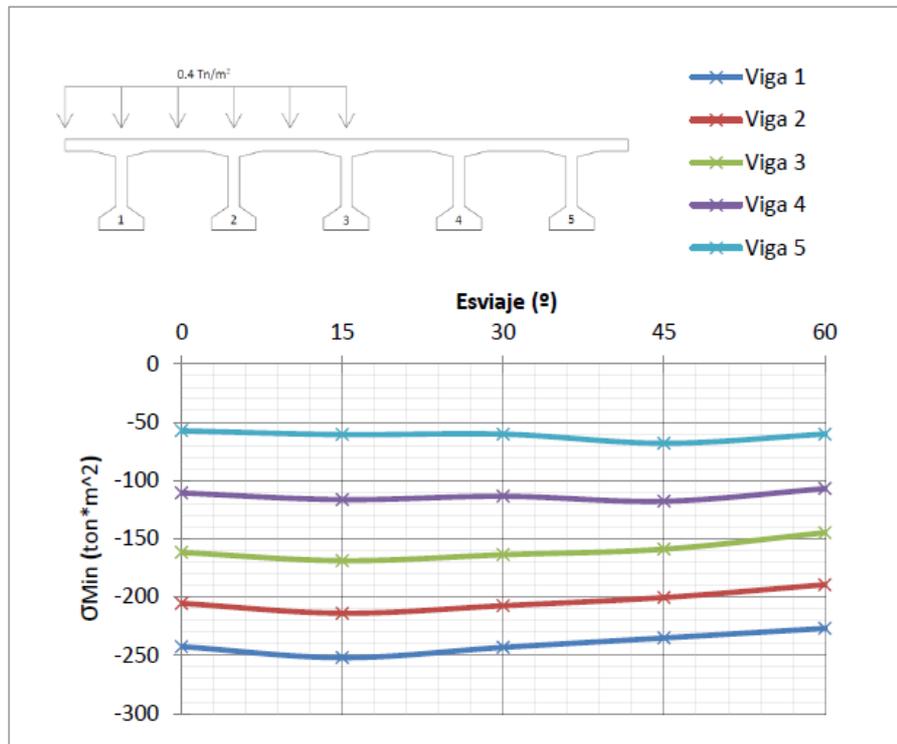


Figura 3.58: Tensión mínimo asociada a la sección transversal en la sección central ortogonal al eje longitudinal.

Carga Distribuida					
Tensión Máxima	0	15	30	45	60
Viga 1	426.1	444.0	426.7	409.5	383.1
Viga 2	354.6	369.3	356.5	343.4	316.1
Viga 3	267.6	279.1	272.4	267.9	248.1
Viga 4	167.3	175.7	174.6	180.9	176.9
Viga 5	67.6	71.2	72.4	79.8	61.8
Tensión Mínima	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-242.5	-252.0	-243.2	-235.1	-226.9
Viga 2	-205.4	-213.9	-207.4	-200.4	-189.4
Viga 3	-161.7	-168.8	-163.7	-158.9	-144.8
Viga 4	-110.7	-116.4	-113.5	-117.8	-107.0
Viga 5	-57.3	-60.6	-60.2	-68.0	-60.2

Tabla 3.44: Tensión asociada a la sección central ortogonal al eje longitudinal.

La carga uniforme produce un estado de tensiones y deformaciones mucho más uniforme que bajo cargas puntuales. Se aprecia la tendencia de reducir las tensiones a medida que aumenta el esviaje como consecuencia del aumento de rigidez.

3.8 Momento flector transversal (sección central)

3.8.1 Carga Puntual 1

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal, en la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga del extremo. Se ha de tener en cuenta que, para poder realizar la comparativa con los diferentes modelos, los momentos están expresados por unidad de longitud:

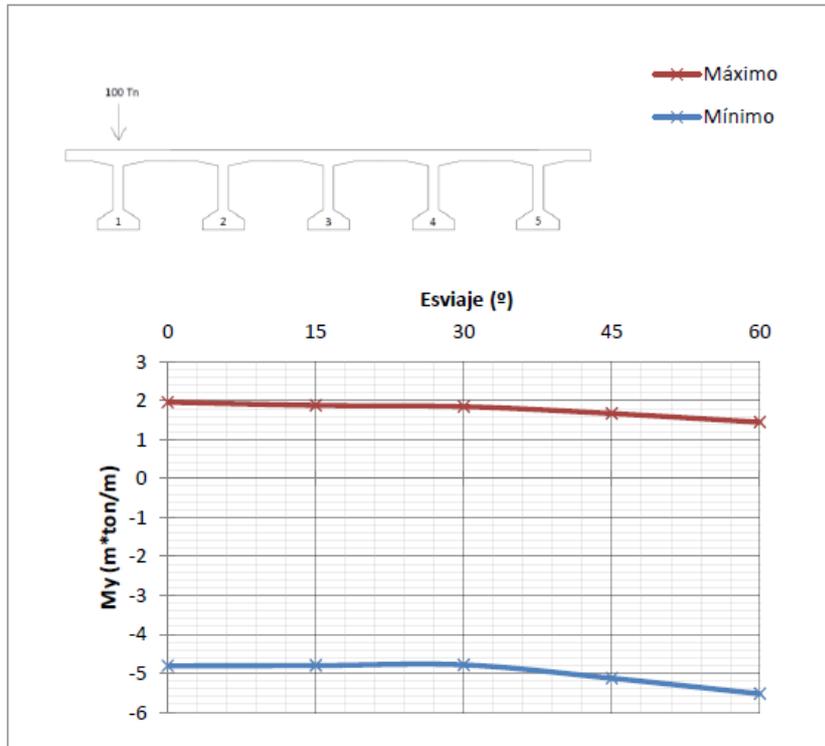


Figura 3.59: Influencia del esviaje en el momento flector transversal de la sección donde se aplica la carga.

Carga Puntual 1	0º	15º	30º	45º	60º
Máximo	1.96	1.88	1.65	1.67	1.45
Mínimo	-4.81	-4.80	-4.79	-5.13	-5.53

Tabla 3.45: Momento flector transversal para el caso de carga puntual 1.

Se observa una disminución en el máximo momento transversal y un aumento del mínimo. Pese a ello, son variaciones muy reducidas por lo que se plantea un análisis de este mismo estudio situado en la zona de los apoyos (véase el apartado “1.8 Análisis del momento transversal en la zona de los apoyos”).

3.8.2 Carga Puntual 3

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal, en la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga intermedia:

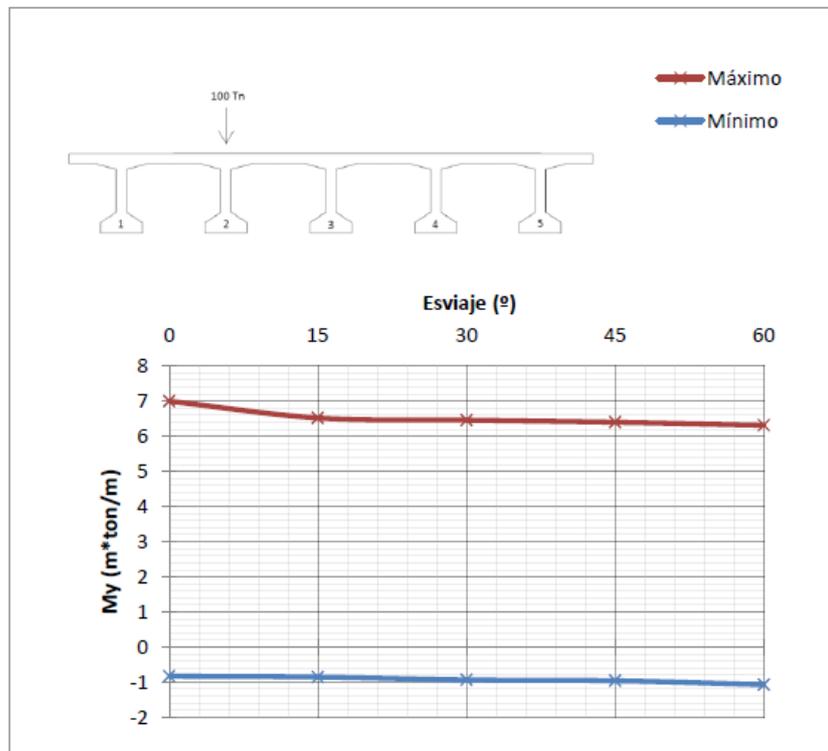


Figura 3.60: Influencia del esviaje en el momento flector transversal de la sección donde se aplica la carga.

Carga Puntual 3	0º	15º	30º	45º	60º
Máximo	7.00	6.37	6.46	6.80	6.31
Mínimo	-0.83	-0.85	-0.94	-0.96	-1.07

Tabla 3.46: Momento flector transversal para el caso de carga puntual 3.

Se reflejan unos resultados análogos al caso anterior.

3.8.3 Carga Puntual 4

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal, en la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga central:

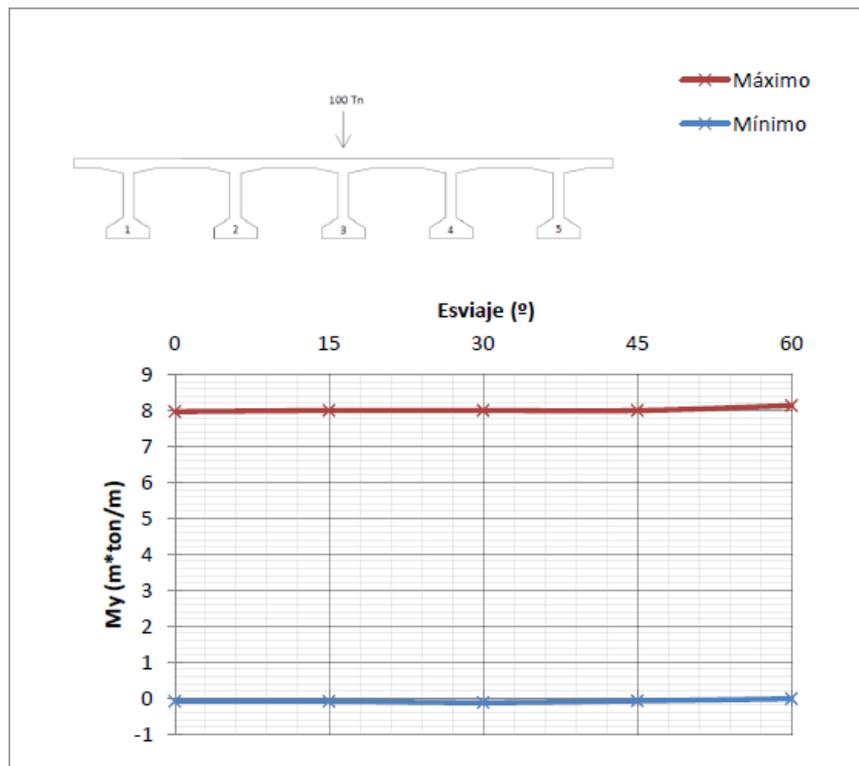


Figura 3.61: Influencia del esviaje en el momento flector transversal de la sección donde se aplica la carga.

Carga Puntual 4	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	7.97	8.00	8.00	8.00	8.24
Mínimo	-0.09	-0.09	-0.13	-0.08	-0.02

Tabla 3.47: Momento flector transversal para el caso de carga puntual 4.

La misma tendencia puede observarse cuando se aplica la carga en la viga central.

3.8.4 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal, en los puntos de la sección central ortogonal al eje longitudinal, para el estado de carga distribuida:

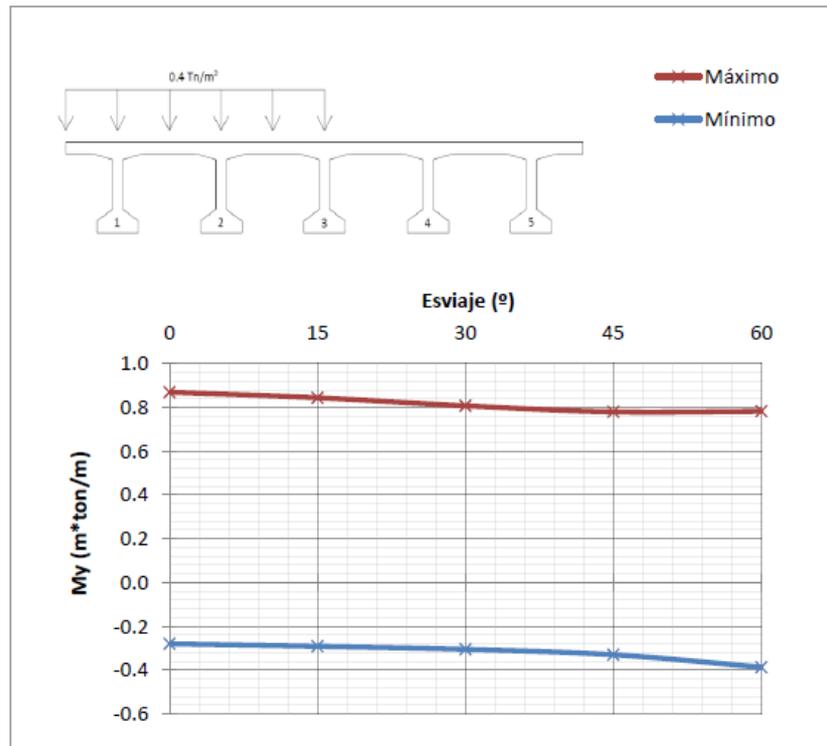


Figura 3.62: Influencia del esviaje en el momento flector transversal de la sección donde se aplica la carga.

Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.87	0.84	0.81	0.78	0.78
Mínimo	-0.28	-0.29	-0.31	-0.33	-0.39

Tabla 3.48: Momento flector transversal para el caso de carga distribuida.

Se observa una disminución en el máximo momento transversal y un aumento del mínimo. Sigue la misma tendencia que las cargas puntuales de manera más marcada.

3.8.5 Conclusion

En cualquier caso, no se muestra una gran afección del esviaje a la flexión transversal en la zona central del tablero. Realizamos a continuación el estudio en la zona de los apoyos en busca de unos resultados más determinantes.

3.9 Momento flector transversal (sección de apoyos)

En primer lugar se debe decidir en qué sección, de todo el apoyo, vamos a seleccionar los esfuerzos los cuales servirán para llevar a cabo tanto el análisis del momento flector transversal como del momento torsor transversal. Recordamos aquí el apartado “2.2 Modelo de Midas Civil” y más concretamente el apartado “2.2.3 Propiedades de la sección” en el cual, a modo de breve resumen, se establecían tres secciones transversales para cada uno de los modelos. La sección del apoyo incluye las secciones que se han denominado t2 y t3, siendo ésta última la sección transversal ortogonal más externa del apoyo. Además se ha establecido que solo nos referimos a los valores máximos y mínimos en esa zona. Así pues, se decide obtener los valores máximos de los esfuerzos tanto para la sección t2 como la sección t3, los cuales deben ser divididos por su ancho correspondiente, para finalmente seleccionar el máximo y mínimo entre estos cuatro resultados. Por tanto, los resultados que aquí se reflejan son los valores máximos comprendidos en la sección del apoyo y que variarán de posición en función del tipo de carga y esviaje al que se este referido.

3.9.1 Carga Puntual 1

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal asociado a la sección del apoyo para el estado de carga puntual en la viga extrema:

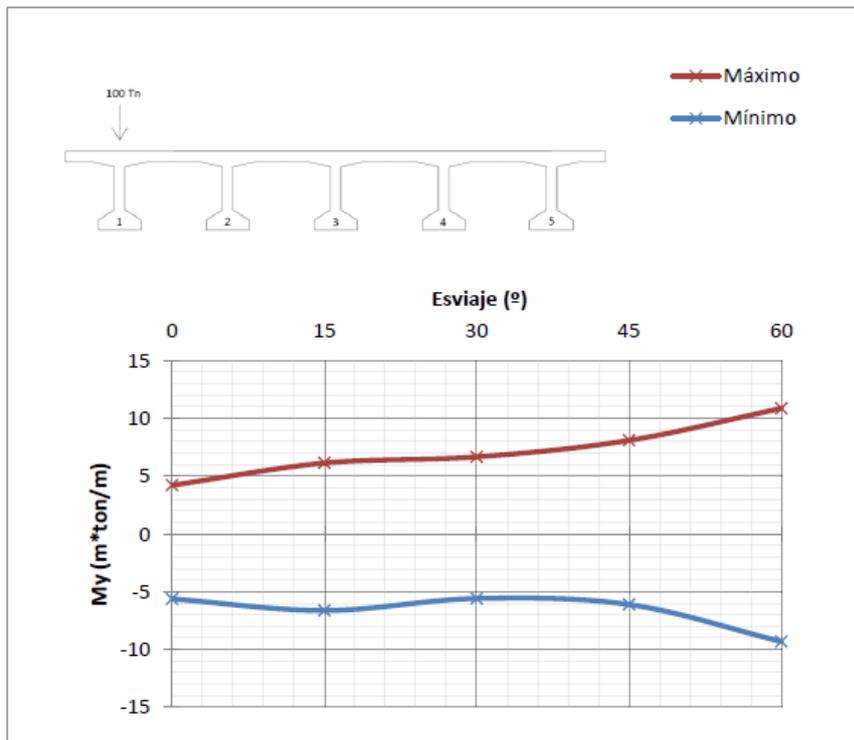


Figura 3.63: Influencia del esviaje en el momento flector transversal asociado a la zona del apoyo.

Carga Puntual 1	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	4.21	6.13	6.66	8.09	10.86
Mínimo	-5.62	-6.62	-5.59	-6.11	-9.31

Tabla 3.49: Momento flector transversal asociado a la zona del apoyo.

Se observa un aumento significativo tanto del máximo como del mínimo momento flector transversal. Esto viene motivado por la torsión que se genera en las inmediaciones del apoyo.

3.9.2 Carga Puntual 3

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal asociado a la sección del apoyo para el estado de carga puntual en la viga intermedia:

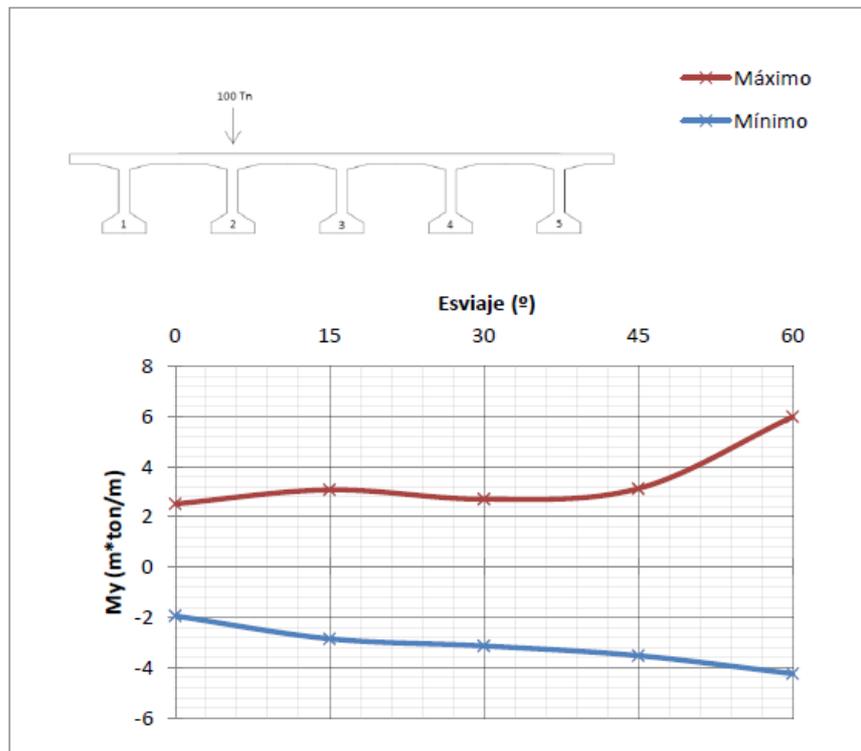


Figura 3.64: Influencia del esviaje en el momento flector transversal asociado a la zona del apoyo.

Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	2.52	3.08	2.71	3.13	5.98
Mínimo	-1.94	-2.85	-3.13	-3.52	-4.23

Tabla 3.50: Momento flector transversal asociado a la zona del apoyo.

Se refleja una tendencia análoga al caso anterior, pero de manera menos marcada. A su vez, es mucho más pronunciada a partir de 45°.

3.9.3 Carga Puntual 4

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal asociado a la sección del apoyo para el estado de carga puntual en la viga central:

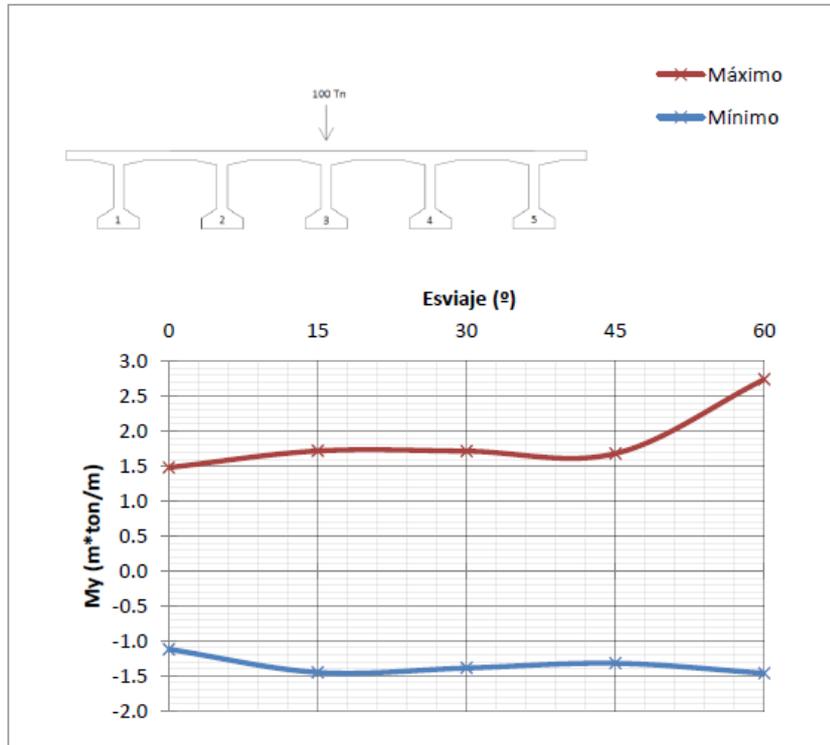


Figura 3.65: Influencia del esviaje en el momento flector transversal asociado a la zona del apoyo.

Carga Puntual 4	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	1.48	1.72	1.71	1.68	2.74
Mínimo	-1.12	-1.45	-1.39	-1.32	-1.46

Tabla 3.51: Momento flector transversal asociado a la zona del apoyo.

Se observa un comportamiento análogo a los dos casos anteriores, con unos valores menores al ser la carga centrada.

3.9.4 Conclusiones

Se puede concluir por tanto que el momento transversal en la zona del apoyo será mayor cuanto mayor sea el esviaje debido a la torsión que se genera en las inmediaciones del apoyo. A su vez, esta tendencia será mayor cuanto más descentrada se sitúe la carga y más marcada a partir de 45°.

3.9.5 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal asociado a la sección del apoyo para el estado de carga distribuida:

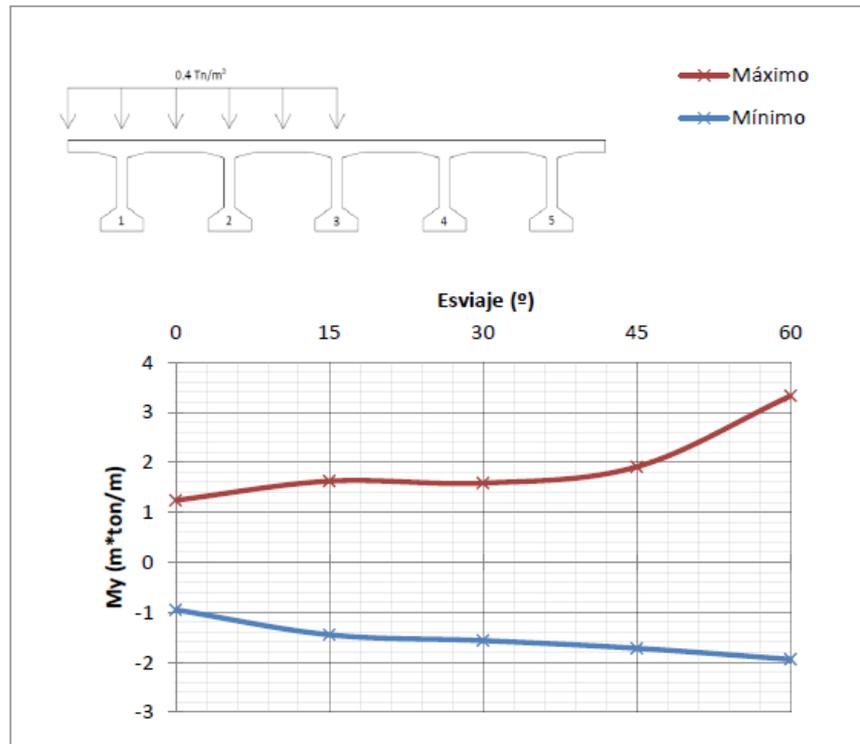


Figura 3.66: Influencia del esviaje en el momento flector transversal asociado a la zona del apoyo.

Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	1.24	1.62	1.58	1.91	3.33
Mínimo	-0.95	-1.45	-1.57	-1.72	-1.94

Tabla 3.52: Momento flector transversal asociado a la zona del apoyo.

Se observa un aumento significativo tanto del máximo como del mínimo momento flector transversal. Esto viene motivado por la torsión que la carga repartida genera en las inmediaciones del apoyo. Es la misma tendencia de la carga puntual de manera menos marcada.

3.10 Momento torsor transversal. (Sección central)

3.10.1 Carga Puntual 1

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento torsor transversal, en la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga del extremo:

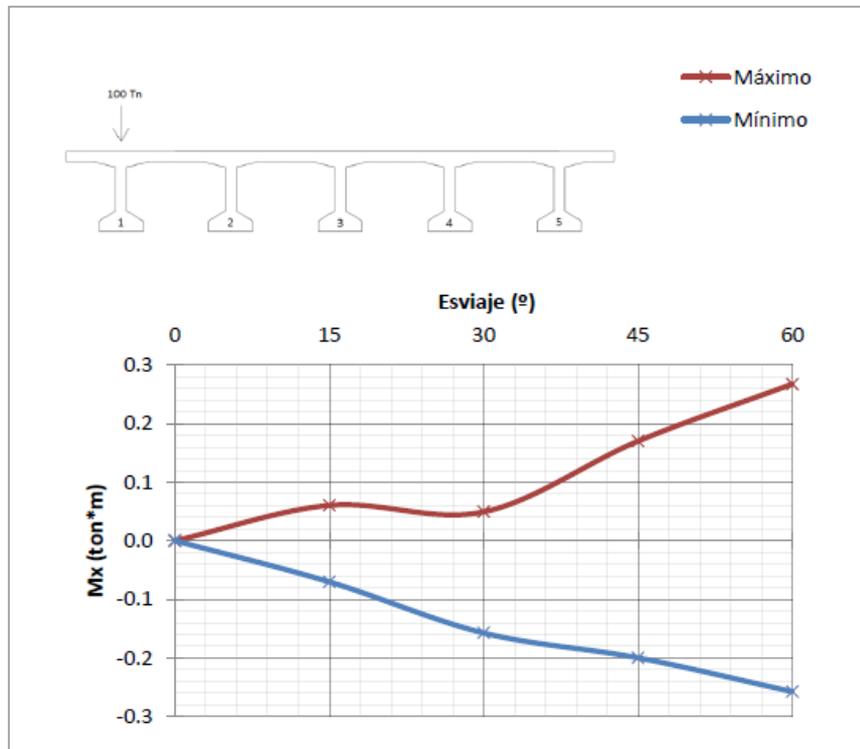


Figura 3.67: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal donde se aplica la carga.

Carga Puntual 1	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.000	0.060	0.049	0.170	0.268
Mínimo	0.000	-0.070	-0.158	-0.200	-0.258

Tabla 3.53: Momento torsor transversal para el caso de carga puntual 1.

Se observa un aumento tanto del máximo como del mínimo momento torsor transversal asociado a la sección de aplicación de la carga. Este comportamiento está relacionado con la disminución de los momentos flectores longitudinales y con el movimiento longitudinal de los máximos momentos flectores en las vigas respecto de su centro de vano. Se está acoplado la flexión con la torsión, o por expresarlo de otra forma, la flexión principal de la losa ortótropa, que es el tablero, está girando respecto del eje longitudinal.

3.10.2 Carga Puntual 3

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal, en la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga intermedia:

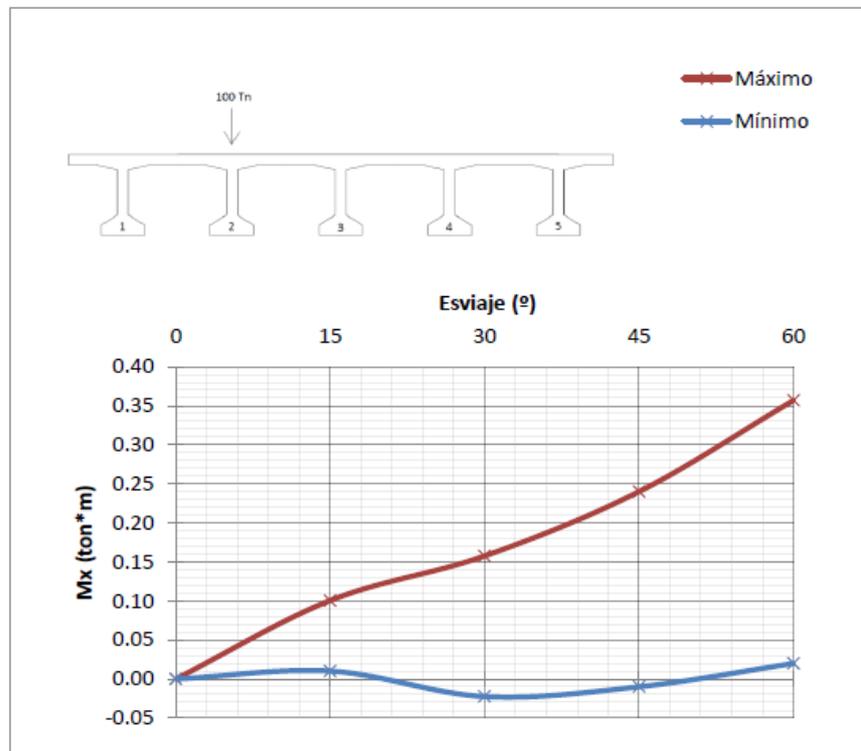


Figura 3.68: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal donde se aplica la carga.

Carga Puntual 3	0 $^\circ$	15 $^\circ$	30 $^\circ$	45 $^\circ$	60 $^\circ$
Máximo	0.000	0.101	0.158	0.240	0.357
Mínimo	0.000	0.010	-0.023	-0.010	0.020

Tabla 3.54: Momento torsor transversal para el caso de carga puntual 3.

Se observa como, para el caso de carga puntual en la viga intermedia, aumenta el momento torsor transversal asociados a la viga cargada, mientras que el mínimo se genera en la viga 5 siendo aproximadamente nulo para todos los esviajes.

3.10.3 Carga Puntual 4

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal, en la sección transversal a la aplicación de la carga, para el estado de carga puntual en la viga central:

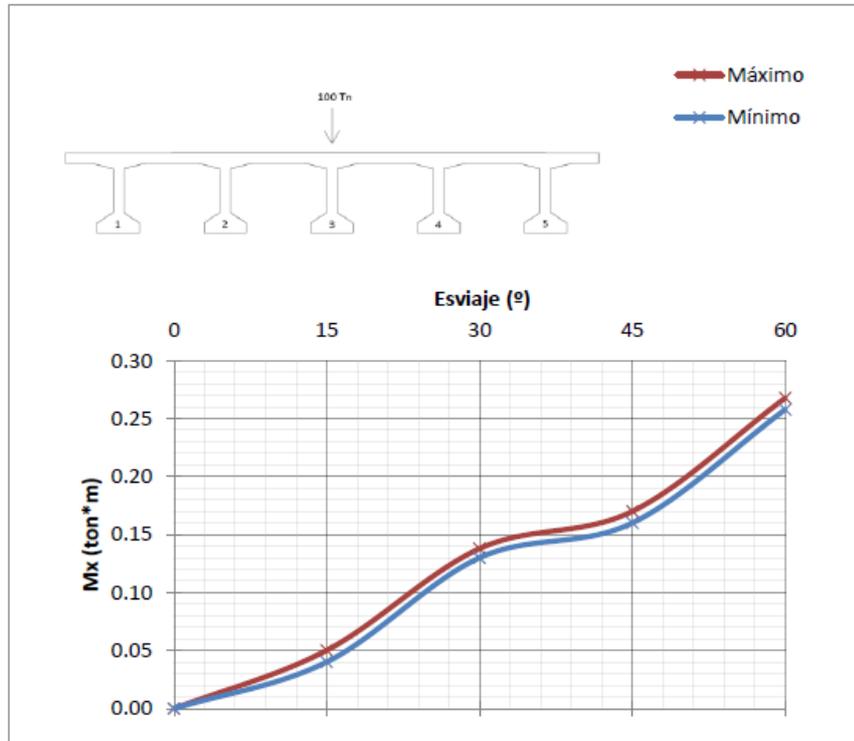


Figura 3.69: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal donde se aplica la carga.

Carga Puntual 4	0 $^\circ$	15 $^\circ$	30 $^\circ$	45 $^\circ$	60 $^\circ$
Máximo	0.000	0.050	0.138	0.170	0.268
Mínimo	0.000	0.040	0.130	0.160	0.258

Tabla 3.55: Momento torsor transversal para el caso de carga puntual 4.

Se aprecia que, cuanto más centrada está la carga, el torsor que se origina en la sección de la aplicación de la carga es prácticamente constante. La diferencia entre el máximo y el mínimo apenas difiere un 5%.

El efecto que se aprecia al cambiar la posición de la carga corresponde a la superposición de dos efectos distintos, por una parte el acoplamiento de la flexión principal con la torsión a causa del esviaje, y la mayor o menor torsión como consecuencia de la excentricidad de la carga. Eso es lo que motiva el cambio tan importante en los momentos torsores mínimos, de modo que cuando la carga está centrada en el tablero es prácticamente igual al máximo (no hay torsión por excentricidad de la carga).

3.10.4 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal, en los puntos de la sección central ortogonal al eje longitudinal, para el estado de carga distribuida:

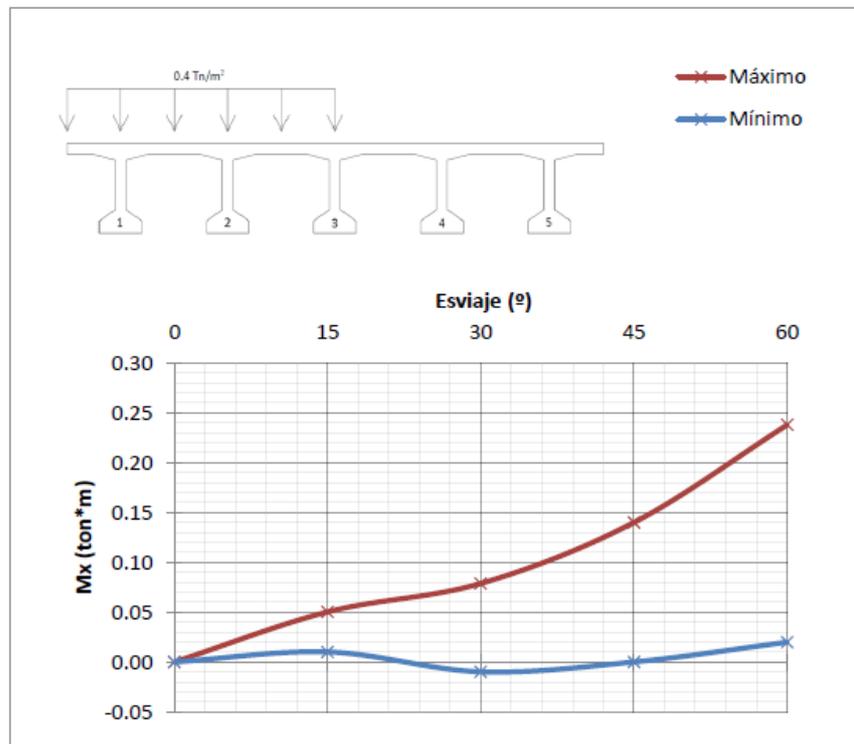


Figura 3.70: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal donde se aplica la carga.

Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.000	0.050	0.079	0.140	0.238
Mínimo	0.000	0.010	-0.010	0.000	0.020

Tabla 3.56: Momento torsor transversal para el caso de carga distribuida.

Se aprecia una clara influencia del momento torsor en las barras transversales del modelo de la losa, en la sección central, con el esviaje. Ese efecto, que se muestra tanto para las cargas puntuales, como para la sobrecarga repartida excéntrica, es más acusado con cargas puntuales.

El comportamiento es similar por la forma de acoplarse la flexión con la torsión, y por excentricidad de la carga, a lo que sucede con la carga puntual 3.

3.11 Momento torsor transversal (sección en apoyos)

3.11.1 Carga Puntual 1

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento torsor transversal asociado a la sección del apoyo para el estado de carga puntual en la viga del extremo:

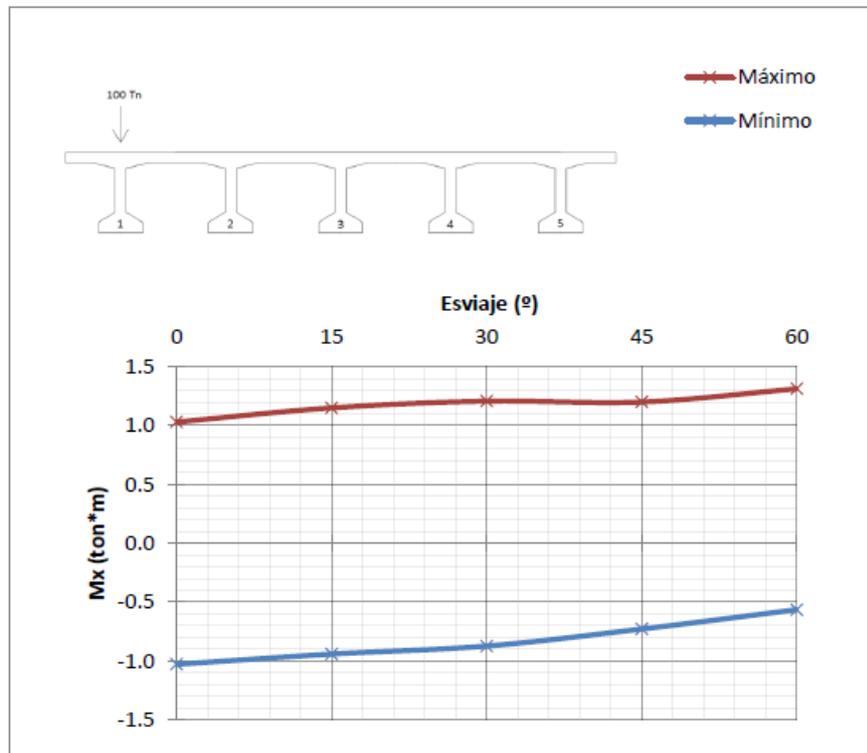


Figura 3.71: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal asociado a la zona del apoyo.

Carga Puntual 1	0º	15º	30º	45º	60º
Máximo	1.030	1.150	1.207	1.200	1.312
Mínimo	-1.030	-0.943	-0.875	-0.730	-0.566

Tabla 3.57: Momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo para el caso de carga puntual 1.

Incremento del Mx CP1	0º	15º	30º	45º	60º
Máximo	0.000	0.120	0.177	0.170	0.282
Mínimo	0.000	0.087	0.155	0.300	0.464

Tabla 3.58: Incremento del momento torsor transversal respecto al puente sin esviaje.

Se observa un aumento de la torsión con el esviaje, pero menos relevante que en la sección central.

Es interesante observar que mientras en la sección central del puente recto no había torsores transversales (no hay giros en esa sección), sí los hay en la sección del apoyo por la diferencia de giros entre vigas. Eso hace que el incremento relativo sea menor.

3.11.2 Carga Puntual 3

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento torsor transversal asociado a la sección del apoyo para el estado de carga puntual en la viga intermedia:

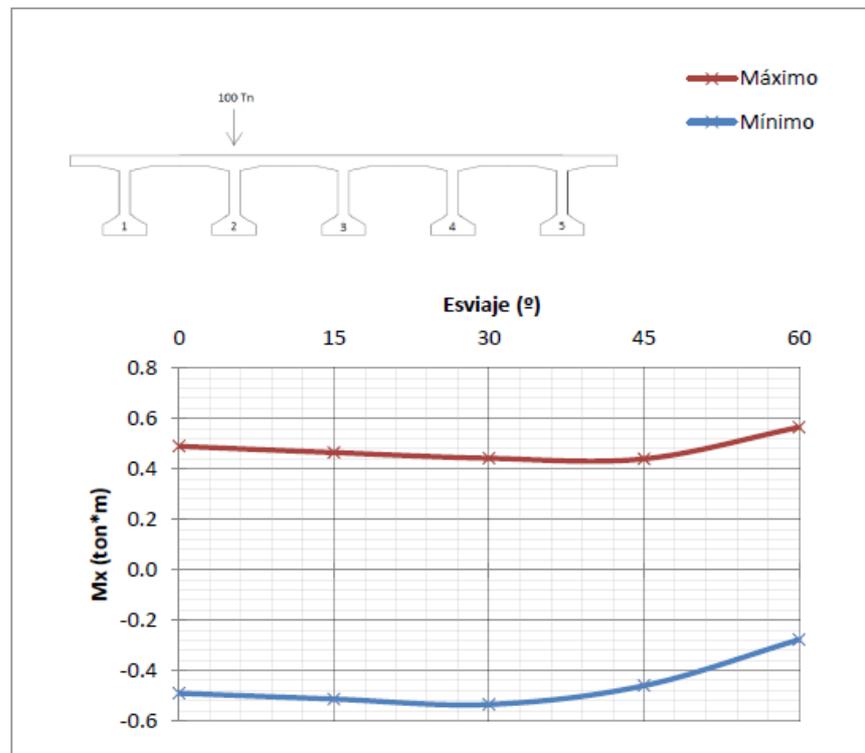


Figura 3.72: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal asociado a la zona del apoyo.

Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.490	0.465	0.442	0.440	0.565
Mínimo	-0.490	-0.513	-0.535	-0.460	-0.277

Tabla 3.59: Momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo para el caso de carga puntual 3.

Incremento del Mx CP3	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.000	-0.025	-0.048	-0.050	0.075
Mínimo	0.000	-0.023	-0.045	0.030	0.213

Tabla 3.60: Incremento del momento torsor transversal respecto al puente sin esviaje.

Se observa una tendencia análoga al caso anterior.

3.11.3 Carga Puntual 4

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento torsor transversal asociado a la sección del apoyo para el estado de carga puntual en la viga central:

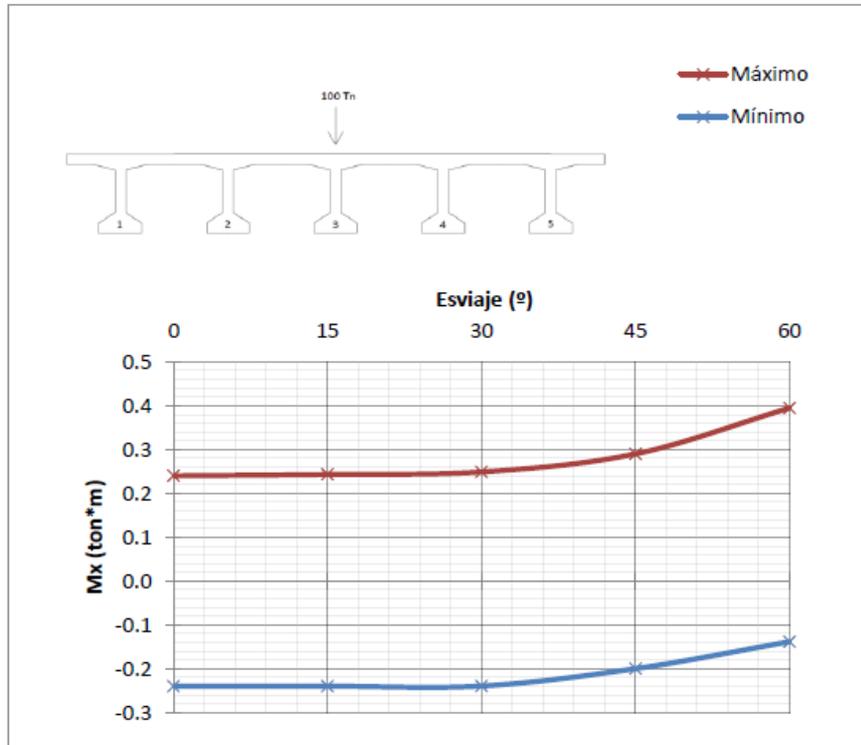


Figura 3.73: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal asociado a la zona del apoyo.

Carga Puntual 4	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.240	0.243	0.249	0.290	0.395
Mínimo	-0.240	-0.240	-0.240	-0.200	-0.139

Tabla 3.61: Momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo para el caso de carga puntual 4.

Incremento del Mx CP4	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.000	0.003	0.009	0.050	0.155
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.040	0.101

Tabla 3.62: Incremento del momento torsor transversal respecto al puente sin esviaje.

Cuando la carga se aplica en la viga central se observa la misma tendencia.

3.11.4 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en el máximo y mínimo momento flector transversal asociado a la sección del apoyo para el estado de carga distribuida:

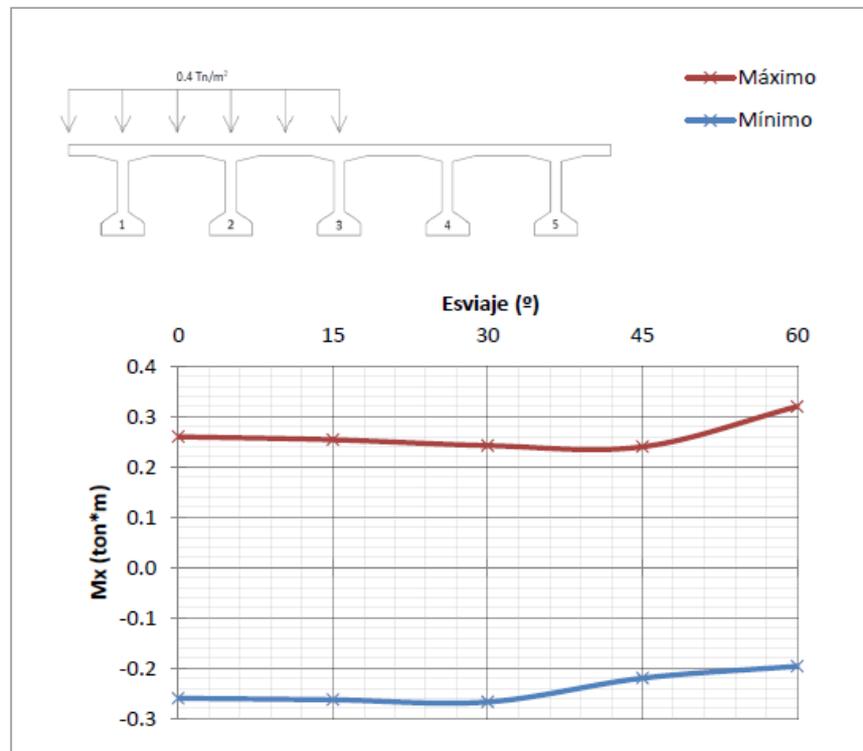


Figura 3.74: Influencia del esviaje en el momento torsor de la sección transversal asociado a la zona del apoyo.

Carga Distribuida	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.260	0.254	0.242	0.240	0.320
Mínimo	-0.260	-0.263	-0.267	-0.220	-0.196

Tabla 3.63: Momento torsor transversal asociado a la zona del apoyo para el caso de carga distribuida.

Incremento del M_x CD	0°	15°	30°	45°	60°
Máximo	0.000	-0.006	-0.018	-0.020	0.060
Mínimo	0.000	-0.003	-0.007	0.040	0.064

Tabla 3.64: Incremento del momento torsor transversal respecto al puente sin esviaje.

Se observa muy poca incidencia del esviaje en el momento torsor transversal en la sección del apoyo, que está motivado por el empotramiento que las reacciones decaladas en la dirección longitudinal transmiten al tablero, que provoca un menor giro longitudinal de las vigas en esa zona.

3.12 Momento torsor longitudinal

3.12.1 Carga Puntual 1

Se presenta la influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la sección longitudinal más externa para cada esviaje para el estado de carga puntual en la viga del extremo. Con objeto de facilitar la comprensión de la sección dónde están obtenidos estos esfuerzos se facilita la figura 84. Adicionalmente, en las gráficas se decide emplear un mismo rango envolvente para apreciar adecuadamente cómo varían estos esfuerzos para los diferentes estados de carga.

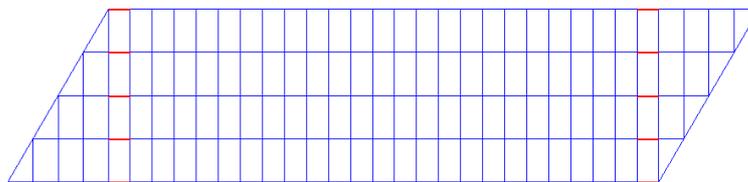


Figura 3.75: Sección longitudinal seleccionada para el análisis del momento torsor longitudinal.

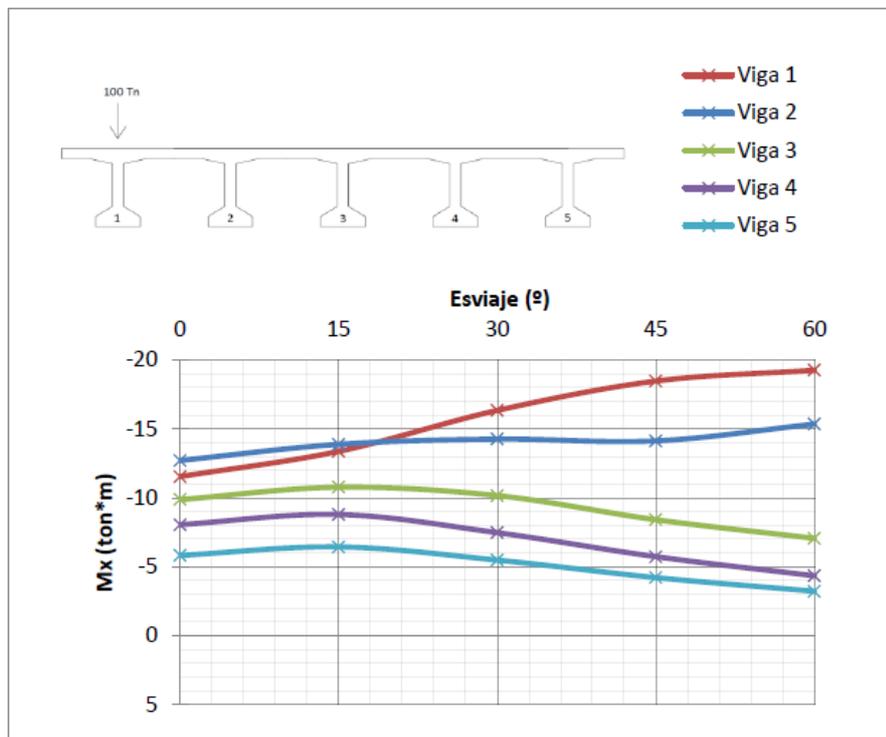


Figura 3.76: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo.

Mx Apoyo Izquierdo Carga Puntual 1	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-11.54	-13.37	-16.34	-18.47	-19.26
Viga 2	-12.71	-13.88	-14.26	-14.13	-15.35
Viga 3	-9.87	-10.77	-10.16	-8.41	-7.06
Viga 4	-8.05	-8.79	-7.47	-5.73	-4.34
Viga 5	-5.82	-6.44	-5.48	-4.21	-3.22

Tabla 3.65: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo.

La afección del esviaje se traduce en un aumento en el torsor longitudinal para la viga cargada y su contigua, mientras que se reduce para las vigas no cargadas. Esto viene motivado por la condición de empotramiento que impide el giro longitudinal en esa zona. Además, esta tendencia será mayor cuanto mayor sea el esviaje debido al aumento de la rigidización que se produce en la zona del apoyo.

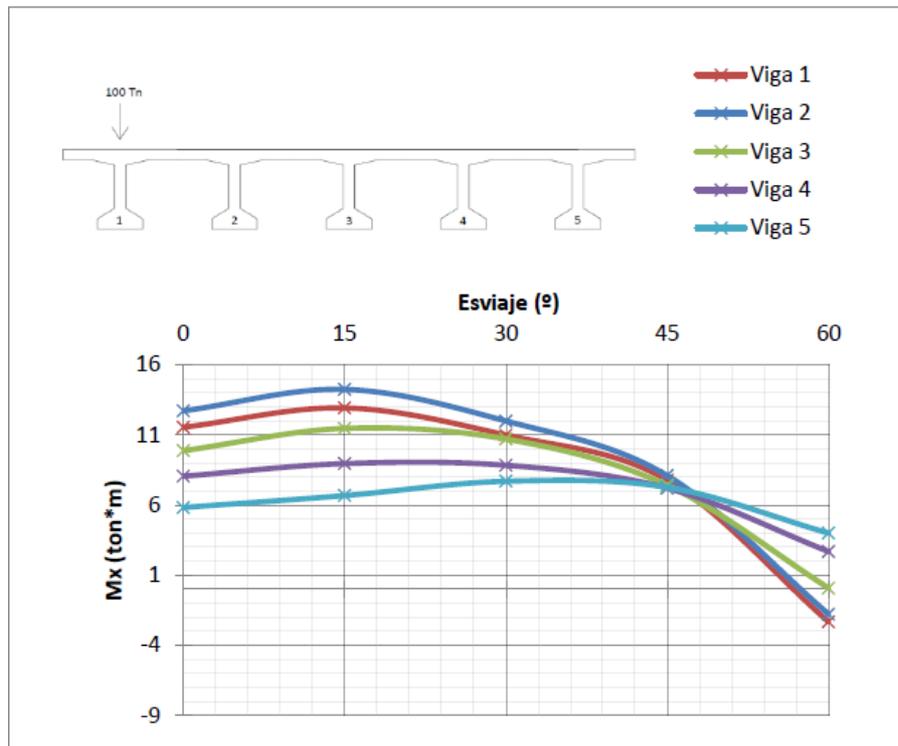


Figura 3.77: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho.

Mx Apoyo Derecho Carga Puntual 1	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	11.54	12.92	10.99	7.77	-2.34
Viga 2	12.71	14.24	11.99	8.09	-1.79
Viga 3	9.87	11.46	10.70	7.40	0.07
Viga 4	8.05	8.95	8.83	7.20	2.68
Viga 5	5.82	6.67	7.69	7.26	3.99

Tabla 3.66: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho.

La diferencia fundamental en el comportamiento entre los dos apoyos se debe a que el momento torsor que se genera como consecuencia del giro que el esviaje produce a la flexión principal, en un apoyo se suma a la torsión de la carga excéntrica y en el otro apoyo se resta. Lógicamente este efecto es más notorio mientras mayor es la excentricidad.

3.12.2 Carga Puntual 3

Se presenta la influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la sección ortogonal (t3) para el estado de carga puntual en la viga intermedia:

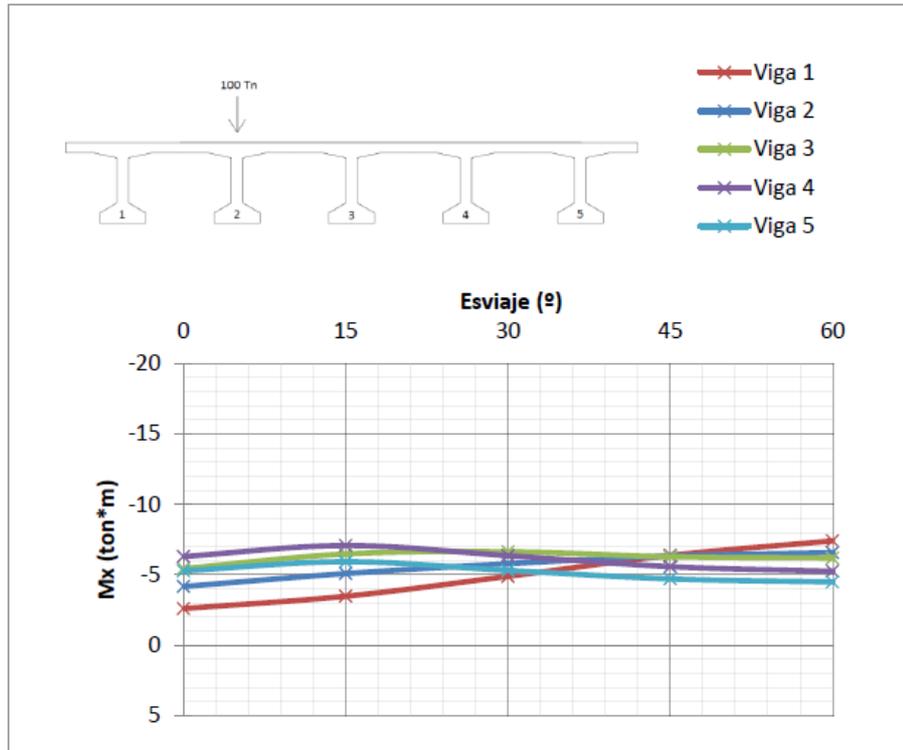


Figura 3.78: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo.

Mx Apoyo Izquierdo Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	-2.60	-3.48	-4.89	-6.38	-7.41
Viga 2	-4.17	-5.09	-5.79	-6.33	-6.58
Viga 3	-5.44	-6.48	-6.64	-6.28	-6.19
Viga 4	-6.30	-7.08	-6.36	-5.58	-5.25
Viga 5	-5.28	-5.93	-5.31	-4.71	-4.49

Tabla 3.67: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo.

Se observa una tendencia análoga al caso anterior. Las vigas que reciben la influencia de la carga, como son las vigas 1,2,3 ven incrementados el valor de los torsores mientras que las vigas no cargadas disminuyen su valor.

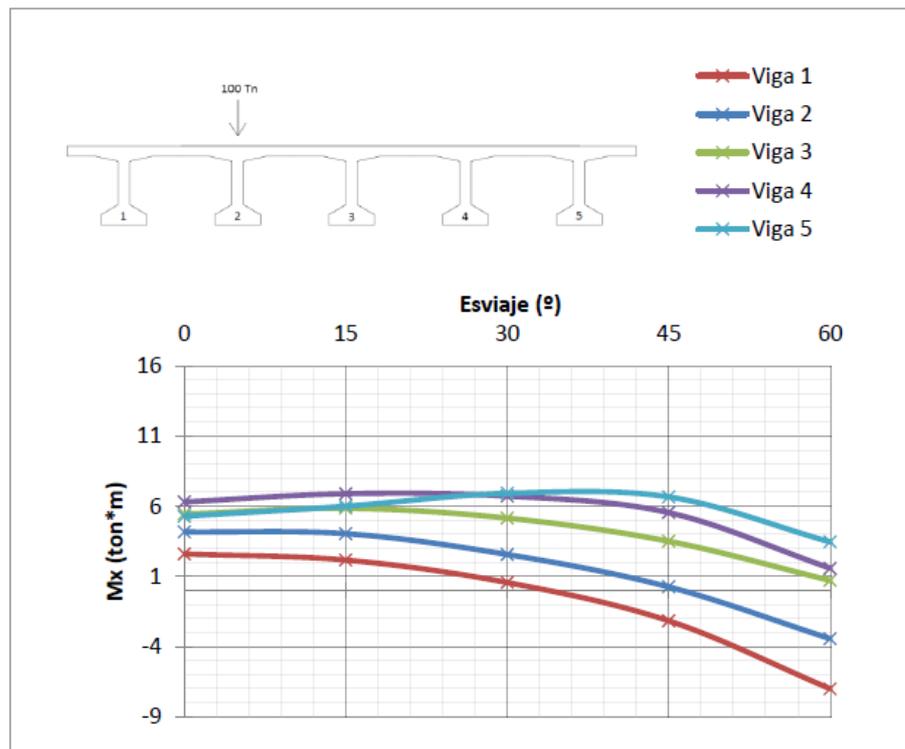


Figura 3.79: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho.

Mx Apoyo Derecho Carga Puntual 3	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	2.60	2.16	0.56	-2.17	-7.01
Viga 2	4.17	4.04	2.56	0.25	-3.44
Viga 3	5.44	5.85	5.15	3.50	0.71
Viga 4	6.30	6.89	6.72	5.54	1.58
Viga 5	5.28	6.00	6.92	6.66	3.45

Tabla 3.68: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho.

La misma tendencia se observa en el apoyo derecho. Se produce el mayor torsor positivo para el apoyo del extremo, esta vez referido a la viga 5, mientras que la viga 1 se ve cada vez más influenciada por la carga puntual.

Se aprecia el mismo efecto que con la carga puntual 1 pero con menor intensidad, debido a la menor excentricidad de la carga.

3.12.3 Carga Puntual 4

Se presenta la influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la sección ortogonal (t3) para el estado de carga puntual en la viga central:

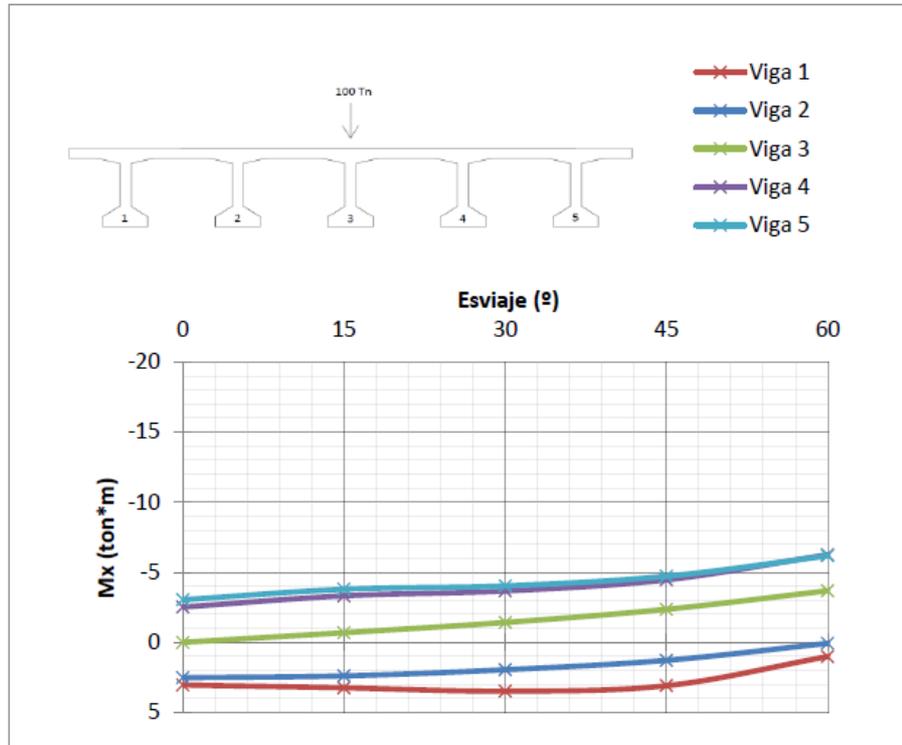


Figura 3.80: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo.

Mx Apoyo -Izquierdo Carga Puntual 4	0°	15°	30°	45°	60°
Viga 1	3.04	3.24	3.48	3.09	1.01
Viga 2	2.52	2.39	1.95	1.28	0.07
Viga 3	0.00	-0.69	-1.42	-2.36	-3.68
Viga 4	-2.52	-3.32	-3.67	-4.46	-6.25
Viga 5	-3.04	-3.79	-4.03	-4.72	-6.17

Tabla 3.69: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo.

Para el caso de carga puntual aplicado en la viga central intervienen los dos signos del momento torsor. El torsor positivo se genera para las vigas 1 y 2 y disminuyen con el esviaje; mientras que para las vigas 3, 4 y 5 se producen torsos negativos que aumentan con el esviaje.

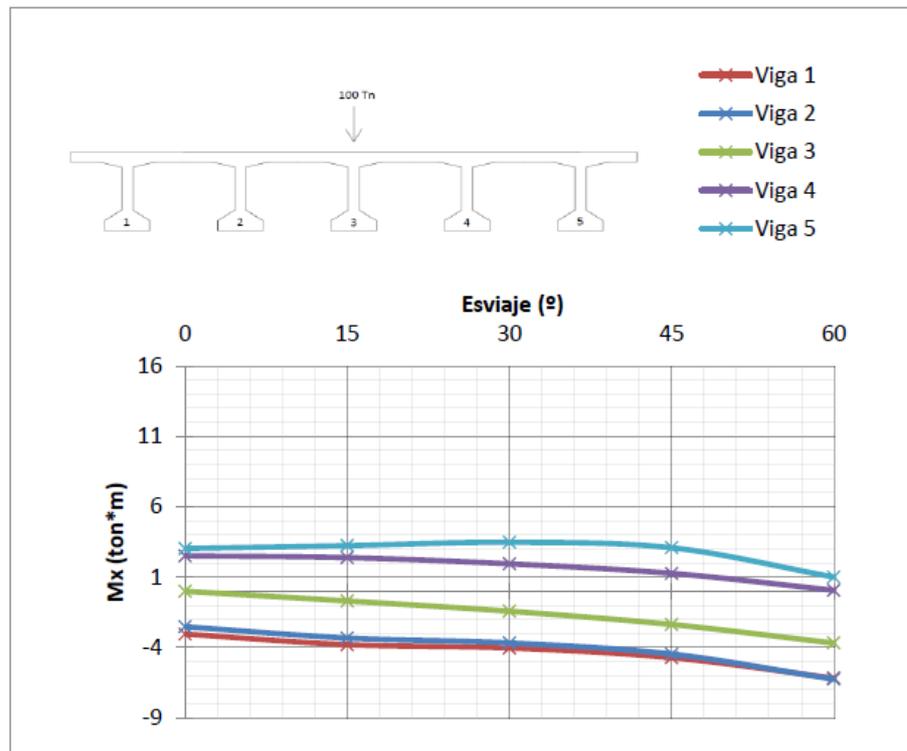


Figura 3.81: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho.

Mx Apoyo Derecho Carga Puntual 4	0º	15º	30º	45º	60º
Viga 1	-3.04	-3.79	-4.03	-4.72	-6.17
Viga 2	-2.52	-3.32	-3.67	-4.46	-6.25
Viga 3	0.00	-0.69	-1.42	-2.36	-3.68
Viga 4	2.52	2.39	1.95	1.27	0.07
Viga 5	3.04	3.24	3.48	3.09	1.01

Tabla 3.70: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho.

Para el caso puntual aplicado en la viga central la respuesta del apoyo derecho es la simétrica al apoyo izquierdo.

En este caso no hay torsión asociada a la excentricidad de la carga y en la viga cargada solo se produce la torsión asociada al giro que el esviaje produce en la flexión principal, que lógicamente crece con el esviaje.

3.12.4 Conclusiones

Para el estado de cargas puntuales analizado, se recuerda que éstas se aplican en la sección central de cada viga en particular, se observa que se produce un acoplamiento entre la torsión que se genera como consecuencia del giro que el esviaje produce a la flexión principal y la torsión producida por la excentricidad de la carga. Esto hace que se distingan dos comportamientos en función del apoyo que se analice:

Para el caso del apoyo izquierdo, la carga se aplica cada vez más lejos, concentrando su torsor en el apoyo de la viga 1 y, en menor medida, en la viga 2. Para el resto de vigas su afección se ve reducida y se observa que desciende su valor, hasta el extremo de ser nulos para la sección del apoyo.

Para el caso del apoyo derecho, la conclusión sería la opuesta. Crece la influencia del torsor, ahora positivo, en la sección del apoyo de la viga 5 y, en menor medida de la viga 4, mientras que para el resto de vigas, al tener la influencia de la carga cada vez más cerca, su esfuerzo torsor aumenta siendo definido como negativo.

En cualquier caso, este comportamiento se debe al aumento de rigidización que se produce en la zona del apoyo sumado a la condición de empotramiento que impide el giro longitudinal en esa zona

3.12.5 Carga Distribuida

Se presenta la influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la sección ortogonal (t_3) para el estado de carga distribuida:

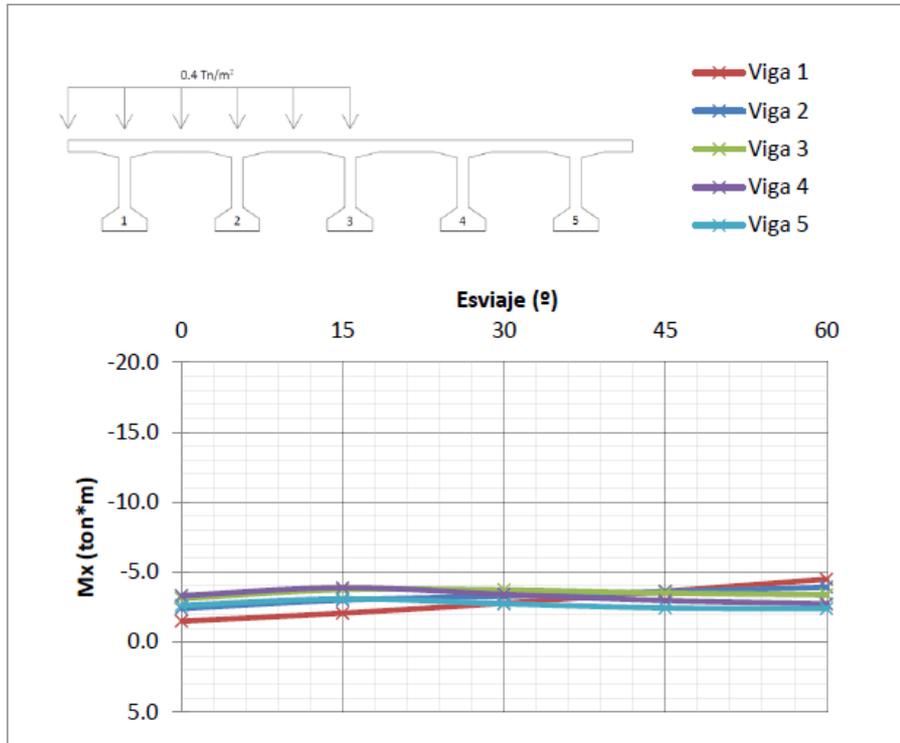


Figura 3.82: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo.

Mx Apoyo Izquierdo Carga Distribuida	0	15	30	45	60
Viga 1	-1.49	-2.07	-2.78	-3.63	-4.49
Viga 2	-2.40	-3.00	-3.28	-3.60	-3.92
Viga 3	-3.12	-3.75	-3.73	-3.50	-3.38
Viga 4	-3.32	-3.89	-3.41	-2.97	-2.73
Viga 5	-2.62	-3.09	-2.74	-2.44	-2.39

Tabla 3.71: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo izquierdo.

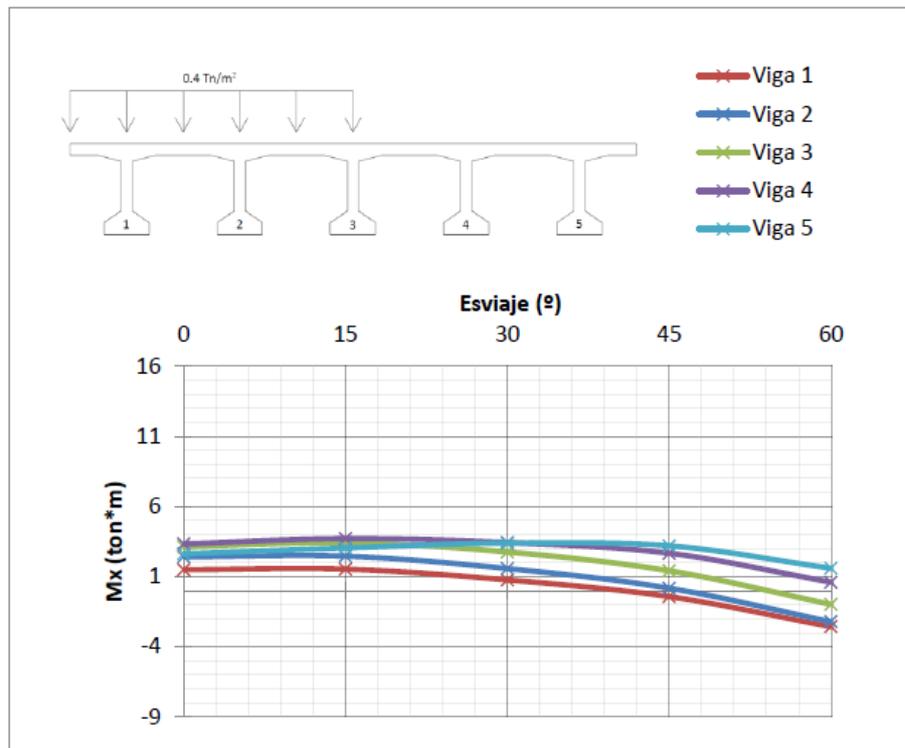


Figura 3.83: Influencia del esviaje en el momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho.

Mx Apoyo Derecho Carga Distribuida	0	15	30	45	60
Viga 1	1.49	1.53	0.76	-0.43	-2.57
Viga 2	2.40	2.45	1.57	0.17	-2.22
Viga 3	3.12	3.41	2.75	1.41	-0.98
Viga 4	3.32	3.71	3.42	2.66	0.60
Viga 5	2.62	3.04	3.38	3.19	1.59

Tabla 3.72: Momento torsor longitudinal asociado a la zona del apoyo derecho.

Se observa la misma tendencia que para el caso de carga puntual, si bien es una tendencia menos marcada.

4 CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo consistía en examinar cómo influye la oblicuidad del contorno en el comportamiento resistente de los tableros de puente. Este apartado se centra en la recopilación de aquellas conclusiones que se han establecido a partir de los diferentes análisis realizados en el apartado anterior.

La influencia del esviaje se traduce, principalmente, en una torsión impuesta al tablero en la zona de los apoyos. Ésta a su vez influye en un aumento de rigidez tanto longitudinal como transversal, pero con matices, es decir el aumento de rigidez longitudinal evoluciona de una manera más significativa que el aumento de rigidez transversal. De esta manera, la flecha observada tanto en la sección de la carga, para el caso de carga puntual, y la correspondiente a los puntos de la sección central ortogonal al eje longitudinal, para el caso de carga distribuida, disminuye de manera generalizada constatando este aumento de rigidez longitudinal. La misma conclusión se aprecia en el estudio de la flecha máxima. Esta afirmación se refuerza en el análisis de los momentos flectores longitudinales puesto que se observa la disminución de los momentos flectores longitudinales conforme aumenta el esviaje. Adicionalmente, se constata una rigidización transversal de la losa ortótropa basada en la relación de momentos longitudinales entre la viga cargada y su contigua.

En lo correspondiente a la influencia del esviaje en los desplazamientos horizontales, se contempla una tendencia suave en la que el menor desplazamiento horizontal para mayores esviajes está relacionado con la menor diferencia en la flexión de las distintas vigas y, consecuentemente, un menor giro de torsión, por lo que no parece que el giro de torsión de la viga cargada se vea afectado por el esviaje.

El momento flector transversal se analiza en dos secciones del tablero. Para el caso de la sección central no se muestra una gran afección del esviaje, mientras que para la sección del apoyo el momento será tanto mayor cuanto mayor sea el esviaje motivado por la torsión que se genera en las inmediaciones del apoyo. El mismo estudio se realiza para el momento torsor transversal. En la sección central se observa un comportamiento relacionado con la disminución de los momentos flectores longitudinales y con el movimiento de los máximos momentos flectores en las vigas respecto del centro de su vano. Se está produciendo un acoplamiento entre la flexión y la torsión, es decir, la flexión principal de la losa ortótropa, que es el tablero, está girando respecto al eje longitudinal. Además este efecto se verá influenciado por la mayor o menor torsión como consecuencia de la excentricidad de la carga. Esta misma deducción se aplica para el torsor transversal asociado a la zona del apoyo, esta vez con una menor incidencia del esviaje motivada por el empotramiento que las reacciones decaladas en la dirección longitudinal transmiten al tablero, que provocan un menor giro longitudinal de las vigas en esa zona.

Por último, se analiza el momento torsor longitudinal en cada uno de los apoyos para el cual la diferencia fundamental en el comportamiento entre los dos apoyos se debe a que el momento torsor que se genera como consecuencia del giro que el esviaje produce a la flexión principal, en un apoyo se suma a la torsión de la carga excéntrica y en el otro apoyo se resta. Lógicamente este efecto es más notorio mientras mayor es la excentricidad.

5 ANÁLISIS FUTUROS

Para finalizar este trabajo de fin de grado, en este apartado se pretende elaborar una serie de análisis futuros con objeto de incentivar al lector tanto a completar como a ampliar lo descrito en el presente proyecto.

-Una de las posibles ampliaciones, siguiendo la tendencia establecida en este trabajo, sería analizar las otras tres tipologías de puente oblicuo que J. Manterola analiza en el capítulo VII “El tablero oblicuo” de su libro “Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I”. Éstos serían el tablero losa oblicuo, la viga cajón oblicua y el puente pérgola.

-A su vez, J. Manterola incluye la influencia de la presencia de rigidizadores, distribuidos a lo largo del vano, en las diferentes magnitudes analizadas.

-Otra opción sería analizar la influencia del esviaje en la respuesta resistente de la estructura en un análisis dinámico.

REFERENCIAS

- [1] Steinmann, D.B., Watson, S.R. (1979). *Puentes y sus constructores*, pp.15-16. Madrid: Turner.
- [2] Plasencia-Lozano, P. (2014). *Puentes, sociedad e ingeniería. Informes de la Construcción*, 66(535): e032.
- [3] Manterola Armisen, J. *Puentes: Apuntes para su Diseño, Cálculo y Contrucción*, vol. 1. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2006. ISBN 84-38003-22-2.
- [4] Software Midas Civil.
- [5] Software AutoCAD.
- [6] G.A. Rombach: *Finite-element Design of Concrete Structures: Practical problems and their solutions*
- [7] Edmund C. Hambly: *Bridge Deck Behaviour*.

